



WHITE PAPER

MOBILIDADE ELÉTRICA

Experiência internacional e condições de contorno para sua difusão no Brasil.

Julho de 2025
São Paulo, Brasil

Este *White Paper* apresenta uma análise sobre a experiência internacional e as condições necessárias para a difusão da Mobilidade Elétrica (ME) no Brasil.

A Mobilidade Elétrica (ME) vai além da simples eletrificação do veículo particular. Ela representa uma transformação sistêmica no transporte urbano, logístico e energético.

Trata-se de um novo paradigma baseado na integração de veículos elétricos com redes inteligentes, fontes renováveis, serviços compartilhados e tecnologias digitais.

O documento explora as principais políticas adotadas em países selecionados, as barreiras à difusão de ME, políticas vigentes no Brasil para incentivo à ME, e as barreiras específicas encontradas no contexto nacional divididas em técnicas, econômicas, políticas, sociais, cognitivas e ambientais.



Conteúdo



1. Resumo Executivo



2. Veículos Leves



3. Mobilidade elétrica pública



4. Experiência internacional



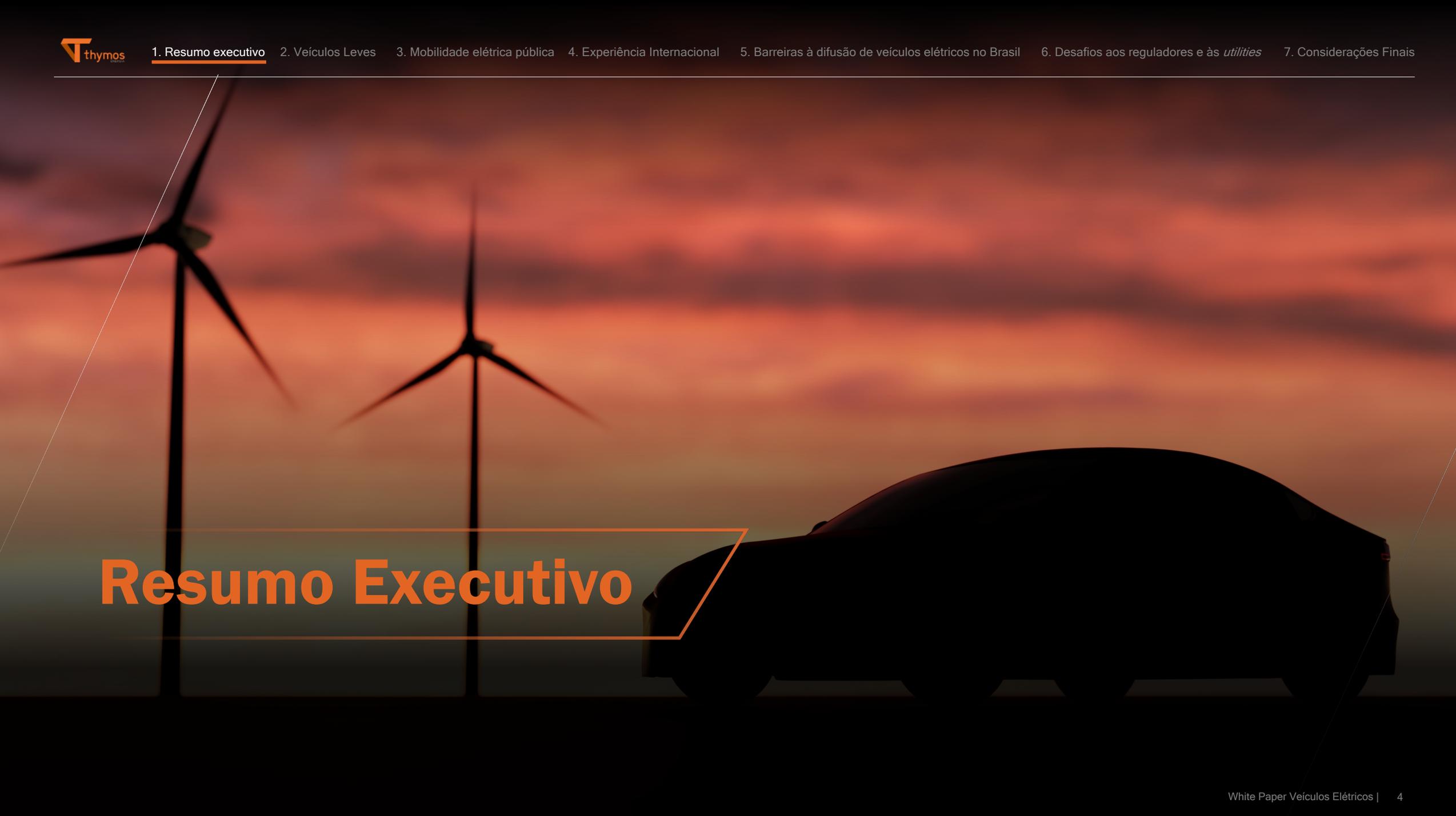
5. Barreiras à difusão de veículos elétricos no Brasil



6. Desafios aos reguladores e às *utilities*



7. Considerações Finais

The background of the slide features a silhouette of an electric car in the foreground, positioned on the right side. Behind it, two wind turbines are visible against a vibrant, orange-hued sky, suggesting a sunset or sunrise. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on sustainable energy and electric mobility.

Resumo Executivo

Ao longo desse *white paper*, serão utilizadas algumas expressões e termos técnicos, os quais listamos a seguir para facilitar a compreensão.

AC:	Alternating Current (Corrente Alternada)	MCS:	Megawatt Charging System (Sistema de Carregamento para Veículos Pesados)
AFC:	Alkaline Fuel Cell (Célula de Combustível Alcalina)	MI:	Motor de Indução (ou Motor Assíncrono)
BEV:	Battery Electric Vehicle (Veículo Elétrico a Bateria)	MHEV:	Mild Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Leve)
BESS:	Battery Energy Storage System (Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria)	MRC:	Motor de Relutância Comutada
CCS:	Combined Charging System (Sistema Combinado de Carregamento)	MSIPI:	Motor Síncrono com Ímã Permanente Interno
CHAdeMO:	Charge de Move (Protocolo japonês de carregamento rápido)	NMC:	Níquel-Manganês-Cobalto (composição de baterias de alta densidade energética)
DC Fast Charging:	Carregamento Rápido em Corrente Contínua	OCPP:	Open Charge Point Protocol
DMFC:	Direct Methanol Fuel Cell (Célula de Combustível de Metanol Direto)	PAFC:	Phosphoric Acid Fuel Cell (Célula de Combustível de Ácido Fosfórico)
ECCE:	Estrutura de Carregamento para Carros Elétricos	PEMFC:	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Célula de Combustível de Membrana de Troca de Prótons)
FCEV:	Fuel Cell Electric Vehicle (Veículo a Célula de Combustível)	PHEV:	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Plug-in)
FMS:	Fleet Management System (Sistema de Gestão de Frotas)	PMSM:	Permanent Magnet Synchronous Motor
HEV:	Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Completo)	SM-PMSM:	Surface Mount Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor com ímã na superfície)
IA:	Inteligência Artificial	SOFC:	Solid Oxide Fuel Cell (Célula de Combustível de Óxido Sólido)
IPMSM:	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor Síncrono com Ímã Permanente Interno)	SynRM:	Synchronous Reluctance Motor (Motor de Relutância Síncrona)
ISO 15118:	Protocolo de comunicação entre veículos elétricos e estações de recarga (inclui V2G)	Telemetria/IoT:	Monitoramento em tempo real de frotas e desempenho de baterias
LFP:	Lithium Iron Phosphate (Lítio-ferro-fosfato, tipo de bateria)	VC:	Veículo Convencional
MaaS:	Mobility as a Service	VE:	Veículo Elétrico
		V2G:	Vehicle-to-Grid (Intercâmbio de energia entre o veículo e a rede)

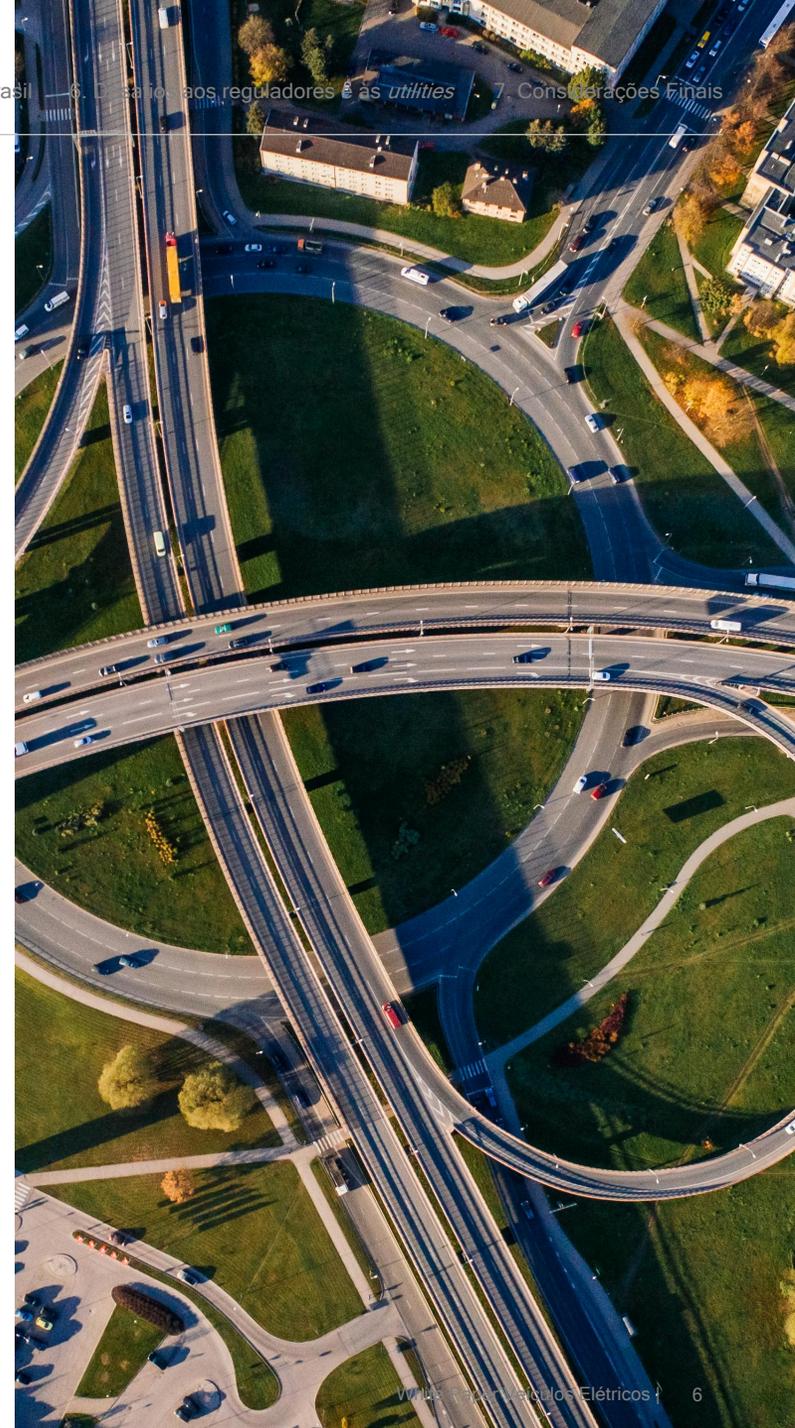
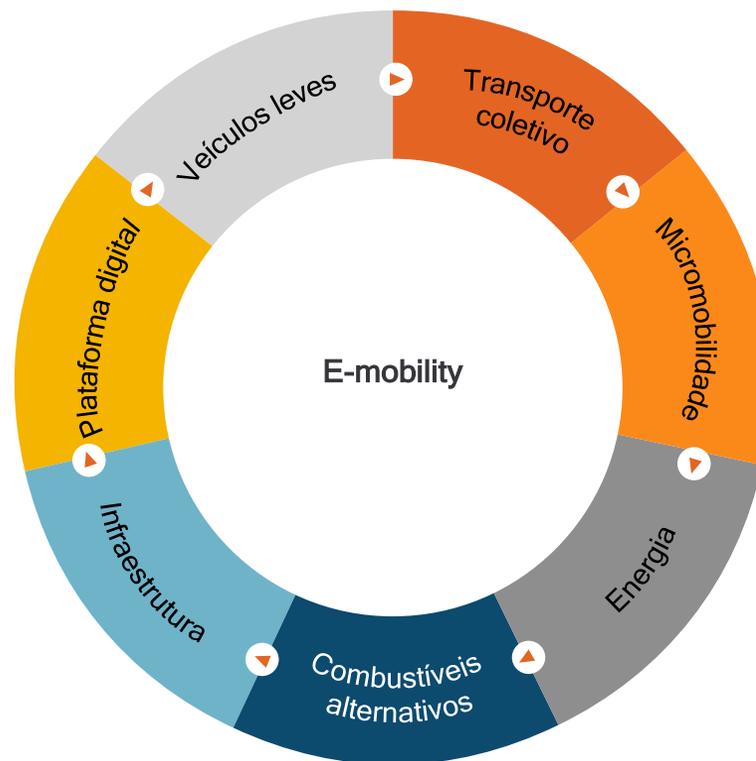
A mobilidade elétrica representa muito mais do que a simples substituição do motor à combustão por um motor elétrico.

Trata-se de um novo paradigma de transporte sustentável que envolve a eletrificação de diferentes modais – incluindo carros, ônibus, caminhões, motos, bicicletas e patinetes – articulados a uma infraestrutura inteligente de recarga, sistemas energéticos limpos e plataformas digitais de mobilidade.

Esse conceito abrange não apenas o veículo individual, mas também o transporte coletivo, a logística urbana de última milha, os serviços de compartilhamento (carsharing, ride-hailing), e iniciativas como o Mobility as a Service (MaaS).

A mobilidade elétrica está cada vez mais conectada à geração distribuída de energia, à digitalização dos sistemas de transporte e à descentralização das decisões de recarga e uso, permitindo soluções como o carregamento inteligente (smart charging) e o intercâmbio de energia com a rede (V2G).

Além disso, ela requer o envolvimento de múltiplos atores – poder público, indústria automotiva, empresas de energia e usuários finais – em um esforço coordenado de transformação urbana, ambiental e tecnológica.



O *turning point* da ascensão dos carros elétricos começou com a viabilidade das baterias de íon lítio e a difusão de carros com autonomia acima de 300 km.

A eletrificação do transporte avança de forma consistente: além dos carros, ônibus, vans e motocicletas elétricas ganham escala em centros urbanos.



Os Veículos Elétricos encontram-se no "Vale da Desilusão" do Ciclo Hype, fase que determina se uma tecnologia tende a ser disseminada ou não.

A imagem ao lado ilustra o denominado "Hype Cycle", um modelo gráfico desenvolvido pelo Instituto Gartner, para representar a maturidade, adoção e aplicação social de tecnologias específicas.

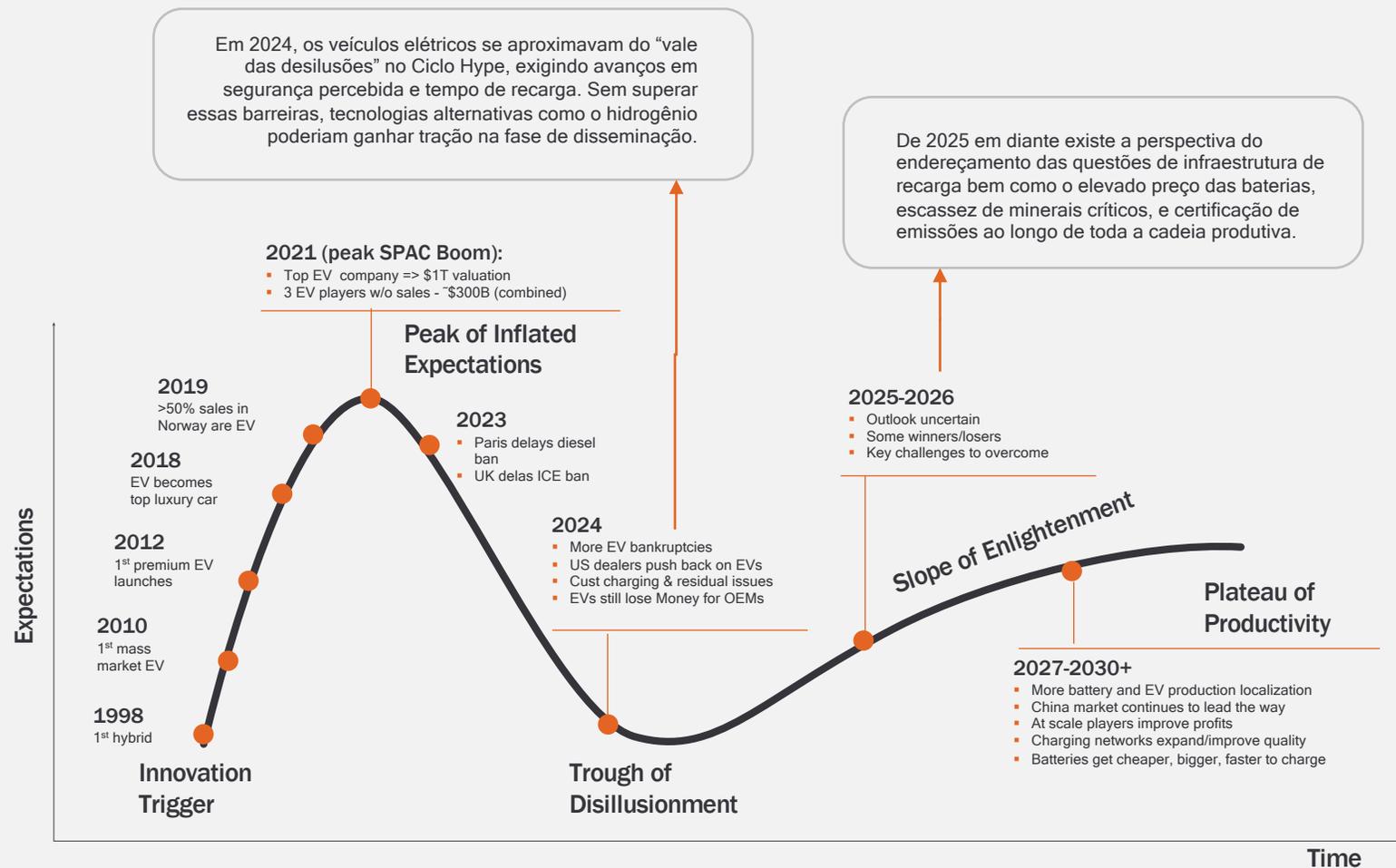
Gatilho da Inovação: Novas tecnologias surgem, capturando o interesse público e iniciando expectativas.

