



Veículos de Novas Energias: perspectivas e limitações para mudança de paradigma tecnológico no contexto da crise climática¹

Vitória Pigatto Casceano²;
Mateus Guerreiro Pellegrini³.

Resumo

A intensificação da crise climática recoloca, no centro do debate econômico, a necessidade de reconfiguração dos paradigmas tecnológicos associados ao padrão de crescimento intensivo em carbono. Nesse contexto, os Veículos de Novas Energias (NEVs) emergem como alternativa ao motor de combustão interna, sendo amplamente apresentados como alternativa para a descarbonização do setor de transportes. O problema de pesquisa que orienta este artigo consiste em investigar em que medida os NEVs representam, de fato, uma janela de oportunidade para o desenvolvimento sustentável ou se configuram apenas como uma adaptação tecnológica limitada, incapaz de enfrentar as contradições estruturais da automobilidade contemporânea. O objetivo central é examinar, simultaneamente, o potencial dos NEVs como vetor de mudança de paradigma tecnológico e estratégia de *catching up*, com destaque para a experiência chinesa, e seus limites ambientais e estruturais no interior do capitalismo contemporâneo.

Metodologicamente, o trabalho adota abordagem qualitativa de caráter teórico-analítico, ancorada nas tradições estruturalista e neo-schumpeteriana. O delineamento combina revisão sistemática de literatura sobre paradigmas tecnológicos, janelas de oportunidade e desenvolvimento sustentável, com análise crítica de estudos empíricos baseados em Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), especialmente Mera et al. (2023) para o caso brasileiro e Hawkins et al. (2013) para o contexto europeu. São examinadas variáveis como emissões de CO₂ equivalente por quilômetro, intensidade de carbono da matriz elétrica, ciclo de vida dos veículos, emissões embarcadas na produção de baterias e impactos ambientais associados à mineração. Adicionalmente, mobilizam-se dados agregados de emissões setoriais e crescimento da frota global para contextualização macroestrutural.

Os resultados indicam que os benefícios ambientais podem ser limitados e condicionados por uma miríade de elementos. No Brasil, sob matriz elétrica relativamente limpa, veículos elétricos a bateria (BEVs) podem emitir cerca de 55 g CO₂ eq/km frente a 155

¹ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

² Universidade Estadual de Campinas. E-mail: v195431@dac.unicamp.br

³ Universidade Estadual de Campinas. E-mail: m203268@dac.unicamp.br

g CO₂ eq/km de veículos flex convencionais, implicando redução próxima a 65%. Já no contexto europeu, com matriz mais intensiva em carbono, a redução estimada varia entre 20% e 24%, podendo cair para menos de 10% em cenários de menor ciclo de vida útil. Além disso, cerca de metade das emissões dos BEVs concentra-se na fase produtiva, e há evidências de maior potencial de toxicidade humana, ecotoxicidade aquática e eutrofização associados à produção de baterias. Tais evidências sugerem que não há garantia automática de redução absoluta nos impactos ambientais, havendo possibilidade de ocorrer um deslocamento espacial ou setorial dos mesmos.

No plano estrutural, argumenta-se que os NEVs não alteram os fundamentos da automobilidade, caracterizada por dependência do veículo individual, reprodução de desigualdades socioespaciais e forte *lobby* industrial, podendo operar como um “*green fix*”, preservando a centralidade do automóvel. Nesse sentido, compreende-se que os NEVs configuram, simultaneamente, uma oportunidade tecnológica — especialmente para estratégias estatais coordenadas, como no caso chinês — e um campo de tensões ambientais e sociais. Sua contribuição original reside em articular a mudança de paradigma, o desenvolvimento sustentável e a crítica estrutural do setor. Como limitação, destaca-se a recência do fenômeno e a dependência de dados ainda em consolidação, sugerindo a necessidade de pesquisas interdisciplinares futuras que integrem economia política, estudos ambientais e planejamento urbano.

Palavras-chave: Veículos de Novas Energias; Desenvolvimento Sustentável; Paradigmas Tecnológicos; Crise Climática.

Código JEL: L62, O25, Q50

Área Temática: 7.3 - Inovação, desenvolvimento e sustentabilidade

New Energy Vehicles: prospects and limitations for technological paradigm shift in the context of the climate crisis

Abstract

The intensification of the climate crisis brings back to the center of the economic debate the need to reconfigure the technological paradigms associated with the carbon-intensive growth model. In this context, New Energy Vehicles (NEVs) emerge as an alternative to the internal combustion engine, being widely presented as an alternative for the decarbonization of the transport sector. The research problem that guides this article is to investigate the extent to which NEVs actually represent a window of opportunity for sustainable development or whether they are merely a limited technological adaptation, incapable of addressing the structural contradictions of contemporary automobility. The central objective is to examine, simultaneously, the potential of NEVs as a vector for technological paradigm shift and catching-up strategy, with emphasis on the Chinese experience, and their environmental and structural limits within contemporary capitalism.

Methodologically, the work adopts a qualitative theoretical-analytical approach, anchored in the structuralist and neo-schumpeterian traditions. The design combines a systematic review of the literature on technological paradigms, windows of opportunity, and sustainable development with a critical analysis of empirical studies based on Life Cycle Assessment (LCA), especially Mera et al. (2023) for the Brazilian case and Hawkins et al.

(2013) for the European context. Variables such as CO₂ equivalent emissions per kilometer, carbon intensity of the electricity matrix, vehicle life cycle, emissions embedded in battery production, and environmental impacts associated with mining are examined. Additionally, aggregate data on sectoral emissions and global fleet growth are mobilized for macrostructural contextualization.

The results indicate that environmental benefits may be limited and conditioned by a myriad of elements. In Brazil, under a relatively clean electricity matrix, battery electric vehicles (BEVs) can emit around 55 g CO₂ eq/km compared to 155 g CO₂ eq/km for conventional flex-fuel vehicles, implying a reduction of close to 65%. In the European context, with a more carbon-intensive matrix, the estimated reduction varies between 20% and 24%, and may fall to less than 10% in scenarios with a shorter life cycle. In addition, about half of BEV emissions are concentrated in the production phase, and there is evidence of greater potential for human toxicity, aquatic ecotoxicity, and eutrophication associated with battery production. Such evidence suggests that there is no automatic guarantee of an absolute reduction in environmental impacts, with the possibility of a spatial or sectoral shift in these impacts.

At the structural level, it is argued that NEVs do not alter the fundamentals of automobility, characterized by dependence on individual vehicles, reproduction of socio-spatial inequalities, and strong industrial lobbying, and may operate as a “green fix,” preserving the centrality of the automobile. In this sense, it is understood that NEVs simultaneously represent a technological opportunity—especially for coordinated state strategies, as in the Chinese case—and a field of environmental and social tensions. Its original contribution lies in articulating the paradigm shift, sustainable development, and structural criticism of the sector. As a limitation, the recentness of the phenomenon and the dependence on data still being consolidated stand out, suggesting the need for future interdisciplinary research that integrates political economy, environmental studies, and urban planning.

Keywords: New Energy Vehicles; Sustainable Development; Technological Paradigms; Climate Crisis.

Introdução

Os efeitos materiais da crise climática e ecológica são cada vez mais percebidos e frequentes. Ondas de calor extremo duradouras, enormes queimadas, chuvas torrenciais e alagamentos devastadores, tornados arrasadores, secas prolongadas são apenas alguns exemplos de eventos que cada vez mais figuram no cotidiano dos noticiários. Esse cenário reflete a saturação de um modo de vida e de produção material insustentável que jamais se importou com seus efeitos sobre o planeta e que frente a estes resultados é forçado a pelo menos tentar encontrar algumas respostas e alternativas. De acordo com relatório do Painel Intergovernamental Sobre Mudança do Clima (IPCC) a temperatura média na Terra já aumentou 1,1° C desde a última década do século XIX, e este aumento é mais acentuado ainda nos continentes (IPCC, 2023). Isso implica maior incidência de condições climáticas adversas e grandes contingentes populacionais colocados sobre vulnerabilidade climática, além de uma série de dúvidas e urgências para lidar com as metas de limitar este aquecimento em patamares de 1,5° C ou 2° C.