Pico de Expectativas Infladas: O entusiasmo atinge o ápice, com previsões otimistas e forte cobertura da mídia.

Vale da Desilusão: Limitações tornam-se claras, o interesse e investimento diminuem diante dos desafios reais.

Ladeira da Iluminação: Melhorias são feitas, a tecnologia amadurece e começa a integrar-se ao mercado.

Planalto de Produtividade: A tecnologia é amplamente aceita e adotada, com valor e utilidade bem estabelecidos.



A E-Mobility contribui diretamente para a redução das emissões e melhora da qualidade do ar nas cidades.

Apesar dos avanços, a autonomia e o custo de aquisição ainda são desafios importantes a serem enfrentados. Uma abordagem sistêmica – integrando veículos, infraestrutura, energia e plataformas digitais – é essencial para o sucesso da transição.

	Veículos Leves	Transporte Coletivo	Micromobilidade	Energia	Combustíveis Alternativos	Infraestrutura	Plataforma Digital
<p>Redução de Emissões</p>	<p>Substituem motores a combustão por elétricos, com zero emissão local e grande redução de CO₂ total, especialmente em matrizes limpas.</p>	<p>Altamente eficazes, pois substituem milhares de viagens individuais; ideais para metas climáticas de curto prazo.</p>	<p>Reduzem poluição urbana e ocupação viária, com impacto direto na qualidade do ar em curtas distâncias.</p>	<p>Fundamental ao fornecer energia limpa; eletrificação do transporte amplia a relevância das fontes renováveis.</p>	<p>Permitem descarbonização parcial ou total, desde que produzidos a partir de fontes renováveis; útil em modais difíceis de eletrificar.</p>	<p>Indiretamente promove emissões evitadas ao viabilizar o uso de veículos elétricos por meio da rede de recarga.</p>	<p>Facilita decisões sustentáveis com dados em tempo real, promovendo modos limpos e combinados de transporte.</p>
<p>Autonomia/ Alcance</p>	<p>Evoluiu nos últimos anos, com modelos superando 400 km, mas ainda limitada em relação à recarga rápida.</p>	<p>Autonomia moderada (200-300 km), suficiente para rotas urbanas; exige planejamento de recarga em grandes frotas.</p>	<p>Limitada a pequenas distâncias (30-100 km), ideal para última milha; suficiente para deslocamentos diários curtos.</p>	<p>Atua como facilitador da recarga inteligente, ajustando o fornecimento conforme a demanda e evitando picos.</p>	<p>Apresentam alta autonomia e reabastecimento rápido, o que favorece aplicações em transporte de carga e longa distância.</p>	<p>Define a viabilidade da autonomia: presença ou ausência de estações rápidas impacta diretamente o alcance útil dos veículos.</p>	<p>Auxilia o planejamento do trajeto com indicação precisa de autonomia restante, pontos de recarga e tempos estimados.</p>
<p>Custo de Aquisição</p>	<p>Ainda elevado, principalmente pela bateria, apesar de tendência de queda; principal barreira para consumidores.</p>	<p>Alto custo por unidade, mas compensado ao longo da vida útil por economia operacional e subsídios públicos.</p>	<p>Preço mais acessível, especialmente em versões compartilhadas; atrai usuários de baixa renda e jovens.</p>	<p>Impacta a conta do consumidor e o custo total de propriedade dos VEs; tarifas especiais podem mitigar.</p>	<p>Alta variabilidade: hidrogênio é caro, etanol é acessível; custos dependem da cadeia logística e do estágio da tecnologia.</p>	<p>Investimentos iniciais altos em eletropostos e reforço de rede, mas com economia de escala no médio prazo.</p>	<p>Digitalização tem custo baixo por usuário e alto impacto operacional; reduz necessidade de grandes estruturas físicas.</p>

O custo operacional dos veículos elétricos é inferior ao dos convencionais, favorecendo modelos econômicos e sustentáveis.

A infraestrutura de suporte é a espinha dorsal da eletromobilidade e precisa ser planejada de forma inclusiva e escalável. O custo de aquisição segue como barreira à adoção em massa, exigindo políticas públicas, estímulos e inovação tecnológica.

	Veículos Leves	Transporte Coletivo	Micromobilidade	Energia	Combustíveis Alternativos	Infraestrutura	Plataforma Digital
<p>Custo Operacional</p>	<p>Muito mais baixo que veículos a combustão: menor manutenção, energia mais barata e maior eficiência energética.</p>	<p>Custo por passageiro muito reduzido, principalmente pela economia em combustível e manutenção coletiva.</p>	<p>Extremamente baixo: consumo energético mínimo e manutenção simples; ideal para entregas e deslocamentos urbanos.</p>	<p>Permite flexibilizar a demanda e reduzir custos sistêmicos ao utilizar a recarga em horários fora de pico.</p>	<p>Variável: biocombustíveis como o etanol têm custo competitivo; hidrogênio ainda apresenta operação cara.</p>	<p>Infraestruturas eficientes permitem operação estável e confiável, com menor custo por recarga no longo prazo.</p>	<p>Automatiza gestão, evita desperdícios, reduz ociosidade e maximiza a eficiência da frota e dos ativos energéticos.</p>
<p>Infraestrutura de suporte</p>	<p>Requer pontos de recarga públicos e privados; wallbox residencial e AC/DC em vias públicas e centros comerciais.</p>	<p>Precisa de garagens com carregamento coletivo, pátios com gestão energética e acesso à energia em grande escala.</p>	<p>Infraestrutura leve: docas de bicicletas/patinetes, ciclovias e recarga descentralizada; pode ser instalada rapidamente.</p>	<p>Integração com smart grids, tarifação dinâmica e resposta à demanda são essenciais para uso eficiente da rede.</p>	<p>Hidrogênio demanda nova rede de produção, transporte e abastecimento; biocombustíveis usam estrutura já existente.</p>	<p>Papel central: eletropostos, conectores, upgrades na rede elétrica e integração digital são o alicerce da E-Mobility.</p>	<p>Interconecta veículos, eletropostos e operadores; essencial para a operacionalização fluida de todo o sistema.</p>
<p>Integração com Políticas Públicas</p>	<p>Essencial para incentivar a compra e criar um ambiente regulatório favorável, com metas de emissão e isenções.</p>	<p>Estratégico para cidades que buscam melhorar transporte e reduzir emissões; depende de subsídios e metas públicas.</p>	<p>Precisa de normas claras (velocidade, circulação, capacetes) e infraestrutura segura; integra bem com mobilidade ativa.</p>	<p>Tarifas dinâmicas e regulação de serviços auxiliares precisam ser desenvolvidas para acompanhar a eletromobilidade.</p>	<p>Programas como o Renovabio e políticas de hidrogênio verde são essenciais para garantir competitividade e sustentabilidade.</p>	<p>Demanda políticas de incentivo à instalação, padronização nacional e acesso equitativo em todo o território.</p>	<p>Pode ser usada por gestores para monitorar KPIs e implementar modelos como MaaS, integração tarifária e subsídios.</p>

A aceitação do usuário cresce, mas ainda depende da confiabilidade dos serviços e da experiência percebida.

A maturidade tecnológica é alta ou crescente em todos os modais, mas requer padronização e inovação contínua. O potencial de escalonamento da eletromobilidade é elevado, mas depende de políticas públicas, infraestrutura e conectividade.

	Veículos Leves	Transporte Coletivo	Micromobilidade	Energia	Combustíveis Alternativos	Infraestrutura	Plataforma Digital
<p>Aceitação do Usuário</p>	<p>Crescente, especialmente entre consumidores mais conscientes; ainda limitada por custo e infraestrutura.</p>	<p>Avança à medida que o usuário percebe conforto e melhora na qualidade do ar; depende da confiabilidade do serviço.</p>	<p>Adoção acelerada entre jovens e entregadores; baixa barreira de entrada e uso intuitivo via celular.</p>	<p>Indiretamente aceita quando o serviço funciona; usuários se beneficiam de forma transparente da integração.</p>	<p>Conhecida no Brasil via etanol, mas o hidrogênio ainda é pouco familiar; campanhas de informação serão necessárias.</p>	<p>Alta exigência por confiabilidade, disponibilidade e simplicidade; experiências ruins impactam toda a cadeia.</p>	<p>Muito bem aceita quando bem projetada: oferece controle, conveniência, personalização e integração multimodal.</p>
<p>Maturidade Tecnológica</p>	<p>Em fase de consolidação: desempenho confiável, mas com espaço para inovações em baterias e V2G.</p>	<p>Avançando rapidamente, com ônibus elétricos operacionais e tecnologias testadas em várias cidades do mundo.</p>	<p>Altamente madura; e-bikes e patinetes já amplamente utilizados com bom desempenho e confiabilidade.</p>	<p>Tecnologias de smart grid e resposta à demanda estão prontas, mas exigem padronização e coordenação.</p>	<p>Etanol é altamente maduro; hidrogênio ainda em estágio inicial de mercado, apesar do avanço em P&D.</p>	<p>Tecnologias comerciais já disponíveis, mas carecem de escala, padronização e interoperabilidade entre redes.</p>	<p>Muito madura e em rápida evolução, especialmente em integração com apps, IA, IoT e roteirização inteligente.</p>
<p>Potencial de Escalonamento</p>	<p>Muito alto, desde que infraestrutura e incentivos acompanhem; possível atingir milhões de usuários rapidamente.</p>	<p>Alto em áreas urbanas com grande densidade; políticas públicas podem escalar a conversão da frota.</p>	<p>Alto potencial por custo reduzido e capilaridade; ideal para centros urbanos e periferias.</p>	<p>Escalável por depender de software e sensores conectados; investimentos relativamente baixos por usuário.</p>	<p>Moderado a alto: biocombustíveis têm escala nacional; hidrogênio depende de nova infraestrutura e escala industrial.</p>	<p>Muito alto: redes de recarga podem crescer em função da demanda, desde que bem planejadas e com apoio regulatório.</p>	<p>Muito alto: plataformas digitais são replicáveis com baixo custo marginal e ampliam exponencialmente o alcance da mobilidade elétrica.</p>

Existe um risco significativo de baixa adoção de Mobilidade Elétrica no Brasil, perdendo a chance de aproveitar melhor o seu potencial de mercado.

Este *White Paper* explora as principais as barreiras à difusão da Mobilidade Elétrica no Brasil e as condições de contorno para superá-las. Também é apresentado um *roadmap* de soluções e explora tecnologias competidoras aos veículos elétricos, sinalizando a necessidade de abordagens integradas.

	Preço do veículo 	Manutenção 	Infraestrutura de carregamento 	Bateria 	Percepção de risco no uso 	Regulamentação 	Tecnologias concorrentes 	Nível de disseminação 
Vertentes para patamar baixo.	O preço dos veículos elétricos continua alto devido a tecnologias de bateria de última geração e a falta de economias de escala.	Os veículos elétricos requerem manutenção especializada, mantendo os custos relativamente altos.	Crescimento lento da infraestrutura, com lacunas especialmente em áreas rurais e menos desenvolvidas.	As baterias têm avanço mínimo, mantendo as preocupações com a autonomia e o tempo de carregamento.	Preocupações significativas com a segurança das baterias e autonomia em condições extremas.	Regulamentações estritas e normas de segurança impõem altos padrões para a fabricação de veículos elétricos.	Tecnologias alternativas, como hidrogênio ou biocombustíveis, competem fortemente com os veículos elétricos.	Baixo
Vertentes para patamar médio	O preço cai moderadamente com a melhoria das tecnologias de produção e aumento da competição.	A manutenção se torna mais fácil com a padronização das peças e aumento de técnicos qualificados.	Melhoria gradual na infraestrutura, com carregadores mais rápidos e maior cobertura.	Melhorias incrementais na capacidade das baterias e no tempo de carregamento.	A percepção de risco é reduzida à medida que mais dados de segurança se tornam disponíveis e a tecnologia é comprovada.	As regulamentações são equilibradas, incentivando a inovação, mas garantindo segurança e sustentabilidade.	Há uma competição saudável entre diferentes tecnologias, promovendo a diversificação do mercado.	Médio
Vertentes para patamar alto.	Inovações disruptivas e subsídios governamentais tornam os veículos elétricos tão acessíveis quanto os veículos tradicionais.	Manutenção raramente necessária devido ao design simplificado e à confiabilidade dos componentes elétricos.	Infraestrutura robusta e onipresente, com estações de carregamento rápido disponíveis amplamente.	As baterias têm alta densidade energética, longa vida útil e são recarregáveis rapidamente.	Preocupações significativas com a segurança das baterias e autonomia em condições extremas.	Regulamentações flexíveis facilitam a rápida adoção de veículos elétricos, mas podem levantar preocupações de segurança.	Veículos elétricos dominam o mercado, com poucos concorrentes viáveis.	Alto

Apesar da importância do Brasil como fabricante e mercado consumidor, cerca de 7% dos veículos licenciados em 2024 foram elétricos. Barreiras técnicas, econômicas e regulatórias ainda limitam a adoção no país.

1



A mobilidade elétrica está em um ponto de inflexão no Brasil.

Apesar de o país ocupar posição de destaque na indústria automobilística global, sua participação no mercado de veículos elétricos ainda é incipiente, refletindo uma adoção lenta frente a mercados como China e Europa.

2



O sucesso da mobilidade elétrica depende de um esforço coordenado.

Será necessário enfrentar barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, por meio de políticas públicas consistentes, incentivos ao consumidor final, desenvolvimento de infraestrutura de recarga e estímulo à produção nacional de componentes estratégicos como baterias.

3



A modernização regulatória é urgente.

Modelos tradicionais de remuneração das distribuidoras se mostram inadequados diante das novas demandas impostas pela eletrificação veicular. É fundamental avançar para metodologias que considerem receitas por serviços de plataforma, mecanismos de ajuste de desempenho e flexibilização tarifária.

4



Distribuidoras e reguladores precisam se reposicionar estrategicamente.

A transição energética é marcada por rápidas mudanças tecnológicas, e o tempo para adaptação está cada vez mais curto. Uma estratégia equivocada pode resultar em perdas econômicas e tecnológicas irreversíveis.

5



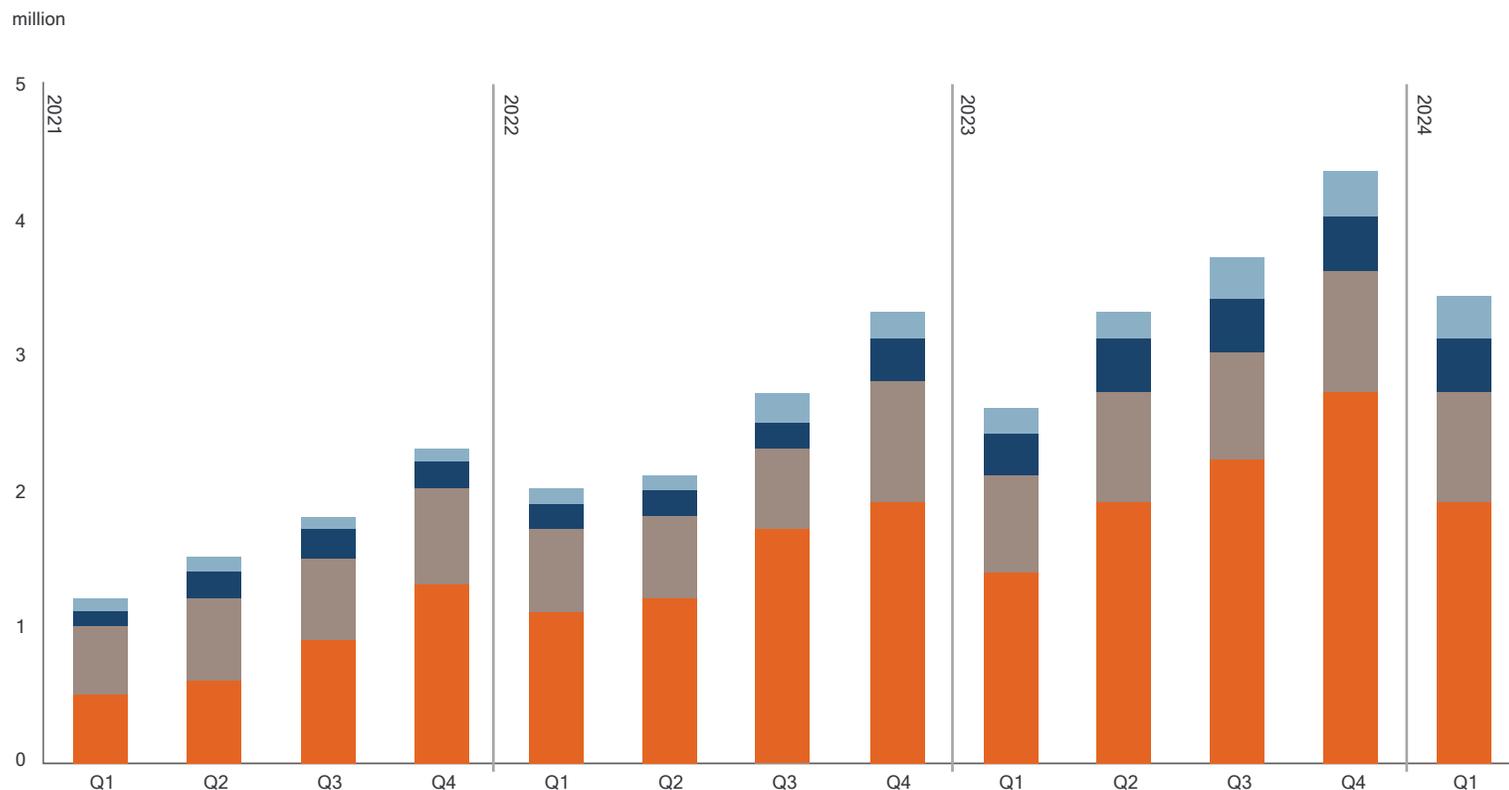
Há risco de o Brasil perder o "bonde da eletrificação".

Se não houver ação decisiva, o país pode comprometer a competitividade de sua indústria, perder oportunidades de descarbonização urbana e deixar de usufruir dos benefícios econômicos e ambientais da eletromobilidade.



Veículos Leves

No contexto internacional, mais de 26 milhões de carros elétricos estavam nas estradas em 2022. Em 2023, houve um crescimento de 14 milhões, totalizando uma frota mundial de 40 milhões veículos elétricos.



A eletrificação de veículos leves (automóveis e utilitários) avança rapidamente no mundo. Quase um em cada cinco carros novos vendidos globalmente em 2023 é elétrico, totalizando cerca de 14 milhões de unidades no ano - um aumento de 35% sobre 2022.

Esse crescimento robusto elevou a frota mundial de carros elétricos para 40 milhões. Entretanto, o mercado brasileiro ainda está aquém: apenas 4% dos carros licenciados no Brasil em 2023 eram elétricos, refletindo atraso na adoção em comparação com China, Europa e EUA.

Os veículos leves movidos à eletricidade oferecem importantes benefícios socioambientais. Eles não emitem poluentes locais durante o uso, melhorando a qualidade do ar urbano, além de reduzirem significativamente as emissões de gases de efeito estufa quando abastecidos em uma matriz limpa.

O menor nível de ruído e vibração aumenta o conforto nas cidades, e o custo por quilômetro rodado tende a ser inferior ao de veículos a combustão, dada a maior eficiência energética e menor necessidade de manutenção (não requerem óleo lubrificante e têm menos componentes móveis). Esses atributos contribuem para ganhos em saúde pública e economia de combustível, beneficiando usuários e sociedade.

As abordagens tecnológicas para os veículos elétricos estão em constante evolução e variam para atender à demanda por eficiência e redução de emissões.

Híbridos Leves (Mild Hybrid): usam um motor elétrico auxiliar para impulso em ultrapassagens, com o motor a combustão liderando em alta velocidade. Incluem sistema de recuperação de energia, alternador, circuito de 48V e bateria de íons de lítio.

Híbrido Completo (Full Hybrid): têm baterias maiores que os leves, sem precisar de carregamento externo. Isso melhora a eficiência e economiza combustível, com o carro funcionando em modo elétrico em baixas velocidades ou parado, e alimentando acessórios como ar-condicionado. A recuperação de energia, especialmente através de freios regenerativos que armazenam energia nas frenagens, reforça a eficiência.

Híbridos Plug-in (Plug-in Hybrid): combinam baterias grandes com carregamento externo, aumentando a autonomia elétrica e reduzindo emissões. Eles usam mais o motor elétrico, especialmente em velocidades até 100 km/h, com recargas eficientes permitindo maior uso elétrico e menor dependência do motor a combustão.

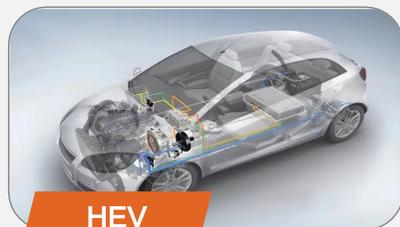
Elétricos (Battery Electric Vehicle - BEV): dispensam motores a combustão, favorecendo maiores baterias e zero emissões diretas. O impacto ambiental varia conforme a fonte de energia para recarga. Desafios incluem autonomia limitada, infraestrutura de carregamento escassa, custos iniciais elevados e falta de componentes. Espera-se que avanços tecnológicos e escalas de produção ampliadas reduzam custos e aprimorem a infraestrutura, tornando os elétricos mais acessíveis.

Veículo a célula combustível (Fuel Cell Vehicles): utilizam hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade, água e calor, com autonomia de 320 a 600 km. Eles oferecem zero emissões e alta eficiência, mas têm altos custos de fabricação, principalmente devido aos catalisadores de platina. Apesar da disponibilidade limitada de modelos, seu potencial futuro é promissor devido à economia, desempenho, segurança e reciclabilidade dos componentes.



MHEV

Híbridos Leves
(Mild Hybrid)



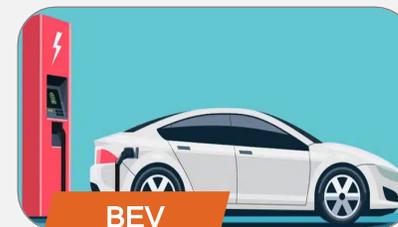
HEV

Híbrido Completo
(Full Hybrid)



PHEV

Híbridos Plug-in
(Plug-in Hybrid)



BEV

Battery Electric Vehicle
(Elétrico Completo)



FCEV

(Fuel Cell Electric Vehicle)

No contexto internacional, os Veículos Elétricos à Bateria (BEV) lideram as vendas, seguido Veículos Híbridos Plug-in (PHEV).

A frota global de veículos elétricos superou a marca de 40 milhões de unidades em circulação no mundo, refletindo o crescimento acelerado observado nos últimos anos.

Segundo dados do relatório Global EV Outlook 2024, publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA), esse número abrange tanto os veículos 100% elétricos quanto os híbridos plug-in.

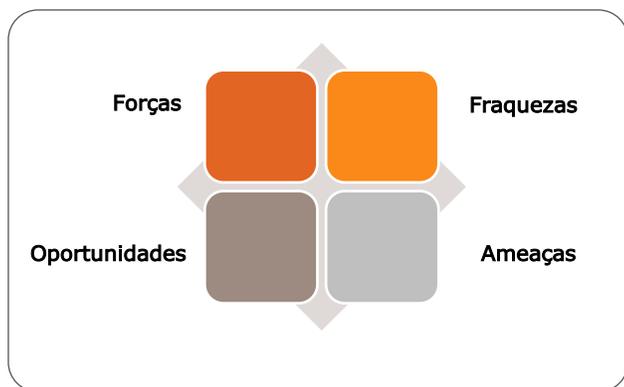
Esse avanço está diretamente relacionado à combinação de fatores como o aumento da autonomia dos modelos, redução dos custos de baterias, expansão da infraestrutura de recarga e políticas públicas voltadas à descarbonização dos transportes.

A tendência para os próximos anos é de que a proporção de veículos 100% elétricos (BEVs) continue crescendo em relação aos híbridos plug-in, consolidando-se como o principal caminho rumo à eletrificação da mobilidade.



Tipo de veículo	Número estimado de veículos	Percentual aproximado	Observações
Veículos Elétricos a Bateria (BEV)	25,2 milhões	63%	Propulsão 100% elétrica; maior participação na frota atual.
Veículos Híbridos Plug-in (PHEV)	15,2 milhões	38%	Combinação de motor elétrico e a combustão; crescente popularidade.
Veículos com Célula de Combustível (FCEV)	Menos de 400 mil	Menos de 1%	Tecnologia emergente; adoção limitada atualmente.

Matriz SWOT para cada uma das modalidades de veículos elétricos.



BEV: Battery Electric Vehicle (Elétrico Completo)



FCEV: Veículo a Célula de Combustível



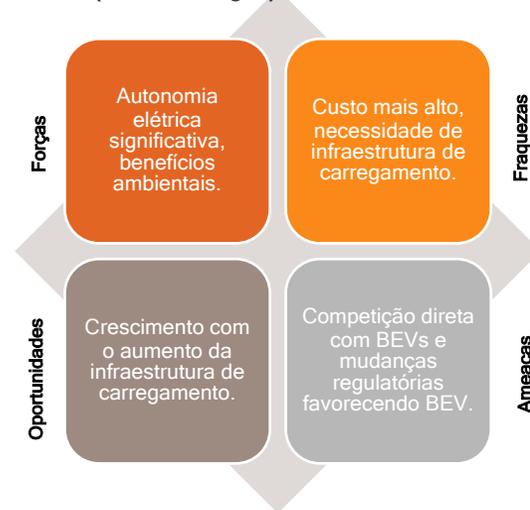
MHEV (Híbridos Leves)



HEV (Híbrido Completo)



PHEV (Híbridos Plug-in)



As células de combustível em carros elétricos representam uma abordagem tecnológica inovadora. Essas células convertem energia química diretamente em energia elétrica, água e calor, sem processos de combustão, oferecendo uma alternativa limpa aos combustíveis fósseis.

Células de Combustível de Hidrogênio (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cells): A tecnologia mais comum em carros elétricos, utilizando hidrogênio como combustível e oxigênio do ar como oxidante. Essas células são conhecidas pela sua eficiência e partida rápida em temperaturas baixas.

Células de Combustível de Óxido Sólido (SOFC): Operam em temperaturas muito altas (600 a 1000°C) e podem usar uma variedade de combustíveis, como gás natural e biogás. Embora atualmente menos comuns em veículos devido à sua alta temperatura operacional, oferecem alta eficiência e flexibilidade de combustível.

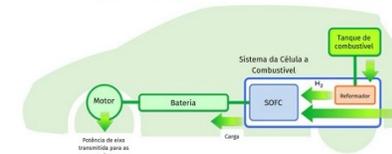
Células de Combustível Alcalinas (AFC): Utilizam eletrólitos alcalinos e são conhecidas pela sua eficiência. Historicamente, foram usadas em programas espaciais. No entanto, são menos comuns em veículos devido à sensibilidade do eletrólito à contaminação por CO₂.

Células de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC): Operam a uma temperatura mais alta que as PEMFC, o que permite certa tolerância à contaminação do combustível. No entanto, têm sido mais exploradas para aplicações estacionárias do que para mobilidade.

Células de Combustível de Metanol Direto (DMFC): Utilizam metanol como combustível diretamente na célula, sem necessidade de um reformador externo. Embora ofereçam a conveniência do uso de um líquido de armazenamento fácil, enfrentam desafios como menor eficiência energética e emissão de CO₂ se o metanol não for obtido de fontes renováveis.

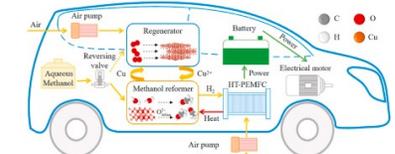
Sistemas Híbridos de Bateria e Célula de Combustível: Combinam células de combustível com baterias elétricas. As células de combustível podem gerar eletricidade constantemente para viagens longas, enquanto as baterias fornecem picos de energia para aceleração e podem ser recarregadas através da recuperação de energia durante a frenagem.

As tecnologias de célula combustível mais presentes em carros elétricos são a SOFC e a PEMFC.



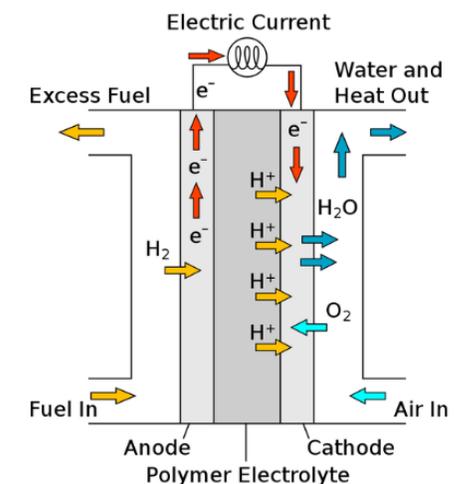
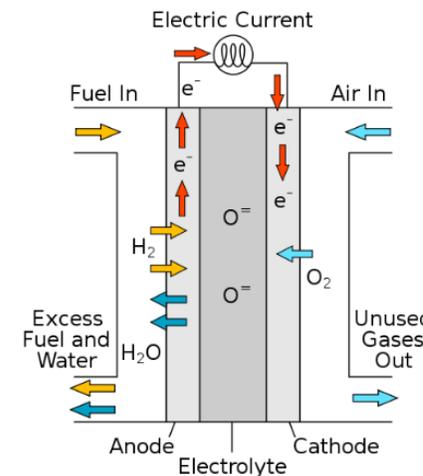
SOFC

Utiliza hidrogênio como combustível, onde o oxigênio do ar reage com íons de oxigênio transportados através de um eletrólito sólido, liberando elétrons e produzindo água e calor como subprodutos.



PEMFC

Usa hidrogênio que, ao passar pela membrana, libera prótons e elétrons; os elétrons geram corrente elétrica e, ao se recombinarem com prótons e oxigênio do ar, produzem água.



A tecnologia Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) é a mais madura entre as células combustíveis. Seu abastecimento usa hidrogênio gasoso sob alta pressão. Abaixo alguns modelos desses veículos.

O Toyota Mirai tem se destacado em vendas comparado a outros modelos de carros a célula de combustível. As vendas de veículos a célula de combustível como um todo atingiram um total de **18.025 unidades** nos EUA até fevereiro de 2024.



(a) Honda FCX Clarity:

Consumo de hidrogênio de cerca de 0,98 kg/100 km, potência de 134 cv.



(b) Hyundai Tucson/ix35 FC:

Gera uma potência de 136 cv, com um tempo de reabastecimento de hidrogênio de aproximadamente 5 minutos.



(c) Toyota Mirai I:

Produz 153 cv de potência e tem uma capacidade de tanque de hidrogênio de aproximadamente 5 kg.



(d) Honda Clarity FC:

Desenvolve até 174 cv e seu tempo de reabastecimento de hidrogênio é de aproximadamente 3 minutos.



(e) Hyundai Nexo:

Com uma potência de 161 cv, possui tecnologia de purificação do ar enquanto dirige.



(f) Mercedes Benz F-Cell:

Potência de cerca de 136 cv e pode armazenar cerca de 4 kg de hidrogênio.



(g) Chevrolet Equinox Fuel Cell:

Tem uma potência de 93 kW (aproximadamente 125 cv) e utiliza uma pilha de combustível de 4ª geração.

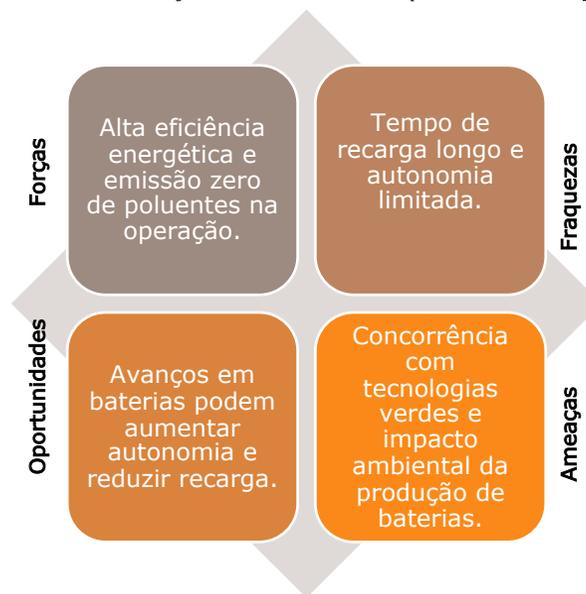


(h) Toyota Mirai II

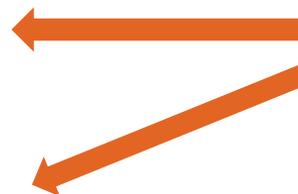
Aumenta a potência para 182 cv e apresenta uma nova arquitetura de célula de combustível mais compacta e eficiente.

Matriz SWOT comparando BEV e FCEV. O tempo de reabastecimento do FCEV (3 minutos) é a principal vantagem contra o tempo exigido de recarga do BEV (até 24h) dependendo do tipo de estação de recarga).

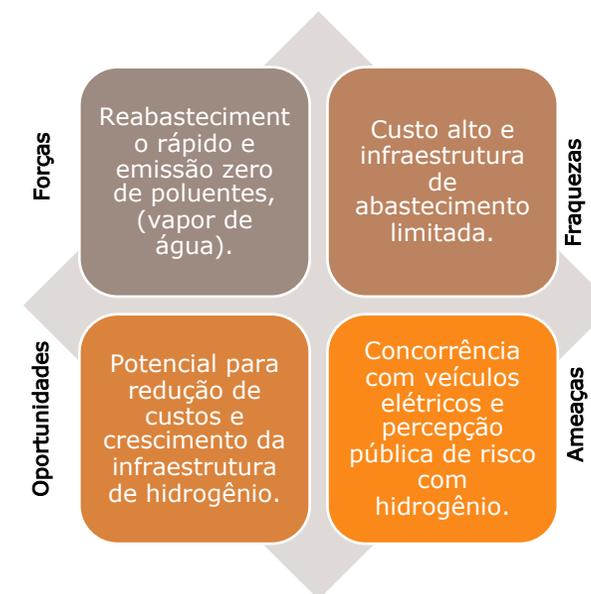
BEV: Battery Electric Vehicle (Elétrico Completo)



O tempo de reabastecimento do FCEV é o principal ofensor ao BEV.

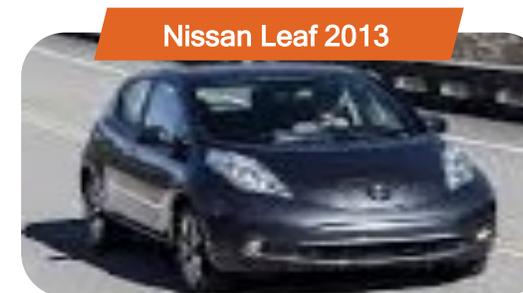


FCEV: Veículo a Célula de Combustível



Evoluções construtivas vêm ocorrendo desde o motor assíncrono ou de indução (MI) até os modelos com motor de relutância síncrona (SynRM).