O surgimento e a popularidade de veículos movidos através de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, como os elétricos e até mesmo os híbridos, têm bastante aderência com o discurso de endereçamento da questão da crise ecológica. Principalmente pelas reduções nas emissões de gases de efeito estufa e pela redução na dependência de petróleo, estes têm sido popularmente evocados como uma provável resposta para a questão ambiental no setor de transportes. Evidente que a emergência de uma alternativa aos tradicionais veículos movidos a combustão promove uma intensa reconfiguração produtiva e tecnológica pela indústria. Com efeito, isto configura uma possível mudança de paradigma tecnoeconômico e o rompimento de tradicionais estruturas de mercado, abrindo espaço para novos competidores (como o caso das empresas automobilísticas chinesas). Entretanto, se faz necessário investigar e avaliar se as promessas e benefícios comumente associados aos novos tipos de veículos realmente se verificam sob uma ótica mais abrangente, incorporando questões de fundo associadas às condições e limites da automobilidade contemporânea.

Em outras palavras, isso implica compreender a questão ambiental como um problema global, sistêmico e inserido dentro de um sistema complexo e interconectado; e, partindo disso, é preciso avaliar e investigar detalhadamente em que medida os NEVs⁴ conseguem de fato ir além de soluções locais e mitigações pontuais. Isto posto, o objetivo deste trabalho é o de examinar como os NEVs podem ser capazes de abrir uma janela de oportunidade para o desenvolvimento sustentável e investigar quais são os limites e contradições estruturais que estes enfrentam dentro do capitalismo contemporâneo. Para tanto, o primeiro capítulo dedica-se a investigar a abertura de janelas de oportunidade e as mudanças de paradigma tecnológico associados à emergência climática e examinar à luz das possibilidades de política industrial e *catching-up* em economias atrasadas a experiência histórica de desenvolvimento de indústria verde associada aos NEVs na China. Já o segundo capítulo se dedica a examinar criticamente as contradições e limitações para o uso de NEVs como resposta à crise de emergência ambiental, inicialmente do ponto de vista do fino arranjo para que haja progressos em termos de emissões e desgaste ambiental e posteriormente sobre as contradições intrínsecas do modelo

⁴ Veículos de Nova Energia (NEVs - *New Energy Vehicles*), referem-se a veículos cuja propulsão se dá por tecnologias alternativas ao motor de combustão interna (*Internal Combustion Engine Vehicles* – ICEVs), abrangendo, principalmente, os veículos elétricos a bateria (BEVs - *Battery Electric Vehicles*) e movidos à célula de hidrogênio (FCEVs - *Fuel Cell Electric Vehicles*), os híbridos (HEVs - *Hybrid Electric Vehicles*) e os híbridos plug-in (PHEVs - *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) (Mera et al., 2023). Neste trabalho, pouca atenção foi dada aos FCEVs devido à sua baixa expressividade no mercado de NEVs e ausência de informações disponíveis para a categoria, que se encontra em estágio prematuro de desenvolvimento. Atualmente, não há FCEVs sendo comercializados no Brasil e estes não representam nem 1% da frota e do registro de novos veículos na Europa (*European Alternative Fuels Observatory*, 2026)

de automobilidade propagado pelo capitalismo contemporâneo. Por fim, apresenta-se uma conclusão recuperando os principais pontos apresentados.

1. Perspectivas e possibilidades associadas aos NEVs como mudança de paradigma tecnológico e vetor do desenvolvimento sustentável

Este capítulo dedica-se a investigar e apontar as possibilidades associadas à uma transição de paradigma tecnológico devido à transição do núcleo motriz da indústria automobilística do motor de combustão interna para o motor elétrico. Assim, o objetivo é investigar aberturas de janelas de oportunidade e as perspectivas de reduções nas emissões de gases de efeito estufa e de mitigação de impactos ambientais com foco em caracterizar os atores necessários para promover uma trajetória de desenvolvimento sustentável.

Para tanto, a primeira subseção dedica-se à conceituação de elementos fundamentais para a análise, como paradigmas tecnológicos, janelas de oportunidade e os atores envolvidos, além de situar os NEVs e sua emergência nesse referencial teórico. Já a segunda subseção tem como objetivo apresentar os principais benefícios ambientais associados ao uso dos NEVs e à substituição de veículos tradicionais à combustão. Busca-se, ainda, à luz da experiência chinesa, explorar a possibilidade de construção de uma trajetória de desenvolvimento a partir da abertura de uma janela de oportunidade vinculada à mudança de paradigma que os NEVs podem desencadear em um regime industrial previamente consolidado, mas que passa a apresentar maior fluidez, favorecendo processos de *catch-up* tecnológico.