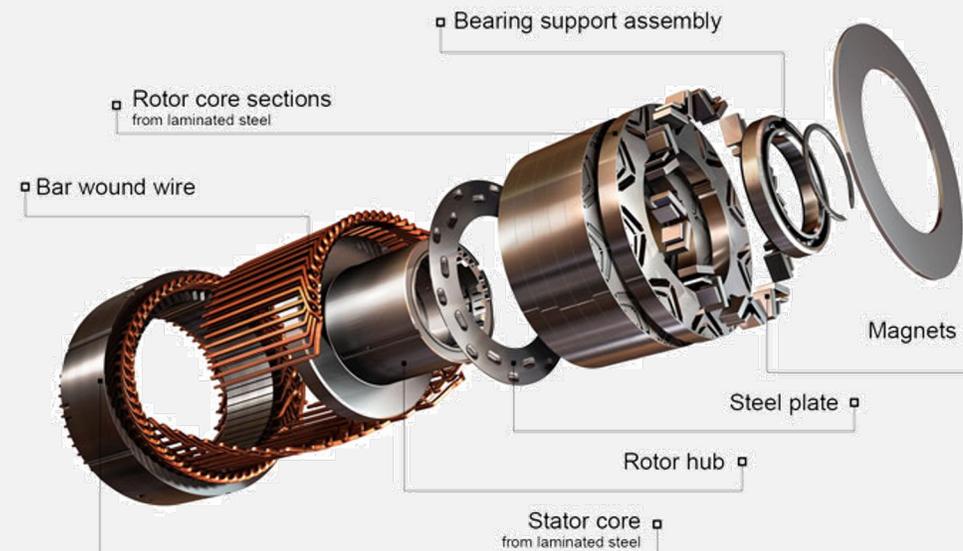
Tipo de Motor	Modelos de Carros Elétricos
Asynchronous or Induction Motor (IM)	Tesla Model S (versões iniciais), Tesla Model X (versões iniciais), Smart Electric Drive (modelos mais antigos)
Internal Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM)	Nissan Leaf, Chevrolet Bolt EV, BMW i3, Tesla Model 3, Tesla Model Y
Internal Permanent Magnet Synchronous Motor with Rotor Cage (Line-start IPMSM)	Híbridos com versões modificadas para arranque e assistência (modelos específicos não listados)
Surface Permanent Magnet Synchronous Motor (SM-PMSM)	Hyundai Kona Electric, Kia Soul EV, Jaguar I-PACE
Synchronous Reluctance Motor (SynRM)	Fiat 500e (alguns modelos), Protótipos e modelos experimentais



Entre 2010 e 2017, os motores Permanent Magnet Brushless Motor (PMSM) predominaram no mercado. No entanto, a partir de 2017, testemunhou-se um avanço impressionante de novos modelos de motores elétricos.

Tipo de Motor	Vantagens	Desvantagens	Aplicação em VE (Exemplos)
MI (Motor de Indução)	Simplicidade, robustez	CPSR limitado, baixa eficiência em alta velocidade	Tesla Model S 2017
MSRE (Motor Síncrono de Rotor Enrolado)	Controle do campo magnético no rotor	Manutenção de anéis deslizantes, relação torque/potência-volume menos eficiente	Menos comum em VE modernos
MFAP (Motor de Fluxo Axial com Ímã Permanente)	Eficiente para baixa potência	Não ideal para alta potência devido a forças axiais desbalanceadas em grandes diâmetros	Veículos de baixa potência (poucos exemplos específicos em VE)
MRC (Motor de Relutância Comutada)	Custo menor sem ímãs permanentes	Maior tamanho do conversor de potência, ruído audível, baixo fator de potência	Menos comum em VE modernos
MSIPI (Motor Síncrono com Ímã Permanente Interno)	Alta eficiência, boa CPSR, densidade de potência	Custo dos materiais de ímã permanente (terricolas raras)	Preferido pela maioria dos fabricantes de VE

Permanent magnet synchronous motor (PMSM)



Evoluções construtivas (da esquerda para a direita): motor assíncrono ou de indução (MI), motor síncrono com ímã permanente interno (MSIPI), motores síncronos com ímã permanente interno com gaiola de rotor (MSIPI de arranque direto), motor síncrono com ímã permanente na superfície (SM-PMSM) motor de relutância síncrona (SynRM).

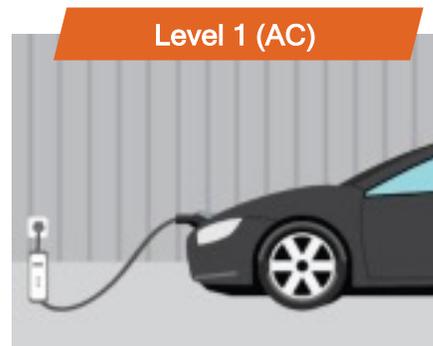


As tecnologias de carregamento mais comuns são o Nível 2 (AC); o DC Fast Charging para carregamentos rápidos em viagens longas e o Carregamento de Nível 1 (AC) sendo utilizado para carregamentos lentos e convenientes em casa.

Carregadores de Nível 1: Esses carregadores usam uma conexão de 120 volts AC (corrente alternada) e são normalmente usados em ambientes residenciais. Eles oferecem uma carga lenta, adicionando cerca de 3 a 5 milhas de alcance por hora de carga.

Carregadores de Nível 2: Utilizam uma conexão de 240 volts AC, semelhante à exigida por grandes eletrodomésticos. São mais rápidos que os carregadores de Nível 1 e podem ser encontrados em residências, locais de trabalho e locais públicos. Eles adicionam aproximadamente 10 a 20 milhas de alcance por hora de carga.

Carregadores de Corrente Contínua de Alta Velocidade (CCCV ou DCFC): Também conhecidos como carregadores rápidos, esses sistemas usam corrente contínua (DC) e podem fornecer cerca de 80% de carga em 20 a 30 minutos, tornando-os ideais para uso em rodovias e áreas de tráfego intenso. São significativamente mais rápidos que os carregadores de Nível 1 e Nível 2.



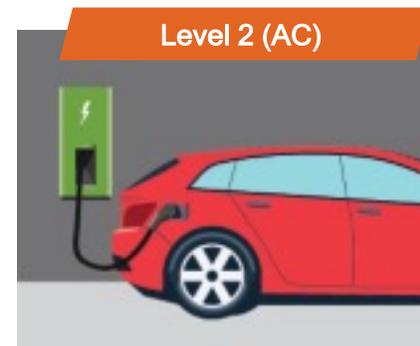
VOLTAGE:
120V 1-Phase AC

AMPS:
12-16 Amps

CHARGING LOAD:
1.4-1.9 kW

CHARGING TIME:
3-5 Miles per hour

O custo é geralmente o mais baixo, pois utiliza a infraestrutura elétrica existente em casa sem necessidade de instalação adicional. O custo dependerá da tarifa de eletricidade residencial, que varia por localização, mas geralmente está na faixa de **\$0,10 a \$0,35 por kWh nos EUA.**



VOLTAGE:
208V or 240V 1-Phase AC

AMPS:
12-80 Amps

CHARGING LOAD:
2.5-19.2 kW

CHARGING TIME:
12-60 Miles per hour

A instalação de um carregador de Nível 2 em casa pode custar entre \$500 e \$2.000, além do custo da eletricidade. Novamente, as taxas de eletricidade variam, mas o custo por carga será maior do que o do Nível 1 devido à maior velocidade de carregamento. Em estações públicas, o custo pode ser por hora de uso ou por kWh, e algumas redes de carregamento podem exigir uma assinatura mensal.



VOLTAGE:
208V or 480V 3-Phase AC

AMPS:
>100 Amps

CHARGING LOAD:
50-350 kW

CHARGING TIME:
10%-80% in - 30 minutes

O custo por carga em estações públicas de DC Fast Charging é tipicamente mais alto devido à tecnologia mais avançada e à velocidade de carregamento rápido. Os preços podem variar significativamente, mas as taxas estão frequentemente na faixa de \$0,25 a \$0,69 por kWh ou por minuto de carregamento, dependendo do operador da estação.

O Brasil é o oitavo maior fabricante de veículos do mundo e o quarto maior mercado consumidor. Em 2024, as vendas de veículos elétricos aumentaram 85%.

Em 2024, os híbridos leves (MHEV) lideraram as vendas de eletrificados no Brasil, com 36% de participação, seguidos pelos veículos 100% elétricos (BEV) com 30%, impulsionados por modelos como BYD Dolphin e Kwid E-Tech.

Os híbridos completos (HEV) representaram 18%, enquanto os híbridos plug-in (PHEV) ficaram com 15%, com destaque para o Haval H6 PHEV.

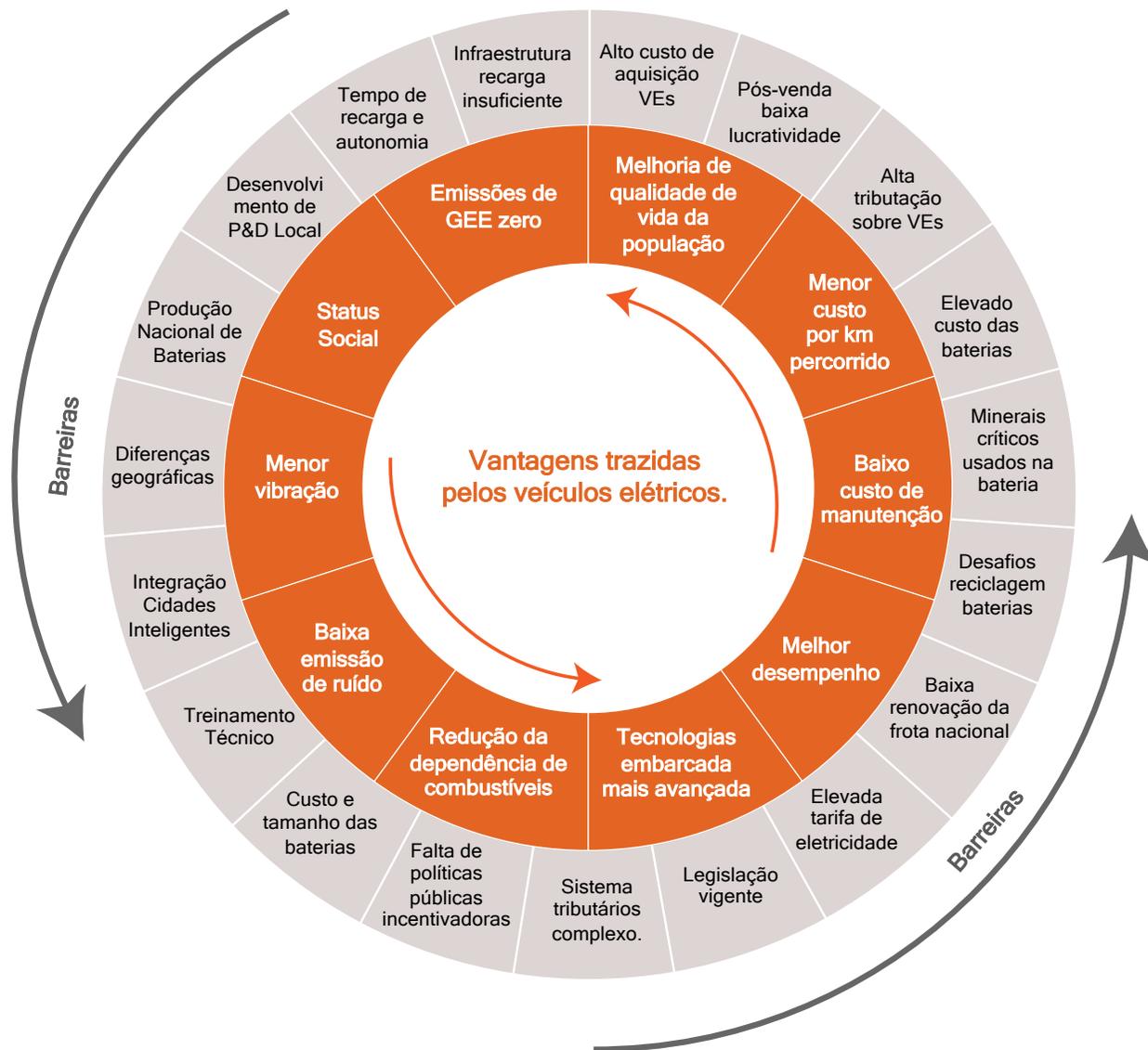
Já os FCEVs (célula a combustível) seguem fora do mercado comercial, com menos de 0,1%.

O cenário brasileiro reflete uma transição em curso, combinando múltiplas tecnologias conforme infraestrutura, custo e perfil de uso.

Categoria	Sigla	Descrição Resumida	Participação Vendas Brasil (%)	Exemplos de modelos vendidos no Brasil
Híbrido Leve	MHEV	Motor elétrico auxiliar, sem propulsão 100% elétrica	36%	Fiat Pulse Hybrid, Audi A4 MHEV, Jeep Compass Turbo 200
Híbrido Completo	HEV	Motor elétrico capaz de movimentar o carro em baixas velocidades	18%	Toyota Corolla Hybrid, Honda Accord Hybrid
Híbrido Plug-in	PHEV	Bateria recarregável externamente, uso combinado com combustão	15%	GWM Haval H6 PHEV, Volvo XC60 Recharge
100% Elétrico (Bateria)	BEV	Propulsão totalmente elétrica com baterias de alta capacidade	30%	BYD Dolphin, Renault Kwid E-Tech, Volvo EX30, JAC e-JS1
Célula a combustível (hidrogênio)	FCEV	Eletricidade gerada a bordo com hidrogênio (não vendido em escala)	<0,1%	Sem vendas comerciais no Brasil; apenas testes e protótipos

Apesar do avanço recente, o Brasil ainda está abaixo do seu potencial em mobilidade elétrica, com VEs representando menos de 7% das vendas. Superar barreiras estruturais e regulatórias é essencial para acelerar essa transição.

- 1 Baixa nacionalização de componentes (baterias, motores, eletrônica).
- 2 Predomínio de híbridos leves (MHEV) com baixo impacto ambiental.
- 3 Infraestrutura de recarga ainda insuficiente e mal distribuída.
- 4 Déficit de mão de obra qualificada para manutenção de VEs.
- 5 Regulação desatualizada (carregadores, V2G, baterias, serviços).
- 6 Ausência de metas nacionais claras de eletrificação veicular.
- 7 Pouco estímulo à produção local de BEVs acessíveis.
- 8 Risco de dependência tecnológica externa sem estratégia industrial.
- 9 Falta de incentivos diretos ao consumidor final (bônus, isenção de IPVA nacional).
- 10 Baixa capilaridade da oferta fora dos grandes centros urbanos.





Mobilidade elétrica pública

Segundo projeções da IEA, os ônibus elétricos devem representar 30% dos ônibus vendidos globalmente até 2035 com base nas políticas atuais.

A eletrificação do transporte coletivo urbano, em especial de ônibus, desponta como estratégia chave para cidades sustentáveis. Ônibus elétricos eliminam emissões locais de poluentes e diminuem significativamente CO₂ por passageiro, melhorando a qualidade do ar e a saúde nas metrópoles.

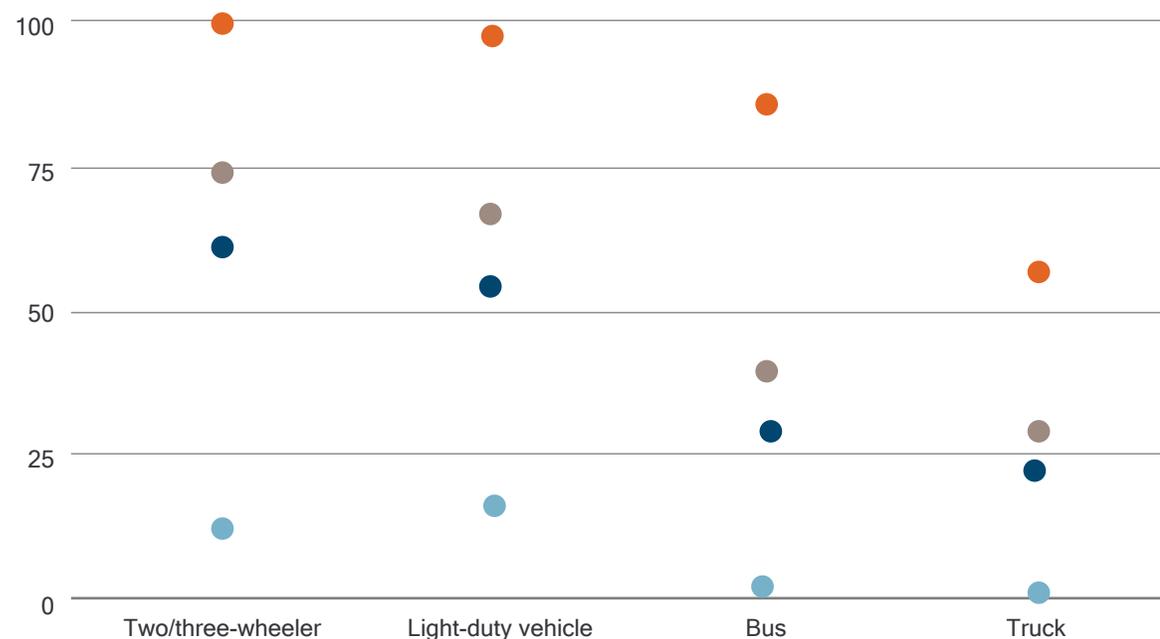
Também reduzem ruídos urbanos, trazendo mais conforto aos passageiros e comunidades. Cada ônibus elétrico em operação pode substituir veículos individuais e evitar toneladas de CO₂ ao longo de sua vida útil, contribuindo para metas climáticas de curto prazo no setor de transportes públicos.

Essas vantagens posicionam a eletrificação de frotas coletivas como política prioritária para cumprir acordos como o Acordo de Paris, que requer corte de emissões dos sistemas de transporte coletivo.

O avanço global dos ônibus elétricos tem se acelerado. Em 2023, quase 50 mil ônibus elétricos foram vendidos no mundo, representando 3% dos ônibus novos no ano.

O estoque mundial chegou a 635 mil ônibus elétricos em circulação, liderado pela China - país que adotou políticas precoces para eletrificar suas frotas urbanas. Já em 2020, a China respondia por ~90% das vendas globais de ônibus elétricos; em 2023 ainda concentrou 60% das vendas, apesar do crescimento de outros mercados.