1.1 Emergência climática, mudança de paradigma tecnológico e janelas de oportunidade: os NEVs como estratégia de desenvolvimento.

Entender o desenvolvimento econômico - a partir do costume das tradições estruturalistas e evolucionistas - como um processo descontínuo, marcado por rupturas qualitativas que reconfiguram estruturas produtivas, padrões de concorrência e hierarquias nacionais, constitui o ponto de partida analítico deste artigo.

Nessa perspectiva, herdada de Schumpeter (1997 [1912]), o crescimento de longo prazo não decorre de uma acumulação gradual e equilibrada dos fatores de produção, mas da introdução de inovações capazes de romper rotinas estabelecidas e inaugurar novas combinações produtivas. A dinâmica da chamada destruição criadora implica que o progresso econômico avança por meio da substituição de estruturas técnicas e organizacionais obsoletas, abrindo espaço para a emergência de novos setores, firmas e países líderes.

A formalização do conceito de paradigma tecnológico, conforme proposto por Dosi (1982), aprofunda tal visão de tradição neo-schumpeteriana ao compreender paradigmas como modelos cognitivos e técnicos que orientam o processo inovativo ao definir quais problemas são relevantes, quais princípios científicos são mobilizados e quais trajetórias de solução são consideradas legítimas.

Uma vez estabelecido, um paradigma tende a gerar trajetórias tecnológicas cumulativas, nas quais o progresso ocorre predominantemente de forma incremental, reforçando vantagens competitivas para os incumbentes. No entanto, paradigmas não são estáticos, uma vez que em determinados momentos históricos, tensões econômicas, sociais ou ambientais podem expor seus limites internos e desencadear processos de transição.

É precisamente nestes momentos que o conceito de janelas de oportunidade ganha relevância sobretudo para países de industrialização tardia, uma vez que, quando um paradigma tecnológico entra em crise e novas trajetórias passam a ser exploradas, as vantagens acumuladas pelas economias líderes — associadas a ativos fixos específicos, economias de escala e externalidades de rede — tendem a perder parte de seu valor.

Esse enfraquecimento relativo das posições incumbentes pode reduzir temporariamente as barreiras à entrada em setores intensivos em tecnologia, criando condições favoráveis para estratégias de *catching up* e, em alguns casos, de ultrapassagem tecnológica (*leapfrogging*). Trata-se, contudo, de oportunidades historicamente delimitadas, cuja apropriação depende do timing das decisões estratégicas e da capacidade institucional dos países envolvidos.

A superação da armadilha da renda média⁵, nesse sentido, está intimamente ligada à capacidade de identificar e explorar janelas de oportunidade associadas à emergência de novos paradigmas tecnológicos. Conforme argumenta Keun Lee (2013), o aproveitamento destas possibilidades se dá a partir de processos como *stage-skipping* e *path-creation*, impulsionados por políticas públicas orientadas à construção de capacidades tecnológicas, ao aprendizado e à adaptação de tecnologias às condições locais.

A emergência climática contemporânea pode ser interpretada justamente como um desses momentos históricos de inflexão paradigmática, ao impor restrições crescentes ao uso de combustíveis fósseis e aos padrões produtivos intensivos em carbono, tensionando os fundamentos técnicos do paradigma que estruturou o crescimento econômico ao longo do século XX, especialmente no setor de transportes.

Mais do que alterar incentivos marginais, essa pressão socioambiental redefine critérios de eficiência econômica, aceitabilidade social e direção do progresso técnico, desvalorizando ativos específicos vinculados à era fóssil e ampliando os riscos de *lock-in* tecnológico para aqueles que permanecem aferrados a trajetórias em declínio. Assim, a crise ambiental atua como um potente catalisador de mudança estrutural, reabrindo o espaço para a competição em setores cujas regras ainda estão em formação.

Nesse cenário de transição, os Veículos de Nova Energia (NEVs) emergem como um exemplo de reconfiguração setorial, no qual a eletrificação da mobilidade representa uma ruptura profunda com o núcleo técnico dominante por mais de um século – o motor de combustão interna – e desloca o locus da inovação e do valor agregado para sistemas de baterias, eletrônica de potência, software e integração veículo-rede.