Electric vehicle sales share by mode and scenario, 2035
%



IEA License: CC BY 4.0

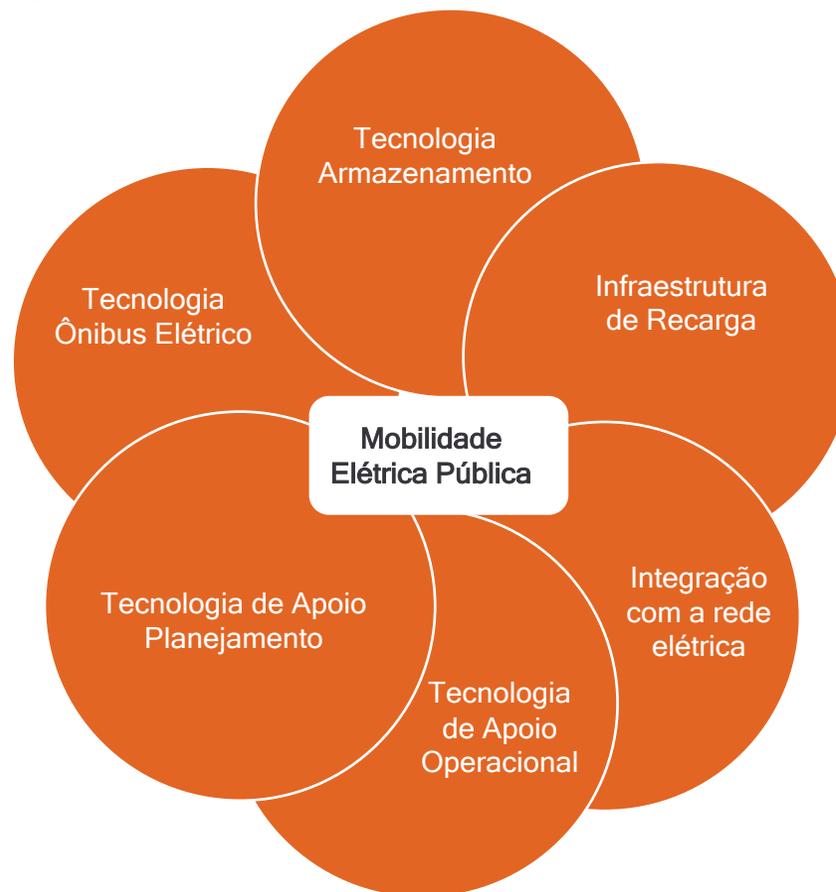


O êxito da Mobilidade Elétrica Pública exige uma abordagem sistêmica envolvendo integração entre diferentes tecnologias e infraestruturas.

Tecnologia Ônibus Elétrico: Os ônibus elétricos utilizam motores movidos a bateria ou célula de combustível, eliminando emissões locais e reduzindo o ruído urbano. Eles são ideais para melhorar a qualidade do ar e tornar o transporte público mais sustentável

Tecnologia de Armazenamento: As baterias, como as de lítio-ferro-fosfato (LFP) e NMC, armazenam a energia que move os ônibus elétricos. São determinantes para a autonomia, custo e segurança dos veículos, e sua evolução tecnológica é essencial para a ampliação da frota

Infraestrutura de Recarga: Estações de carregamento são essenciais para garantir a operação contínua dos ônibus. Podem ser instaladas em pátios, terminais ou pontos estratégicos, utilizando tecnologias como carregadores rápidos ou pantógrafos automáticos.



Integração com a Rede Elétrica: A mobilidade elétrica depende de uma boa articulação com o sistema elétrico. Soluções como o carregamento inteligente (smart charging) e o uso de energia solar contribuem para uma operação mais econômica e sustentável.

Tecnologia de Apoio Operacional: Sistemas de telemetria, gestão de frotas e inteligência artificial monitoram o desempenho dos veículos em tempo real. Eles otimizam rotas, programam recargas e ajudam a prevenir falhas, aumentando a eficiência da operação.

Tecnologia de Apoio ao Planejamento: Ferramentas digitais de planejamento e plataformas integradas como o MaaS (Mobility as a Service) permitem que o transporte elétrico público se conecte a outros modais, atendendo melhor às necessidades da população e das cidade.

A Mobilidade Elétrica Pública envolve diferentes tecnologias de motores e baterias. O Aumento da autonomia e a reciclagem são os principais desafios.

Os ônibus elétricos são a espinha dorsal da mobilidade elétrica pública. Utilizam motores elétricos e sistemas de controle avançados para oferecer transporte urbano de baixa emissão. As principais variantes são:

- BEV (Battery Electric Bus): Recarregável via rede elétrica.
- FCEV (Fuel Cell Electric Bus): Utiliza hidrogênio como fonte de energia.
- Trolebus: Alimentado por rede aérea

Esses veículos reduzem ruídos urbanos, poluição local e proporcionam maior conforto aos passageiros. A autonomia atual varia de 200 a 350 km, dependendo do modelo e da rota.

Por sua vez, a bateria é o coração do ônibus elétrico. Os tipos mais comuns são:

- **Lítio-ferro-fosfato (LFP):** Alta durabilidade e segurança térmica.
- **NMC (Níquel-Manganês-Cobalto):** Maior densidade energética, ideal para longas autonomias. Essas baterias impactam diretamente o custo, o desempenho e a viabilidade operacional.
- Além disso, tecnologias híbridas com ultracapacitores estão sendo testadas para melhorar frenagens regenerativas. O desafio está na reciclagem e na produção sustentável, além da escassez de minerais críticos.

Tecnologia Ônibus	Descrição
BEV - Battery Electric Bus	Ônibus 100% elétrico com baterias recarregáveis. Sem motor a combustão.
FCEV - Fuel Cell Bus	Usa hidrogênio e célula combustível (como PEMFC) para gerar eletricidade.
Plug-in Hybrid Bus (PHEV)	Combina motor elétrico e motor a combustão; pode rodar curtas distâncias 100% elétrico.
Trolebus	Alimentado por rede elétrica aérea. Comum em São Paulo e outros centros urbanos.

Tecnologia Bateria	Descrição
Íon de Lítio (Li-ion)	Alta densidade energética, maior vida útil, padrão atual em ônibus BEV.
LFP (Fosfato de Ferro-Lítio)	Mais seguras e duráveis; usadas em ônibus BYD, por exemplo.
NMC (Níquel-Manganês-Cobalto)	Mais leve, maior densidade, porém mais cara. Usada em aplicações premium.
Ultracapacitores	Armazenam e liberam energia rapidamente. Auxiliam em acelerações e frenagens.

A infraestrutura de recarga é essencial para garantir a operação contínua dos ônibus elétricos. Ela precisa ser adaptada às necessidades operacionais e ao tipo de veículo.

As principais tecnologias incluem:

Carregadores AC (Nível 2): Usados em recarga lenta durante a noite, normalmente em garagens de pátio.

DC Fast Charging: Estações de recarga rápida localizadas em terminais ou pontos estratégicos da cidade.

Megawatt Charging System (MCS): Em desenvolvimento para veículos pesados, permitirá recargas ultrarrápidas. Carregamento Pantógrafo: Sistema automatizado acoplado no teto do ônibus, utilizado em terminais.

Battery Swapping: Troca rápida de baterias descarregadas por baterias já carregadas, prática testada em larga escala na China

Smart Charging: Otimiza o carregamento com base na demanda e no preço da energia, evitando picos de consumo.

V2G (Vehicle-to-Grid): Permite que veículos forneçam energia de volta à rede elétrica em momentos de alta demanda.

Geração Distribuída e BESS (Battery Energy Storage Systems): Pátios com painéis solares acompanhados de armazenamento de energia para uso posterior durante as recargas.

Infraestrutura de recarga	Descrição
Carregadores AC (Nível 2)	Recarga noturna em garagens de pátio.
DC Fast Charging	Recarga rápida em terminais ou pontos estratégicos.
Megawatt Charging System (MCS)	Em desenvolvimento para ônibus e caminhões pesados.
Carregamento Pantógrafo	Sistema automatizado em pontos fixos (ex: terminais).
Battery Swapping	Substituição rápida de baterias (China testa em ônibus).

Integração com a rede	Descrição
Smart Charging (carregamento inteligente)	Otimiza tempo e custo da recarga com base na demanda e tarifa.
V2G (Vehicle-to-Grid)	Veículos como fontes de energia reversa para a rede elétrica.
Geração Distribuída (ex: solar fotovoltaica)	Integração com fontes limpas nos pátios de carregamento.
Sistemas de Armazenamento Estacionário (BESS)	Armazenam energia localmente para uso posterior na recarga.

As tecnologias embarcadas e de gestão são essenciais para a confiabilidade e eficiência da operação dos ônibus elétricos.

Entre a tecnologia operacional e de planejamento em Mobilidade Elétrica Pública, destacam-se:

Telemetria e IoT embarcado: Permite monitoramento contínuo da bateria, localização, falhas e desempenho dos veículos.

Sistemas de Gestão de Frotas (FMS): Software que organiza rotas, horários de recarga e disponibilidade dos veículos.

Plataformas MaaS: Integram ônibus a outros modais (como metrô, bicicleta, VLT) via aplicativos e plataformas digitais.

IA e Machine Learning: Aplicadas para previsão de falhas, otimização de rotas e manutenção preditiva com base em dados históricos.

Por sua vez, os padrões e protocolos garantem a interoperabilidade e a expansão organizada da eletromobilidade pública:

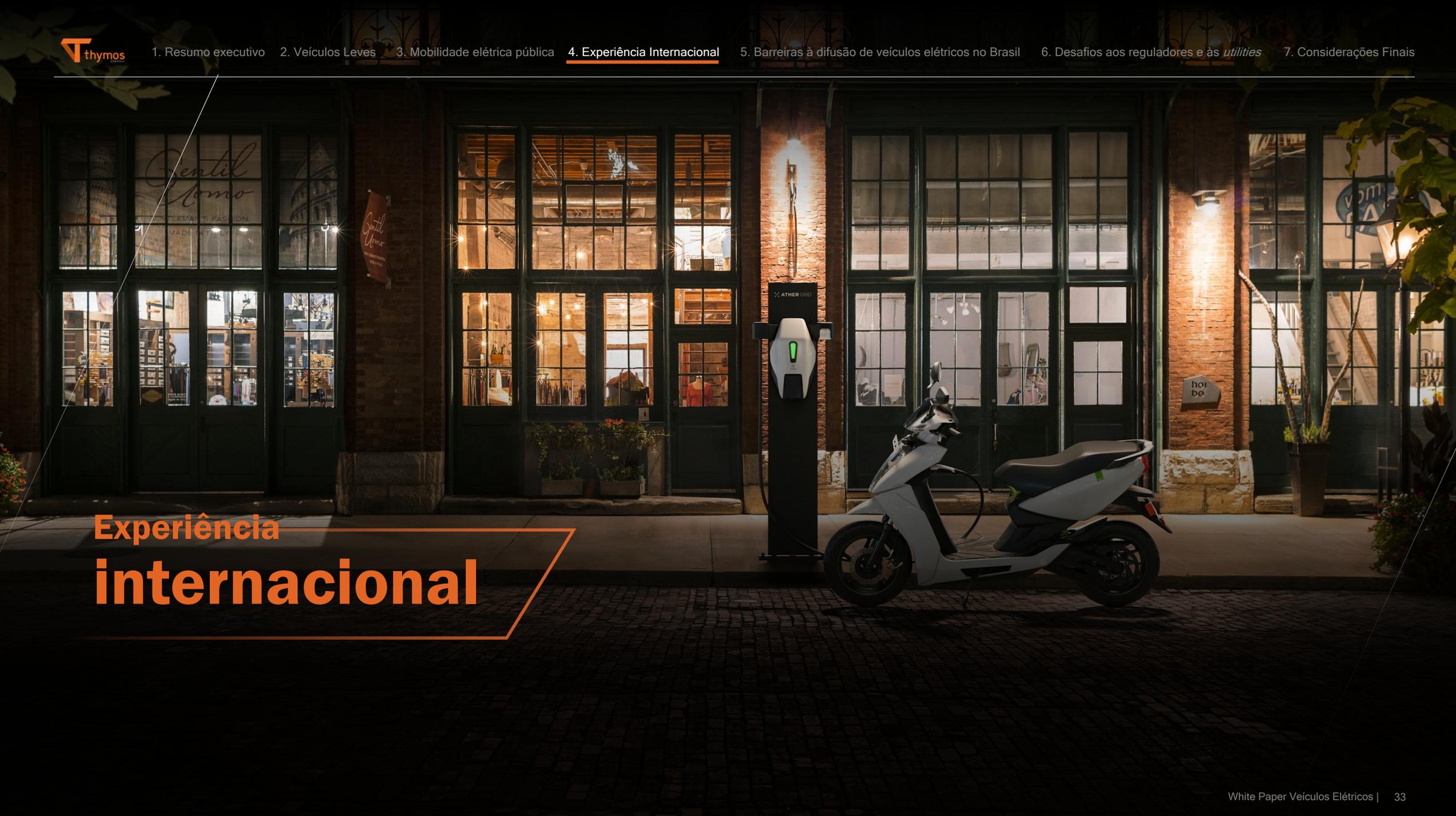
OCPP (Open Charge Point Protocol): Permite que diferentes marcas de carregadores e sistemas se comuniquem.

ISO 15118: Define a comunicação entre veículos e infraestrutura de recarga, incluindo recursos como V2G.

Plug Types (CCS, CHAdeMO): São os tipos de conectores utilizados na recarga, e sua padronização garante compatibilidade entre veículos e pontos de recarga.'

Tecnologia Operacional	Descrição
Telemetria e IoT embarcado	Monitoramento em tempo real de performance, bateria, localização, etc.
Sistemas de Gestão de Frotas (FMS)	Planejamento de rotas, recargas e escalonamento de veículos.
Plataformas MaaS	Integração com transporte coletivo, apps e modais diversos.
IA e Machine Learning	Otimização de rotas, previsão de falhas e planejamento de manutenção.

Tecnologia no Planejamento	Descrição
OCPP (Open Charge Point Protocol)	Permite interoperabilidade entre carregadores e sistemas.
ISO 15118	Comunicação entre veículos e carregadores (inclui V2G).
Plug Types (CCS, CHAdeMO)	Padrões de conectores elétricos utilizados.



Experiência internacional

China e Alemanha adotam políticas nacionais robustas e coordenadas para eletrificação do transporte coletivo. O Brasil ainda depende de iniciativas locais e programas pontuais, com ausência de metas nacionais claras e infraestrutura concentrada em poucas regiões.



Critério	 Brasil	 China	 Alemanha	 Estados Unidos
Meta nacional para ônibus elétricos	Não existe meta nacional consolidada; avanços pontuais (ex: PAC, cidades como SP, Salvador).	Nacional e rigorosa: 100% eletrificação em cidades-chave; 20% de veículos novos em 2025.	Europa como bloco prevê banimento de ICE até 2035; ônibus incluídos em metas locais.	Metas estaduais. Ex: Califórnia exige 100% de ônibus de emissão zero até 2040.
Financiamento e subsídios	PAC Seleções: financiamento federal parcial; incentivos locais (isenção de IPVA/IPI).	Forte subsídio estatal direto à aquisição, infraestrutura e P&D.	Subsídios diretos por veículo + isenção de impostos sobre veículos limpos.	Créditos federais (ex. US\$ 5.000) e estaduais; recursos do Inflation Reduction Act.
Infraestrutura de recarga	Expansão concentrada no Sudeste; projetos locais com Enel X, BYD etc.	Infraestrutura ampla, estatal, altamente padronizada.	Infraestrutura pública com alta densidade e interoperabilidade.	Expansão com apoio de empresas privadas e utilitárias; redes como ChargePoint, Electrify America.
Participação em coalizões	Participa da iniciativa ZEBRA (via cidades como SP, Salvador, Porto Alegre).	Ativa na ONU, ADB, e planos internos com BYD liderando.	Forte presença no European Green Deal e Clean Bus Europe Platform.	Alianças locais (CALSTART, ZEBRA), além de incentivos federais à produção e uso.



A comparação entre cidades mostra que Shenzhen e Santiago avançaram de forma coordenada com apoio nacional e subsídios diretos. São Paulo lidera na América Latina com metas legais ambiciosas, mas enfrenta desafios operacionais e financeiros; já Buenos Aires ainda está em fase piloto, com políticas em estágio inicial.

Critério	São Paulo (BR)	Santiago (CL)	Shenzhen (CN)	Buenos Aires (AR)
Meta de eletrificação da frota	100% até 2038 (Lei 16.802/2018); 2.600 ônibus elétricos até 2024.	100% da frota até 2040 (programa nacional).	Meta já alcançada: 100% da frota (>6.000) é elétrica desde 2017.	Piloto inicial; ainda sem meta formal estabelecida.
Instrumentos regulatórios	Regulamentação específica via SPTrans; contratação por desempenho energético.	Leis de transporte sustentável com metas escalonadas e tarifas reguladas.	Plano Nacional chinês + gestão local integrada (transporte e energia).	Projetos pilotos vinculados à renovação de frota e contratos de operação.
Modelos de financiamento	Parceria público-privada com modelo de subvenção parcial (C40).	Apoio estatal, tarifa subsidiada, importação direta dos ônibus da China.	Subsídio integral do governo local e central (ônibus, baterias e estações de recarga).	Financiamento piloto com apoio de programas externos (ex. ZEBRA).
Parcerias com fabricantes	Eletra, BYD, Caio, Enel X, Scania, TEVX; produção local e importação.	BYD (montadora com presença local); apoio de distribuidoras.	BYD, NJGD, fabricantes locais; integração vertical.	Yutong, fabricantes chineses e locais.

O Chile possui a maior frota da América Latina, com cerca de 2.600 ônibus elétricos, seguido da Colômbia (1.700). O Brasil possui cerca de 1.000 ônibus elétricos em operação em 18 municípios.

Vários países europeus atingiram participações acima de 20% de ônibus elétricos nas vendas recentes, e nações como Noruega e Bélgica superaram. Esse impulso inicial chinês e europeu mostra que, com incentivos e produção local, a transição nos transportes coletivos é viável e traz ganhos em escala.

A América Latina começa a despontar nesse cenário, impulsionada por iniciativas internacionais (C40, Parceria ZEBRA) e esforços locais. Cidades latino-americanas já implantaram perto de 6.500 ônibus elétricos em suas frotas somadas.

O Chile, por exemplo, possui a maior frota da região, com 2.600 ônibus elétricos operando em 7 cidades. No Brasil, diversas capitais iniciaram projetos-piloto: São Paulo, Curitiba e Brasília introduzem ônibus a bateria em linhas estratégicas. Atualmente o Brasil conta com cerca de 1000 ônibus elétricos em operação distribuídos em 18 municípios, sendo São Paulo a cidade com mais unidades (841).