Por se tratar de um campo tecnológico ainda em relativa fluidez, com curvas de aprendizado íngremes e forte dependência de infraestrutura complementar e coordenação institucional, os NEVs apresentam características que reduzem as barreiras à entrada associadas às trajetórias consolidadas, de modo a criar uma janela de oportunidade singular: países sem participação dominante na indústria automotiva tradicional podem concentrar recursos na construção de capacidades competitivas nos novos segmentos dinâmicos da cadeia de valor e, até mesmo, ocupar papel de destaque na hierarquia global.

A experiência chinesa com os NEVs oferece uma ilustração empírica potente dessa dinâmica teórica. Consciente de seu atraso tecnológico no paradigma anterior e das limitações de um modelo baseado na simples montagem industrial, a China articulou uma estratégia nacional abrangente para posicionar-se como líder global na nova trajetória tecnológica.

Através de uma combinação coordenada de políticas industriais, subsídios à demanda e à pesquisa e desenvolvimento, metas regulatórias ambiciosas e apoio à formação de campeões nacionais, o país não apenas criou o maior mercado do mundo para NEVs, como também fomentou um ecossistema inovativo capaz de competir na fronteira tecnológica.

O caso evidencia que a apropriação bem-sucedida de uma janela de oportunidade exige mais do que a mera exposição à mudança tecnológica: requer uma capacidade estatal previamente estabelecida para coordenar atores, direcionar investimentos e sustentar um processo acelerado de aprendizado tecnológico e industrial.

⁵Armadilha da Renda Média (ARM) designa a dificuldade enfrentada por países de renda intermediária em sustentar o crescimento econômico e convergir para o nível de renda das economias avançadas, após o esgotamento das vantagens iniciais de custo e sem avanço suficiente em produtividade e inovação (Gill; Kharas, 2007).

Entretanto, se a emergência dos NEVs pode ser interpretada como uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento econômico e para a superação da armadilha da renda média, sua consolidação como trajetória desejável não decorre automaticamente da mudança tecnológica em si. Em particular, a legitimação dessa nova rota de transformação produtiva passa a depender de sua compatibilidade com critérios contemporâneos de sustentabilidade, que hoje reordenam prioridades, instrumentos e narrativas de política econômica.

Nesse sentido, a próxima seção desloca o foco da discussão estritamente schumpeteriana do paradigma e da janela de oportunidade para o debate sobre transição verde e desenvolvimento econômico, situando os NEVs como setor emblemático de estratégias que buscam combinar dinamismo industrial e mitigação climática.

1.2 Sustentabilidade, transição verde e desenvolvimento econômico: os NEVs como estratégia e seus desdobramentos.

Parte-se aqui do entendimento de que, embora as questões ambientais sejam frequentemente tratadas como externalidades a serem corrigidas, interpretadas como custos adicionais ao crescimento e como um conjunto de restrições, a emergência climática e a crescente centralidade da sustentabilidade no debate econômico internacional suscitam uma redefinição dos critérios de legitimidade das estratégias de desenvolvimento e transformação produtiva - colocando o custo da abstenção como superior ao da ação (Stern, 2006).

No contexto contemporâneo, o desenvolvimento econômico passa a ser crescentemente avaliado não apenas em termos de expansão do produto ou da produtividade, mas também à luz de sua compatibilidade com objetivos ambientais e sociais de longo prazo, consolidando a noção de desenvolvimento sustentável, entendido como um padrão de crescimento capaz de articular dinamismo econômico, inovação tecnológica e redução de externalidades ambientais negativas.

Faz-se relevante atestar que o conceito de "desenvolvimento sustentável" possui relações diretas com a noção de sustentabilidade⁶, associando-se ao último para delimitar um espaço de conciliação do desenvolvimento econômico com a sustentabilidade dos recursos ambientais necessários para a sustentação da vida humana no planeta. Uma das primeiras definições canônicas de "desenvolvimento sustentável" ocorre a partir do que ficou conhecido como "Comissão Brundtland" sobre meio ambiente e desenvolvimento realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1983:

"O desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades das gerações atuais, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. O desenvolvimento sustentável procura aliar a preservação ambiental e o uso racional dos recursos naturais, ao progresso socioeconômico e político dos países." (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1991)

Ao longo do tempo, o conceito evoluiu incorporando outras dimensões além das econômicas e ambientais, como por exemplo, elementos sociais e culturais, de combate às desigualdades e de mitigação da pobreza e da fome. Atualmente a definição mais difundida é a presente na "Agenda 2030" publicada pela ONU que defende o equilíbrio entre 3 eixos – crescimento econômico, inclusão social e proteção ambiental – e é materializada na postulação

⁶ O conceito de sustentabilidade parte da noção de explorar processos e elementos sem comprometer suas capacidades inerentes de renovação e reprodução, garantindo sua disponibilidade ao longo do tempo. Silveira (2017) aponta que "a concepção de sustentabilidade está associada à qualidade do que é sustentável, que por sua vez está associado com a possibilidade de uma determinada atividade humana prosseguir por um tempo indeterminado, portanto sustentabilidade e sustentável estão vinculadas à possibilidade de continuidade das atividades humanas ao longo de um tempo que transcende gerações e gerações".

de 17 metas de comum acordo para seu atingimento conhecidas como ODS ou Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2023).

Os Veículos de Novas Energias inserem-se nesse debate como um dos setores emblemáticos do novo paradigma sustentável, ao combinarem potencial de mitigação climática, reorganização tecnológica e oportunidades de transformação estrutural, ou seja, parte de um processo mais amplo de reconfiguração produtiva e não apenas uma substituição tecnológica pontual.

Do ponto de vista ambiental, os Veículos de Novas Energias são amplamente associados à redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, responsável por uma parcela significativa das emissões globais de CO₂. Relatórios recentes da *International Energy Agency* (IEA) destacam que a eletrificação da mobilidade constitui um dos pilares centrais das estratégias contemporâneas de descarbonização do transporte, sobretudo em função da maior eficiência energética dos sistemas de propulsão elétrica quando comparados aos motores de combustão interna (IEA, 2023; 2024). Essa eficiência decorre do fato de que veículos elétricos convertem uma parcela substancialmente maior da energia consumida em movimento útil, reduzindo perdas inerentes aos processos térmicos da combustão.

Além disso, a literatura baseada em avaliações de ciclo de vida (*life cycle assessment*) indica que, mesmo quando consideradas as emissões associadas à produção das baterias e ao fornecimento de eletricidade, os veículos eletrificados podem apresentar menores emissões totais ao longo de sua vida útil em comparação aos veículos convencionais, especialmente em contextos de progressiva descarbonização das matrizes elétricas nacionais (Hawkins *et al.*, 2013; IEA, 2023). Nesse sentido, os ganhos ambientais associados aos NEVs não se restringem à etapa de uso do veículo, mas devem ser compreendidos de forma sistêmica, articulando produção, consumo de energia e infraestrutura.

Para além da dimensão climática global, a mobilidade elétrica contribui de maneira relevante para a redução de emissões locais de poluentes atmosféricos, como material particulado e óxidos de nitrogênio, com impactos diretos sobre a saúde pública e a qualidade de vida urbana.

A eliminação das emissões no escapamento e a redução dos níveis de ruído reforçam o papel dos NEVs como instrumento de mitigação de externalidades negativas associadas ao transporte urbano, contribuindo para a melhoria das condições ambientais e urbanas e ampliando sua aceitação social e política. Sob essa ótica, a sustentabilidade associada aos NEVs não se limita à redução de emissões de carbono, mas envolve também a atenuação de outras externalidades negativas urbanas, em linha com a abordagem pigouviana de correção de falhas de mercado (Pigou, 1920), um aspecto central do argumento econômico em favor do desenvolvimento sustentável.

Cabe ressaltar, contudo, que esses benefícios ambientais e sociais dependem de condições sistêmicas específicas. Hawkins *et al.* (2013) apontam que os ganhos associados aos NEVs são condicionados, entre outros fatores, à composição da matriz energética, aos padrões tecnológicos adotados na fabricação de baterias e à organização das cadeias produtivas envolvidas. Ainda assim, há relativo consenso de que, quando integrados a estratégias nacionais de descarbonização e planejamento energético de longo prazo, os NEVs podem representar um avanço relevante em relação ao paradigma fóssil, consolidando-se como vetor tecnológico compatível com os objetivos da sustentabilidade (IEA, 2022; 2023).

É justamente a partir dessa constatação — isto é, de que os benefícios não são automáticos, mas condicionados — que o próximo capítulo examina, com maior cuidado, as limitações, contradições e requisitos socioambientais que cercam a adoção dos NEVs, evitando leituras “tecno solucionistas” e deslocando a análise para o conjunto do ciclo de vida e do arranjo sistêmico no qual esses veículos se inserem.