Embora seja o maior número de cidades com elétricos na região, isso ainda representa menos de 1% da frota nacional de transporte coletivo, dado que há mais de 100 mil ônibus urbanos em circulação no país. Ou seja, a eletromobilidade nos ônibus brasileiros está em estágio inicial, mas com tendência de expansão à medida que tecnologias se comprovam e custos caem.



A eletrificação dos ônibus exige superar altos custos iniciais com novos modelos de financiamento, implantar infraestrutura de recarga adequada e capacitar equipes para operação e manutenção eficiente.

Diversos desafios precisam ser enfrentados para ampliar a eletrificação dos ônibus. O alto investimento inicial por veículo - um ônibus elétrico pode custar 2 a 3 vezes o preço de um diesel convencional - requer novos modelos de financiamento. Governos e operadores estudam soluções como leases, parcerias público-privadas e linhas de crédito verde para diluir custos.

Além disso, é necessário implantar infraestrutura de recarga específica para grandes frotas: estações de carga noturna nos pátios, carregadores ultrarrápidos nos terminais de integração e, em alguns casos, substituição de baterias ou uso de supercapacitores.

A gestão da demanda elétrica pela concessionária local é crucial para evitar sobrecargas - em especial se muitos ônibus carregam simultaneamente à noite. Em São Paulo, por exemplo, um terminal capaz de recarregar 15 ônibus simultaneamente já foi inaugurado, apontando caminhos para vencer a barreira infraestrutural.

Outro ponto crítico é o planejamento operacional e capacitação. Operar ônibus elétricos exige ajustes nas rotas e escalas: devido à autonomia limitada por carga (usualmente 200-300 km), pode ser preciso escalonar recargas ao longo do dia ou substituir veículos enquanto carregam. Isso demanda um planejamento inteligente dos horários e estações de reforço energético. As empresas de transporte também precisam treinar motoristas e equipes de manutenção em novas tecnologias - dirigibilidade dos elétricos, protocolos de segurança de baterias e sistemas de potência.



Com tecnologia se tornando mais madura e custos caindo, a eletrificação do transporte público caminha para se tornar irreversível - um pilar central da mobilidade urbana sustentável nas próximas décadas.

Essa capacitação técnica é fundamental para garantir alto índice de disponibilidade desses veículos e prolongar sua vida útil. Por fim, gestores públicos enfrentam o desafio de conciliar a inovação com o custo das tarifas: idealmente, os ganhos de eficiência e menores gastos com combustível dos ônibus elétricos devem refletir em tarifas acessíveis, requerendo subsídios transitórios ou ganhos de escala para não onerar o usuário.

Apesar dos obstáculos, muitas cidades já estabelecem metas ambiciosas para a transição do transporte coletivo. Diversas metrópoles globais (São Paulo, Santiago, Bogotá, Nova York, entre outras) anunciaram prazos para converter parte significativa ou toda a frota de ônibus urbanos em zero emissões nas próximas décadas.

Iniciativas de Zonas de Baixa Emissão (ZBE) estão em estudo, onde apenas veículos limpos poderiam operar nos centros urbanos, impulsionando a adoção de ônibus elétricos ou de hidrogênio. Parcerias internacionais como a C40 Cities e o programa ZEBRA oferecem assistência técnica e financiamento para acelerar essas mudanças integradas.

No Brasil, o Governo Federal lançou em 2024 um plano nacional para impulsionar ônibus elétricos, em cooperação com a CEPAL, indicando um alinhamento com a tendência global. Com tecnologia se tornando mais madura e custos caindo, a eletrificação do transporte público caminha para se tornar irreversível - um pilar central da mobilidade urbana sustentável nas próximas décadas.

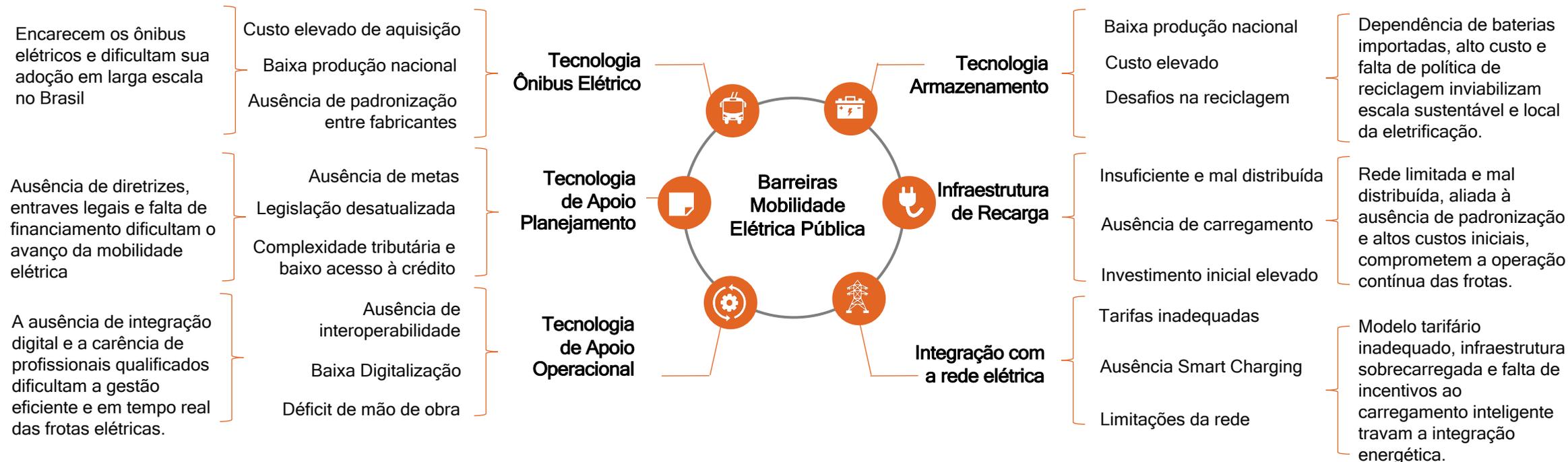
Brasil lança plano nacional para impulsionar ônibus elétricos

MDIC e CEPAL lançam plano para promover a eletromobilidade no setor de transporte público



A mobilidade elétrica pública no Brasil enfrenta entraves técnicos, regulatórios e financeiros que comprometem sua expansão em larga escala.

A mobilidade elétrica pública no Brasil enfrenta altos custos, baixa produção local, infraestrutura limitada e entraves regulatórios. A falta de metas claras, escassez de mão de obra qualificada e barreiras ao financiamento dificultam sua expansão. É preciso planejamento integrado e incentivos para superar esses desafios



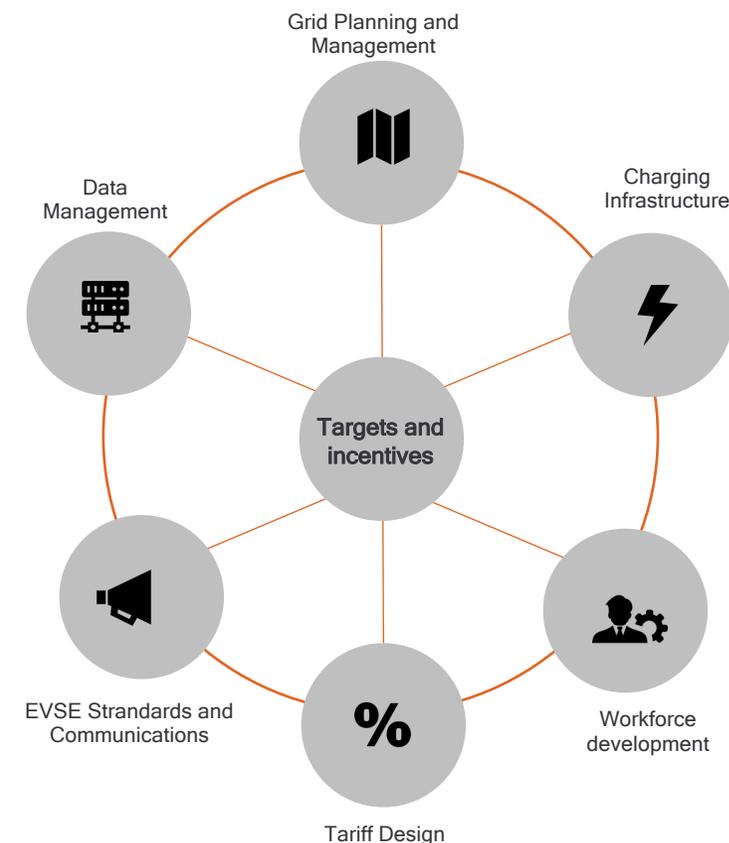


Barreiras à difusão de Veículos Elétricos no Brasil

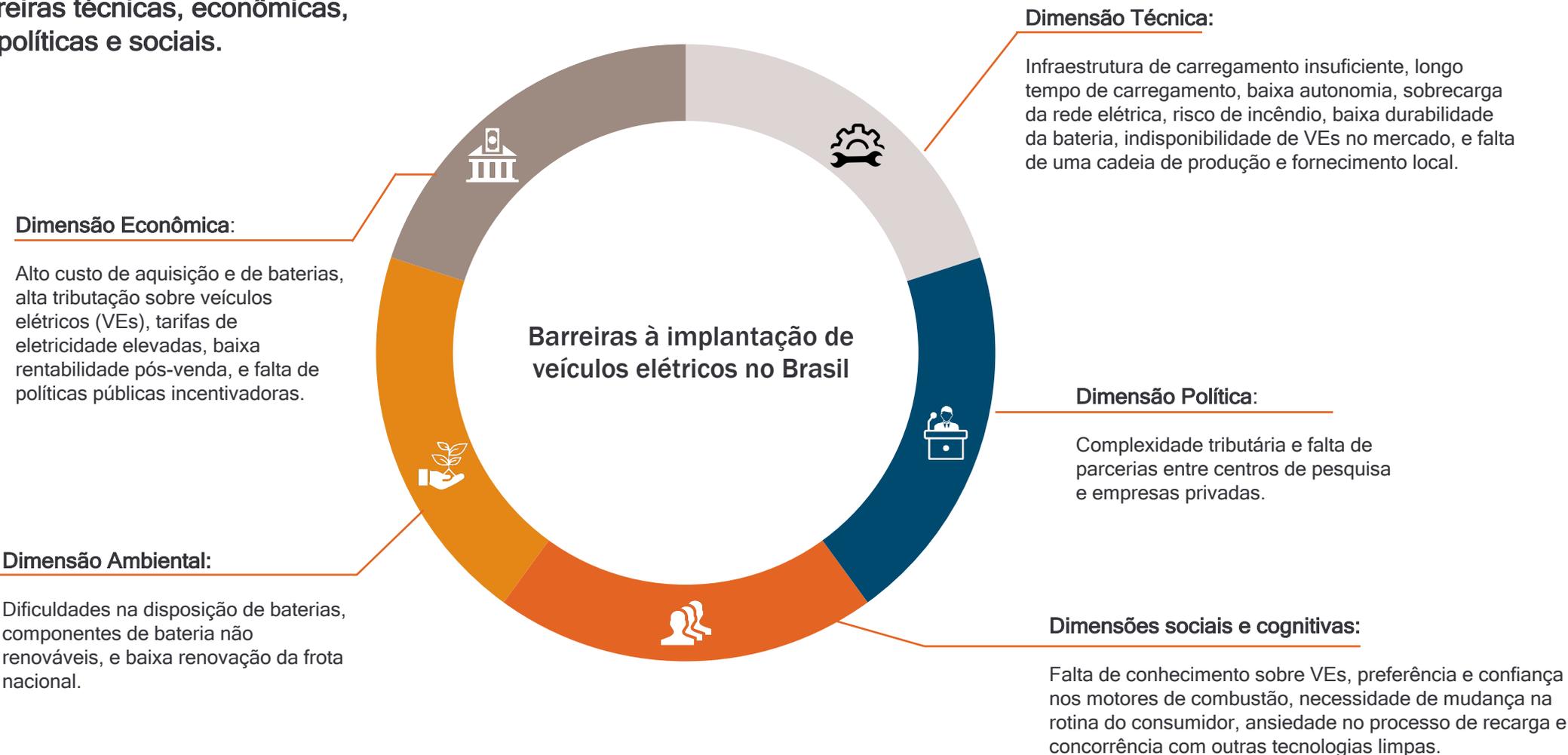
A implantação de uma política eficaz de Veículos Elétricos e infraestrutura de abastecimento inicia-se com uma curadoria de dados para definir políticas, identificar benefícios e orientar estratégias direcionadas.

A implantação eficaz de Veículos Elétricos (VE) e infraestrutura de abastecimento para abastecimento de VEs (IEVE) demandam a implementação de políticas que complementam-se entre si:

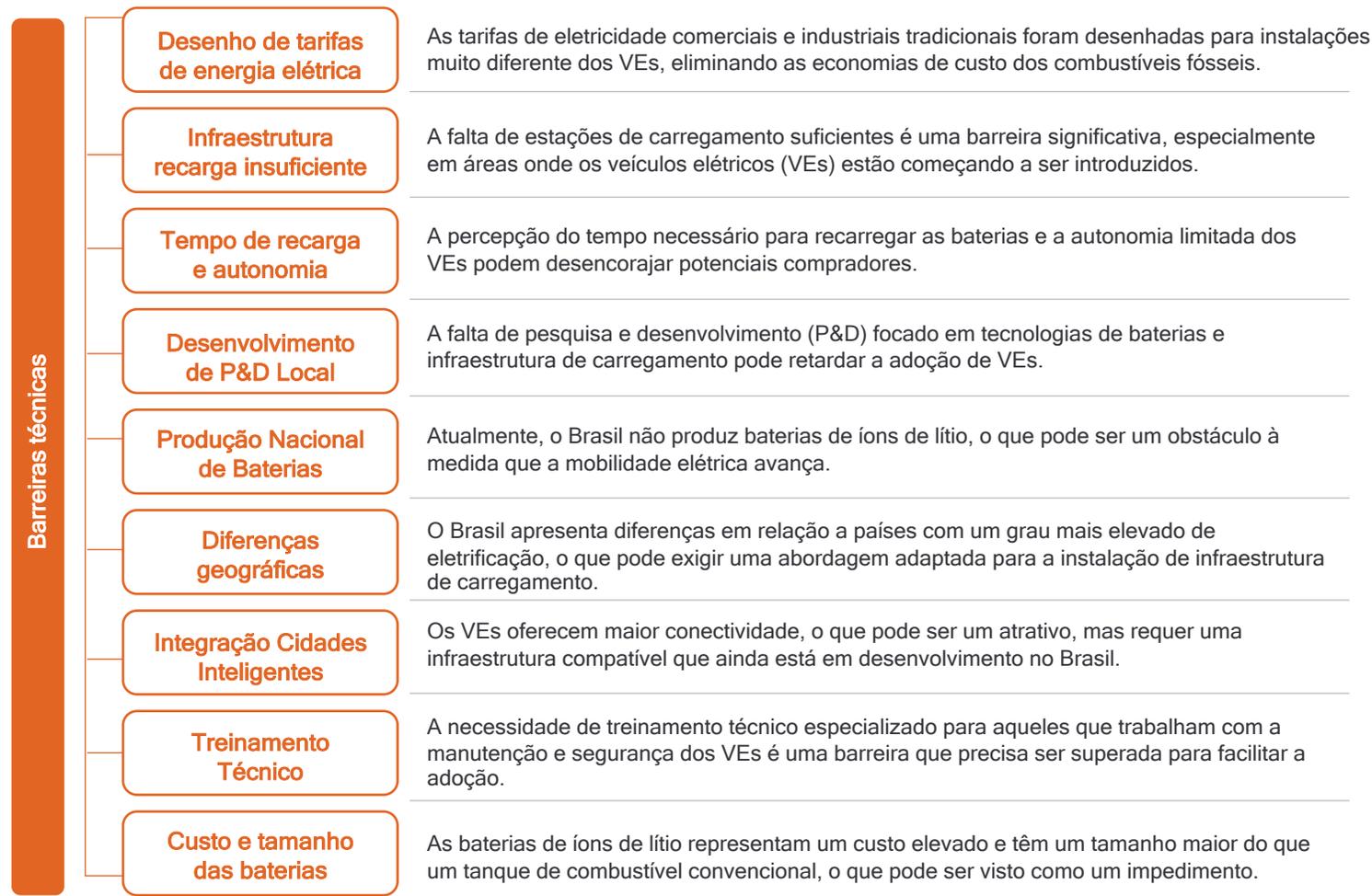
- **Curadoria e gestão de dados:** Ajudam a identificar os potenciais benefícios da eletrificação de veículos e possibilitam estratégias bem desenhadas para escalar a implementação de VE de maneira direcionada;
- **Metas e incentivos:** Uma série de opções políticas complementares precisam ser implementadas para catalisar um mercado robusto de VE;
- **Planejamento e Gestão da Rede Elétrica:** Novas cargas VEs na rede elétrica apresentam tanto desafios quanto oportunidades. A preparação e o planejamento a longo prazo pelas concessionárias podem garantir a implantação oportuna e econômica das redes de infraestrutura de carregamento para VE;
- **Infraestrutura de Carregamento:** O crescimento do mercado de Veículos Elétricos está atrelado à existência de uma infraestrutura de carregamento acessível, adaptável às diversas localizações, demandas e equipamentos. Isso implica uma gama de modelos de investimento e propriedade, necessitando de um equilíbrio entre os recursos dos setores público e privado;
- **Padrões e Protocolos de Comunicação :** Estabelecer e fazer cumprir um quadro regulamentar de padrões de carregamento, certificação de equipamentos e códigos de construção cria um ambiente operacional compatível, confiável e seguro para VE;
- **Design de Tarifa de Eletricidade:** As tarifas de eletricidade especificam como os consumidores são cobrados pela energia elétrica. Um design inteligente de tarifa para carregamento de VE pode apoiar a recuperação de custos das concessionárias de distribuição associadas às infraestruturas de carregamento e pode influenciar o comportamento de carregamento dos clientes em benefício da rede;
- **Estratégias de desenvolvimento da força de trabalho:** são cruciais para apoiar o crescimento do mercado de VE.



A difusão de Veículos Elétricos no Brasil enfrenta barreiras técnicas, econômicas, ambientais, políticas e sociais.



A insuficiente infraestrutura de recarga e outros 7 fatores são as principais barreiras técnicas para a adoção de veículos elétricos no Brasil.