A consolidação dos NEVs como setor estratégico exige, nesse sentido, um elevado grau de coordenação entre agentes econômicos, instituições e políticas públicas, elementos constituintes de um Sistema Nacional de Inovação (Freeman, 1987) forte e eficiente.

A transição para a mobilidade elétrica envolve investimentos intensivos e de longo prazo em infraestrutura de recarga, adaptação das redes elétricas, definição de padrões técnicos, estímulo à pesquisa e desenvolvimento e mecanismos de financiamento adequados – elementos que demonstram que a sustentabilidade, nesse contexto, não emerge espontaneamente da dinâmica de mercado, mas depende de arranjos institucionais capazes de alinhar expectativas e reduzir incertezas.

Perez e Mazzucato (2015) aprofunda essa discussão ao destacar o papel do Estado como agente ativo na orientação do progresso técnico. Para a autora, grandes transformações tecnológicas — como a transição verde — requerem políticas de “missão”, nas quais o setor público assume a função de coordenar investimentos, compartilhar riscos e criar mercados para tecnologias emergentes.

No caso dos NEVs, instrumentos como subsídios à demanda, investimentos públicos em P&D, compras governamentais e regulação ambiental atuam de forma complementar, estruturando um ecossistema favorável à inovação e à difusão tecnológica.

Sob essa ótica, a sustentabilidade opera como critério de coordenação econômica, orientando a ação dos agentes e legitimando a intervenção estatal. Ao estabelecer metas ambientais claras e previsíveis, o Estado contribui para direcionar esforços inovativos e acelerar a transição tecnológica, transformando a mobilidade elétrica em um eixo estruturante das estratégias de desenvolvimento sustentável.

A centralidade dos NEVs, nesse contexto, adquire relevância adicional quando analisada sob a perspectiva dos países emergentes, uma vez que, conforme discutido na Seção 1.1, a emergência de novos paradigmas tecnológicos pode abrir janelas de oportunidade para estratégias de *catching up* e *leapfrogging*, especialmente quando as vantagens acumuladas pelos países incumbentes se enfraquecem. A transição para uma economia de baixo carbono, impulsionada pela emergência climática e pela crescente preocupação com a sustentabilidade, configura precisamente um desses momentos históricos.

A experiência chinesa com os NEVs oferece um exemplo emblemático de como a sustentabilidade pode ser integrada a uma estratégia nacional de desenvolvimento. A partir dos anos 2000, a China passou a incorporar a transição verde como elemento central de seu projeto de modernização econômica, articulando objetivos ambientais com políticas industriais e tecnológicas de longo prazo.

Whitfield e Wuttke (2021) interpretam esse processo como parte da consolidação de um “capitalismo das renováveis”, no qual a transição energética cria oportunidades de *catch-up* para economias subdesenvolvidas. No caso dos NEVs, a estratégia chinesa combinou estímulos à demanda interna, investimentos massivos em infraestrutura de recarga, apoio sistemático à pesquisa e desenvolvimento e exigências regulatórias progressivamente mais rigorosas como o sistema de créditos conhecido como, *New Energy Vehicle Credit Program* (Zhang *et al.*, 2021) – permitindo, a partir deste conjunto de políticas, a aceleração do aprendizado tecnológico das empresas domésticas e o fomento da emergência de líderes globais em segmentos estratégicos da cadeia de valor.

Diante desse conjunto de evidências, é possível interpretar a experiência chinesa como expressão de um padrão de atuação estatal em que sustentabilidade, inovação e desenvolvimento econômico são concebidos de forma integrada. Nesse contexto, a mobilidade elétrica não se limita a uma resposta à crise ambiental, mas se apresenta como um instrumento estratégico de reconfiguração produtiva e de elevação da complexidade industrial.

Ao alinhar a transição verde com objetivos de fortalecimento tecnológico e industrial, a China conseguiu transformar os NEVs em um vetor de dinamismo econômico e reposicionamento nas cadeias globais de valor.

Entretanto, reconhecer o potencial dos NEVs como vetor do desenvolvimento não implica ignorar os desafios e tensões associados a essa trajetória. A própria necessidade de coordenação institucional, a dependência de condições energéticas específicas e os impactos distributivos e territoriais da transição indicam que a sustentabilidade dos NEVs envolve limites e contradições que não podem ser negligenciados. É a análise dessas questões — que extrapolam o argumento positivo do desenvolvimento sustentável — que será desenvolvida no Capítulo 2, dedicado ao balanço crítico dos NEVs no contexto do capitalismo contemporâneo.