Subsidiar EVs em tarifas comerciais ou industriais vigentes por meio de "descontos" não é uma solução sustentável. Será necessário construir tarifas específicas para os EVs.

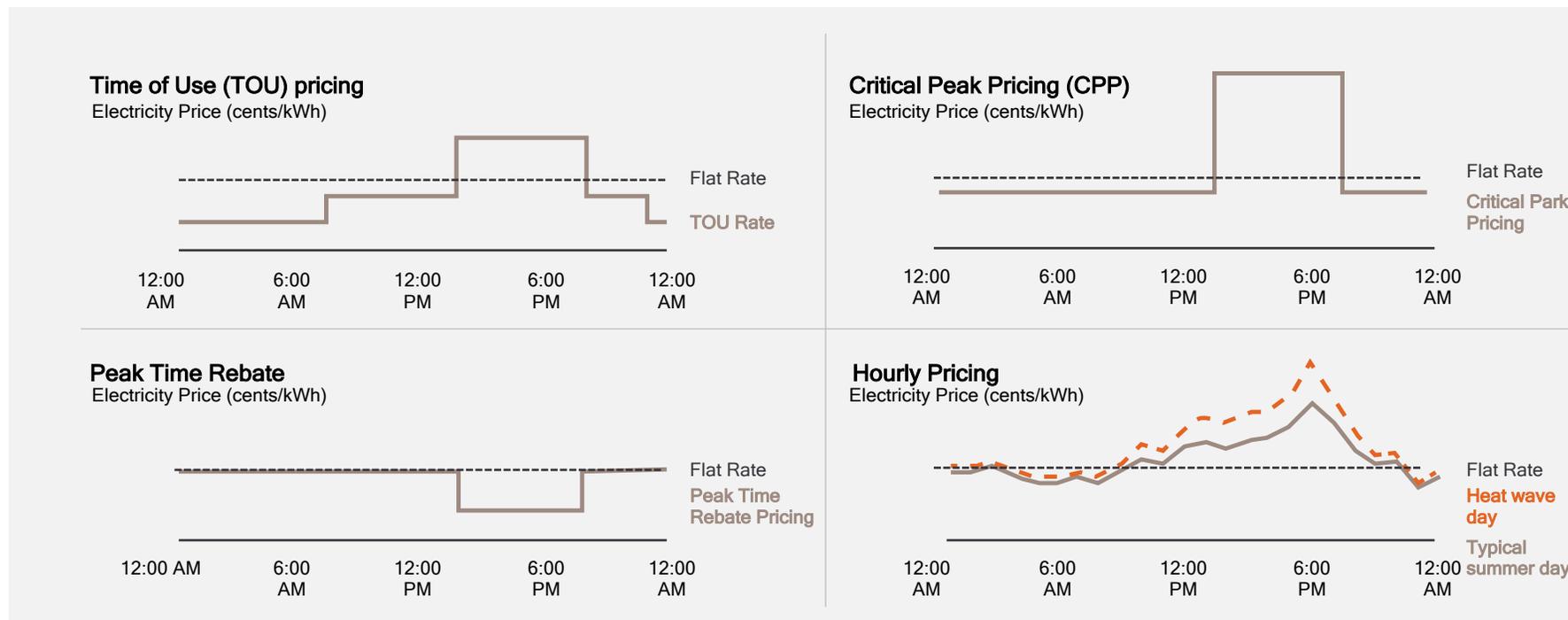
Modelo de Tarifa	Prós	Contras
Time of Use (TOU)	Incentiva carregamento em horas de baixa demanda; reduz custos e ajuda a equilibrar a rede.	Não adequado para quem não pode carregar em horários específicos.
Demanda	Recupera custos de manutenção da rede com base no pico de demanda.	Pode tornar o carregamento de VE caro para quem tem picos de uso altos.
Fixa	Simple e previsível para os proprietários de VE.	Não incentiva a mudança de carregamento para períodos fora de pico, aumentando a tensão na rede.

No Brasil precisarão ser estudadas e testadas diferentes modalidades de tarifas específicas voltadas aos EVs. Na figura ao lado ilustram-se algumas delas.

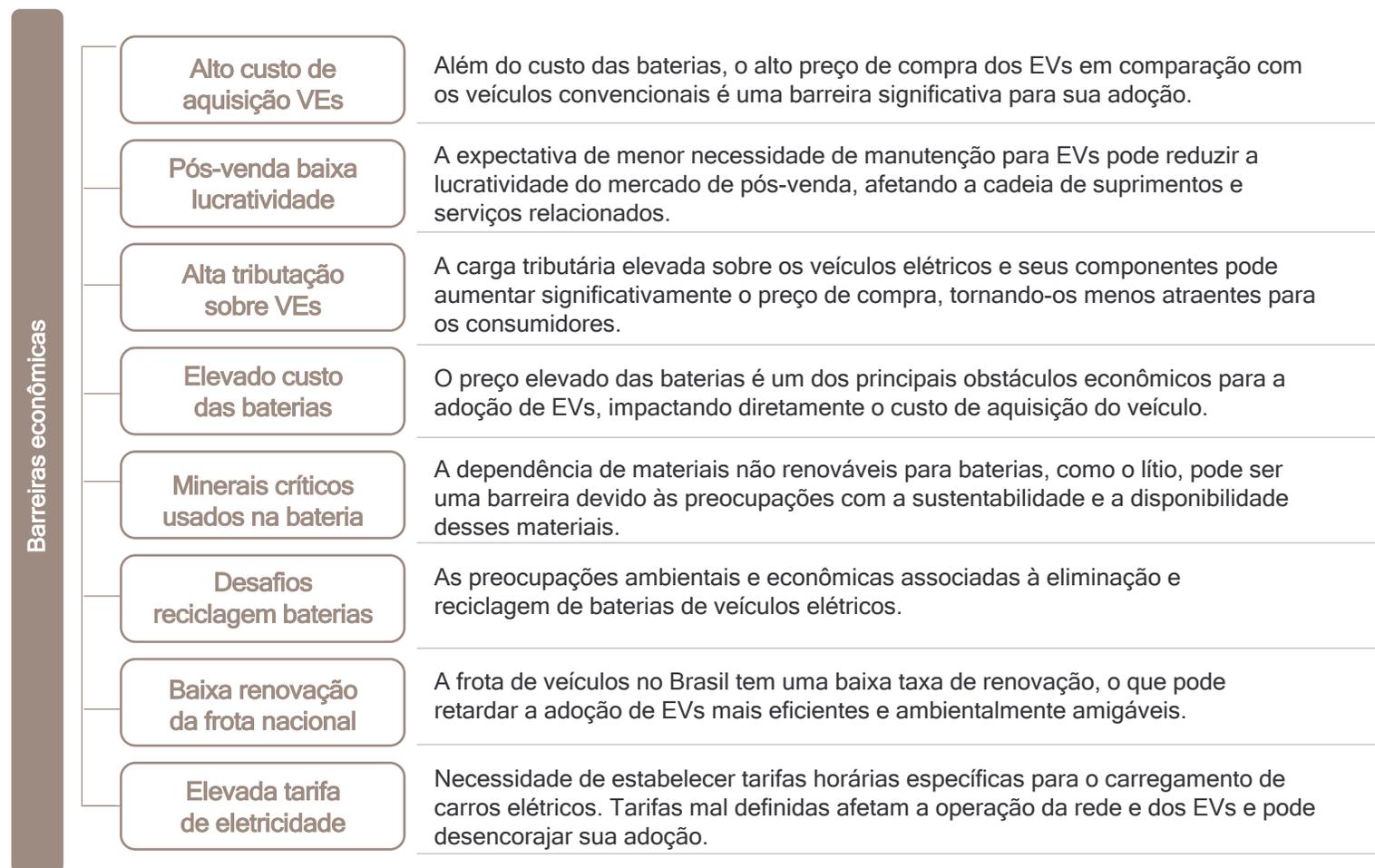
O modelo "Time of Use (TOU)" estimula o carregamento dos VEs em horas de baixo consumo, beneficiando a rede e custos, mas não serve para todos os usuários.

O "Peak Time Rebate" é previsível e gerencia custos no pico, porém pode encarecer o carregamento nesses períodos e não motiva o uso em outros horários.

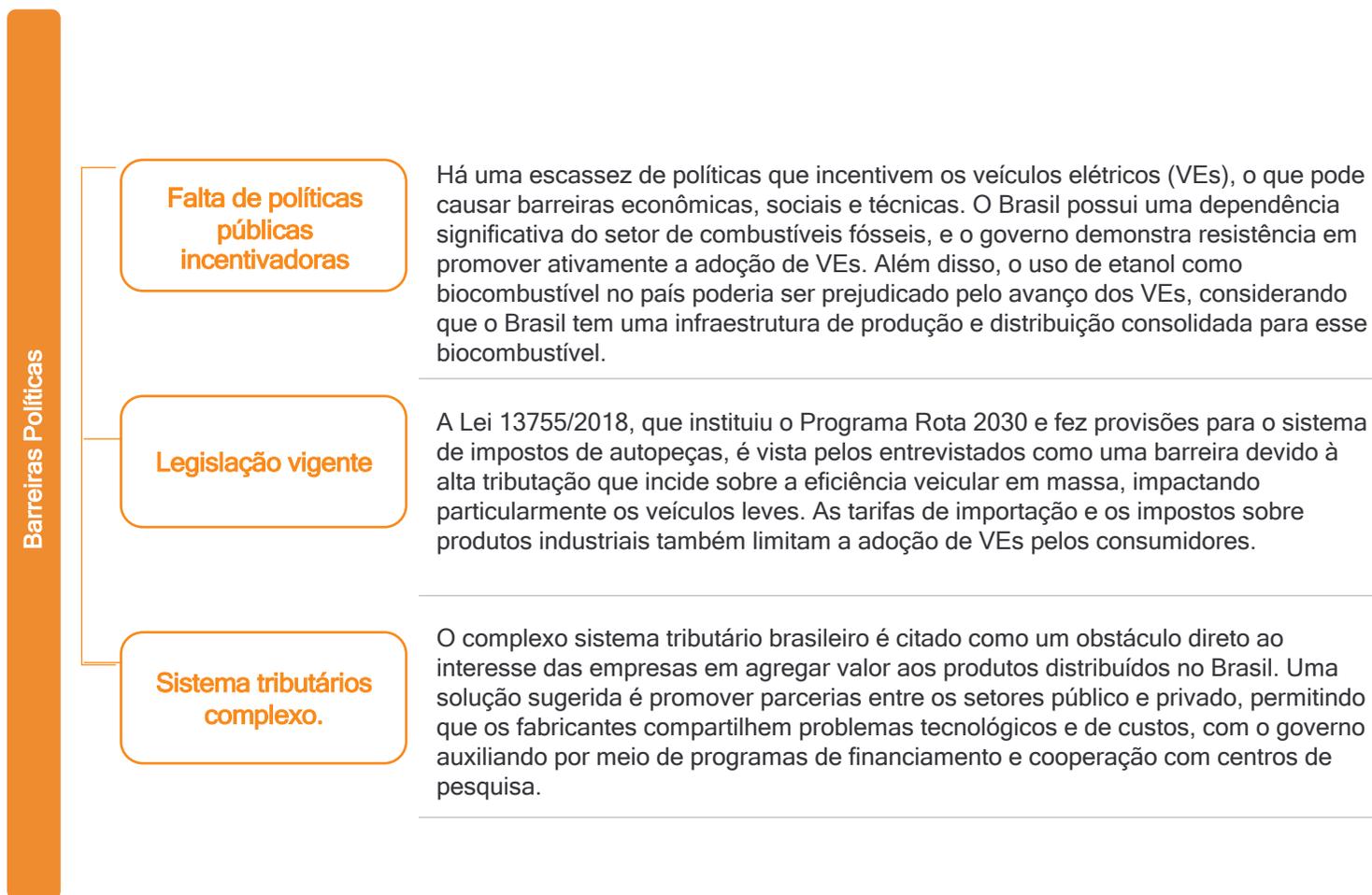
Já o "Critical Peak Pricing" (CPP) encarece o uso nos picos para desestimular o carregamento, e o "Hourly Pricing" varia o preço conforme a demanda, refletindo as flutuações diárias.



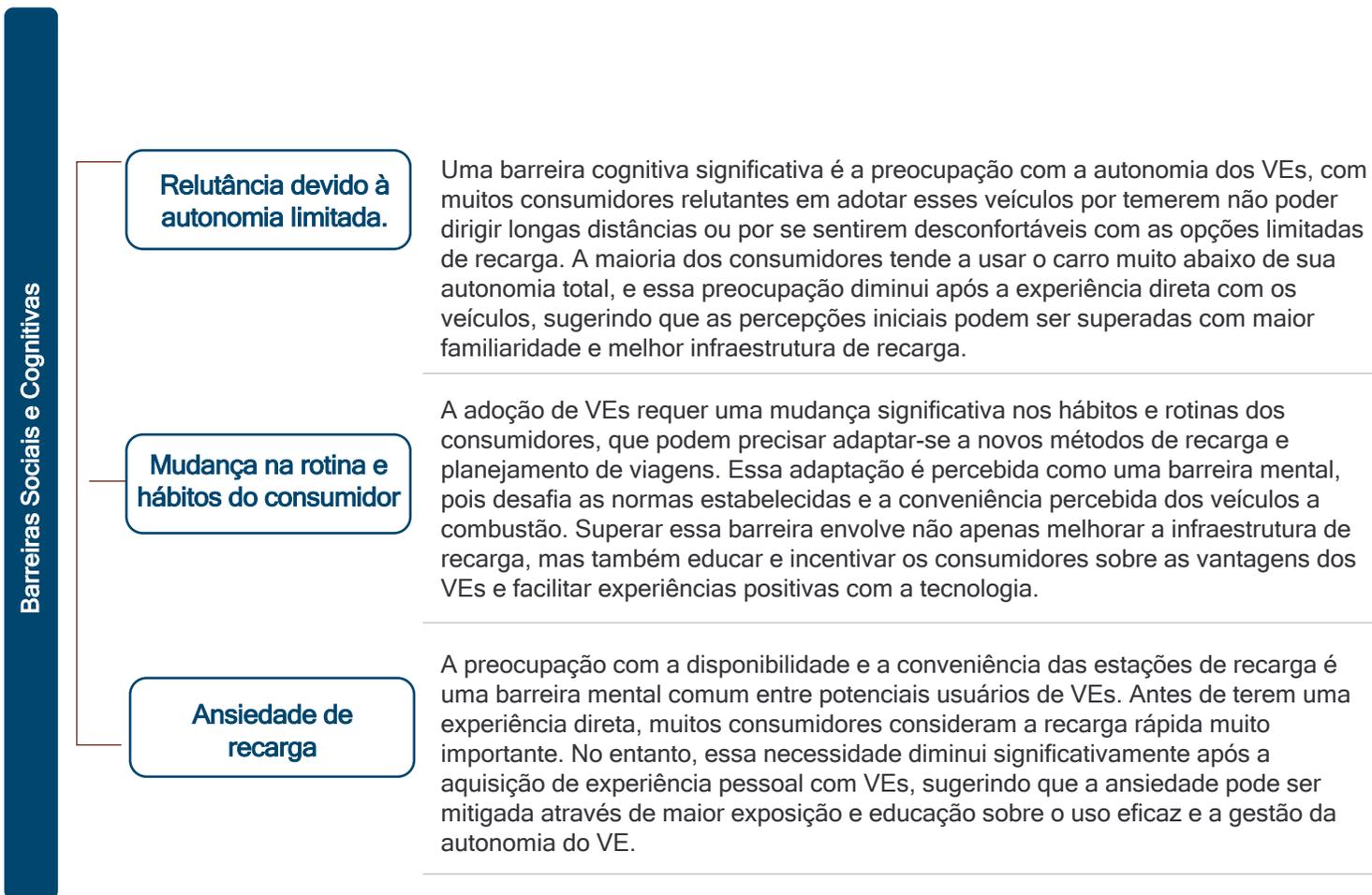
A alta tributação sobre os veículos elétricos e outros 7 fatores são as principais barreiras econômicas à difusão dos VEs no Brasil.



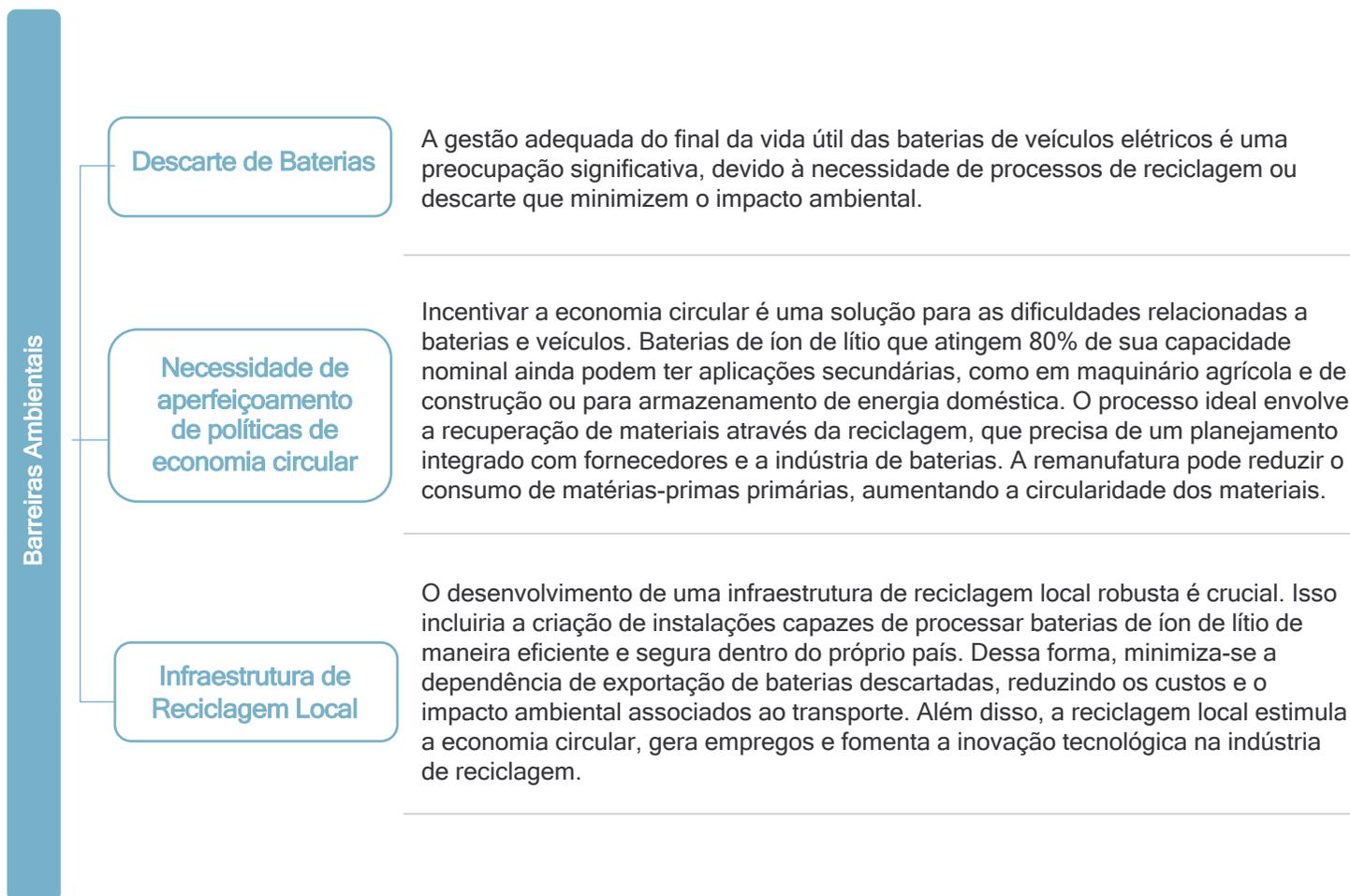
A falta de políticas inovadoras, a legislação vigente e o sistema tributário complexo são as principais barreiras políticas para a difusão de veículos elétricos no Brasil.



A relutância devido à autonomia limitada, mudança na rotina e nos hábitos dos consumidores, e ansiedade de recarga são as principais barreiras sociais para a difusão de veículos elétricos no Brasil.



O descarte das baterias e à necessidade de aprimoramento das políticas de economia circular são as principais barreiras ambientais para a difusão de VEs no Brasil.





Desafios aos reguladores e às utilities

Os ciclos de inovação estão mais curtos. Os mercados com regulação mais ágil se posicionam estrategicamente entre novas tecnologias.

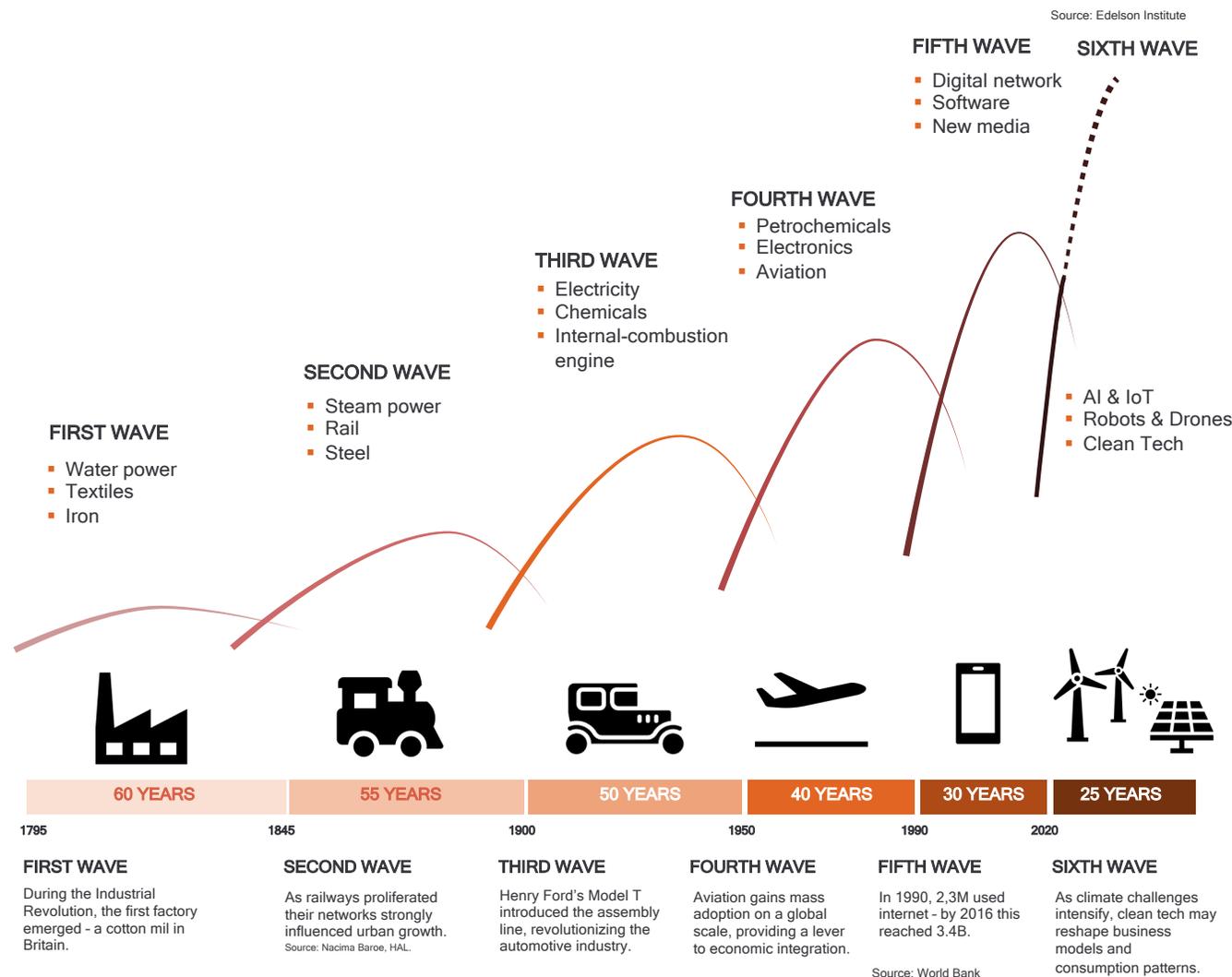
A rápida evolução da tecnologia automotiva e a emergência de VEs podem ser vistas como parte desta sexta onda de inovação da figura ao lado.

A adoção de VEs no Brasil e globalmente está alinhada com a demanda por soluções tecnológicas mais limpas e eficientes, que prometem transformar o mercado automobilístico e os padrões de consumo.

Essa transição para VEs enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de infraestrutura de carregamento avançada, incentivos políticos e fiscais adequados e uma mudança na percepção e comportamento dos consumidores.

Nesse contexto, onde os cenários mudam rapidamente, os entes reguladores e as empresas de distribuição de energia terão cada vez menos tempo para definir estratégias e se reposicionarem.

Diante disso, aumenta também o potencial de arrependimento das estratégias adotadas.



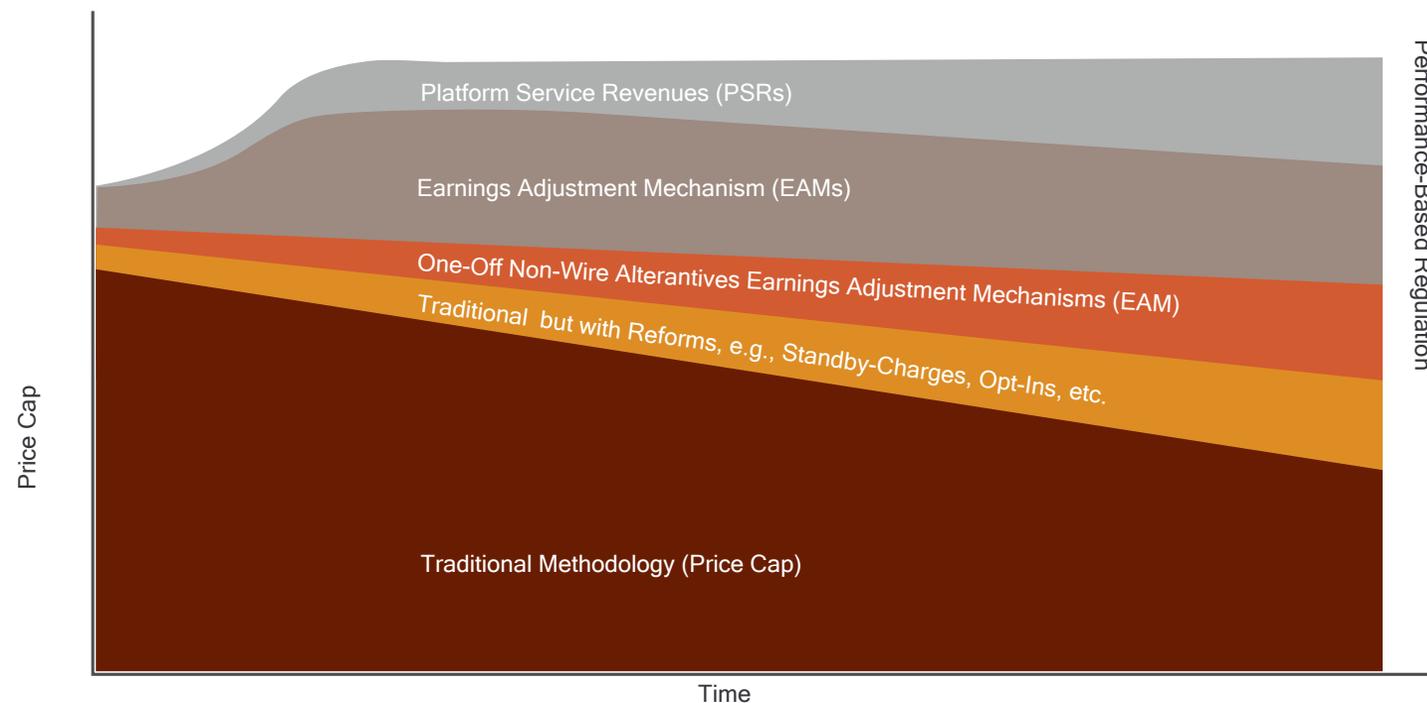
As atuais metodologias de definição das receitas (Price Cap) estão cada vez mais inadequadas para financiar a modernização da rede elétrica e oferecer confiabilidade e resiliência em um contexto de transição energética e intensa ruptura tecnológica.

É fundamental adotar metodologias regulatórias alternativas que enfrentem de forma mais eficaz os desafios do setor, promovendo investimentos alinhados às novas demandas. Isso pode exigir uma transição gradual, com foco em modelos mais adaptáveis e robustos. Entre as opções estão:

Platform Service Revenues (PSRs): Taxas cobradas por operadoras de distribuição para permitir que terceiros ofereçam serviços de energia distribuída aos consumidores.

Earnings Adjustment Mechanisms (EAMs): Mecanismos que, aliados à regulação por desempenho, incentivam práticas sustentáveis e maior eficiência por parte das concessionárias.

Traditional com Reformas: Modernização do modelo tarifário tradicional com medidas como taxas de reserva e adesão voluntária, visando promover eficiência energética e ampliar o uso de fontes renováveis.



Será necessário também um *phaseout* entre a atual forma de remuneração dos ativos de distribuição em direção à novas modalidades de formação de receita das distribuidoras de energia para captar os efeitos positivos da eletrificação trazidos pelos veículos elétricos.

Asset Ownership: Propriedade de ativos, como infraestrutura de rede elétrica, painéis solares, baterias, etc.

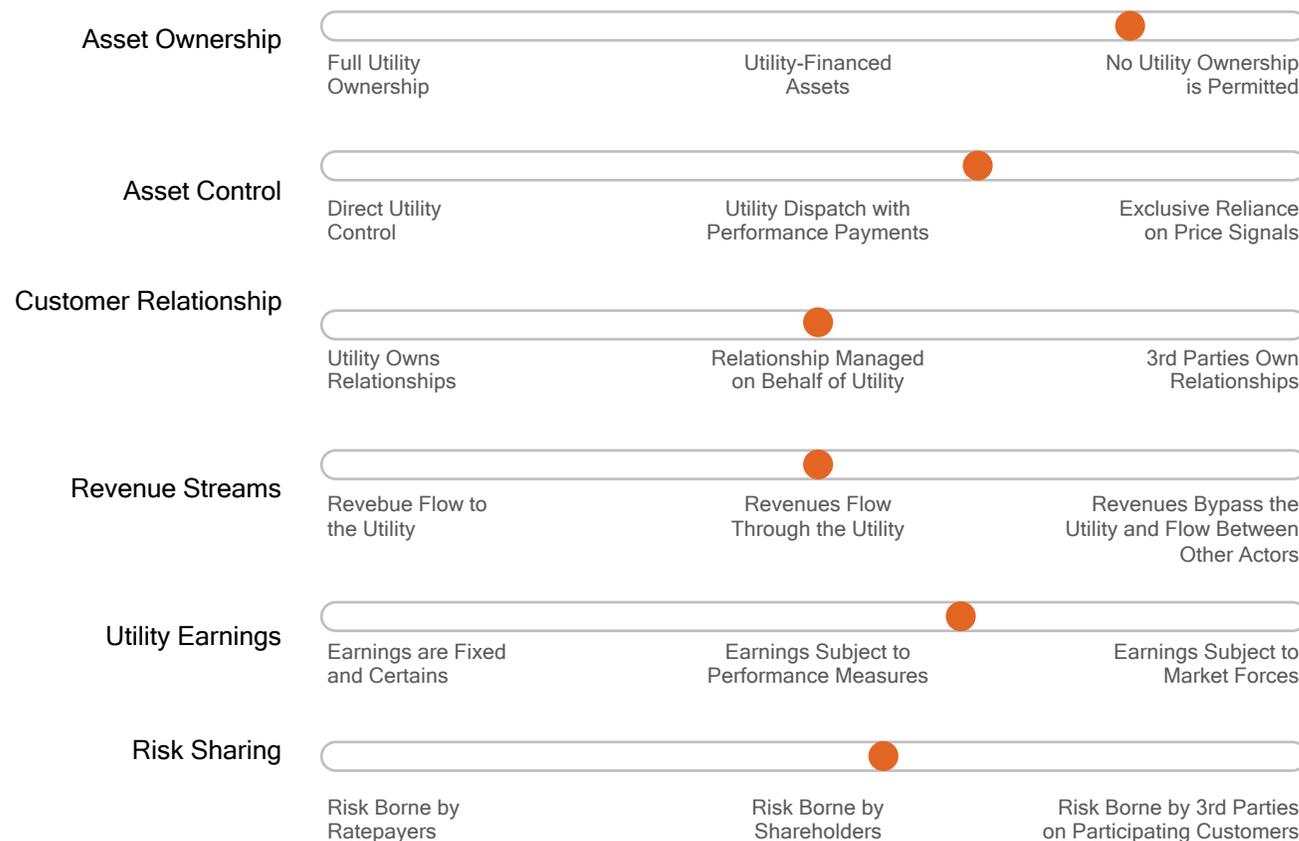
Asset Control: Controle sobre os ativos, incluindo a capacidade de gerenciá-los e operá-los.

Customer Relationship: Relacionamento com o cliente, incluindo a capacidade de se comunicar com eles, fornecer serviços e responder a reclamações.

Revenue Streams: Fluxos de receita, incluindo receita de tarifas regulamentadas, receita de serviços de plataforma, receita de vendas de ativos, etc.

Utility Earnings: Ganhos da empresa de serviços públicos, incluindo lucros e receita regulamentada.

Risk Sharing: Compartilhamento de riscos entre as partes interessadas, incluindo a empresa de serviços públicos, os clientes e outros atores do mercado.



Considerações Finais

Apesar da importância do Brasil como fabricante e mercado consumidor, menos de 7% dos veículos licenciados em 2024 foram elétricos. Barreiras técnicas, econômicas e regulatórias ainda limitam a adoção no país.

1



A mobilidade elétrica está em um ponto de inflexão no Brasil.

Apesar de o país ocupar posição de destaque na indústria automobilística global, sua participação no mercado de veículos elétricos ainda é incipiente, refletindo uma adoção lenta frente a mercados como China e Europa.

2



O sucesso da mobilidade elétrica depende de um esforço coordenado.

Será necessário enfrentar barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, por meio de políticas públicas consistentes, incentivos ao consumidor final, desenvolvimento de infraestrutura de recarga e estímulo à produção nacional de componentes estratégicos como baterias.

3



A modernização regulatória é urgente.

Modelos tradicionais de remuneração das distribuidoras se mostram inadequados diante das novas demandas impostas pela eletrificação veicular. É fundamental avançar para metodologias que considerem receitas por serviços de plataforma, mecanismos de ajuste de desempenho e flexibilização tarifária.

4



Distribuidoras e reguladores precisam se reposicionar estrategicamente.

A transição energética é marcada por rápidas mudanças tecnológicas, e o tempo para adaptação está cada vez mais curto. Uma estratégia equivocada pode resultar em perdas econômicas e tecnológicas irreversíveis.

5



Há risco de o Brasil perder o "bonde da eletrificação".

Se não houver ação decisiva, o país pode comprometer a competitividade de sua indústria, perder oportunidades de descarbonização urbana e deixar de usufruir dos benefícios econômicos e ambientais da eletromobilidade.

Sobre a Thymos Energia

A Thymos Energia é uma das maiores empresas brasileiras de consultoria e gestão de energia. Com a missão de transformar o complexo em simples, a empresa oferece soluções de ponta a ponta da cadeia: geração, transmissão, distribuição, comercialização e consumo, além de orientar investidores que buscam oportunidades nesses segmentos. A energia para o futuro precisa ser projetada, planejada e construída hoje e o trabalho da Thymos é dar o suporte necessário para que as melhores decisões sejam tomadas.



Equipe envolvida

Este *White Paper* possui o exclusivo intuito de discutir e promover o debate sobre Mobilidade Elétrica. Portanto, o documento não representa um trabalho de consultoria ou uma recomendação formal. É proibida a reprodução parcial ou integral deste trabalho sem a citação da fonte.



João Mello
CEO



Luiz Vianna
COO



Victor Ribeiro
Consultor Estratégico



 thymosenergia@thymosenergia.com.br

 (11) 3192 9100

 www.thymosenergia.com.br

 Av. das Nações Unidas, 11541, 14º andar | 04578-907 | Brooklin | SP