2. Balanço e apreciação crítica dos fatores determinantes, limitações e contradições para alcançar as possibilidades e perspectivas benéficas associadas aos NEVs

Este capítulo dedica-se a investigar os fatores e condicionantes para determinar o sucesso na mitigação de impactos ambientais diversos e promoção de desenvolvimento sustentável associados à transição para os NEVs. Nesta direção o objetivo do capítulo é investigar elementos estruturais associados à indústria automobilística e à produção e uso generalizado de NEVs para, a partir disso, avaliar tais condicionantes e limites no alcance dos objetivos desejados.

Para tanto, a primeira subseção dedica-se a investigar os elementos de um arranjo que condicionam as possibilidades de que os NEVs consigam amenizar emissões e demais impactos ambientais de modo a entender em quais cenários isto é de fato possível e em quais cenários isto pode significar uma mudança de perfil ou deslocamento de local principal dos impactos gerados. Já a segunda subseção dedica-se a caracterizar elementos estruturais produzidos por décadas de desenvolvimento da indústria automobilística e uma cultura de automobilidade a ela associada e investigar em que medida uma transição na direção da eletrificação consegue afetar e transformar estes elementos.

2.1 Condicionais e limitações para promoção de sustentabilidade e eficiência ambiental via adoção dos NEVs

Existe uma percepção generalizada de que os NEVs são veículos “ambientalmente benignos”; principalmente os BEVs por zerar emissões na fase de uso, mas também os HEVs e PHEVs por supostamente reduzirem sobremaneira as emissões de uso (Hawkins *et al.*, 2013). Evidentemente que o argumento positivo acerca da fase de uso é limitado e ignora o impacto ambiental embutido na produção e manutenção destes veículos – especialmente infraestrutura de recarga e geração de energia elétrica para os NEVs – que podem compensar ou substituir apenas parcialmente as emissões de escapamentos.

Logo, se faz necessário uma investigação mais aprimorada acerca das condições para que o aumento da participação de NEVs na produção e na frota de veículos constitua, de fato, uma redução dos impactos ambientais causados pelos veículos de passeio e pela indústria automobilística. Com isso, espera-se poder qualificar em que medida se verifica a percepção de benignidade ambiental dos NEVs e em que medida estes veículos são capazes de promover avanços na direção da sustentabilidade em transportes individuais.

Preliminarmente, cabe uma tentativa de quantificar o tamanho da participação das emissões realizadas por veículos automotores rodoviários – principalmente por automóveis e demais veículos de passeio – nas emissões totais de gases de efeito estufa (GEE). Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) o Brasil

emitiu no ano de 2024 cerca 2145 Mt CO₂ eq⁷ das quais 10,3% foram emitidas pelo setor de transportes (SEEG, 2025). Globalmente, em 2021, 13,7% das emissões foram realizadas pelo setor de transportes do total das 49.553 Mt CO₂ eq de acordo com levantamento na *World Resources Institute* (Ge; Friedrich; Vigna, 2024). Além disso, a categoria de transportes rodoviários é responsável por 94% do consumo de energia dentro do setor de transportes no Brasil (Mera *et al.*, 2023).

Indubitavelmente, a categoria “transportes” engloba muito mais do que automóveis e veículos de passeio, mas a expressividade da participação do setor de transportes rodoviários no consumo de energia total do setor brasileiro de transportes lança luz para o tamanho das emissões realizadas individualmente por estas categorias. Portanto, é possível atestar que as emissões realizadas por estes veículos são responsáveis por parcela significativa não só nas emissões realizadas pelo setor de transporte, mas também nas emissões totais de GEEs e, sendo assim, estes veículos têm papel relevante dentro das discussões acerca das necessidades, metas e acordos de reduções de emissões.

O grande problema associado ao NEVs é que a comparação em relação aos ICEVs (*Internal Combustion Engine Vehicles*) aponta a redução de emissões de GEEs na utilização dos veículos, ou seja, nas emissões no escapamento dos veículos, mas em geral ignora as emissões e impacto ambiental realizadas na fabricação destes veículos (principalmente nas baterias) e na geração de energia elétrica para alimentá-los. É evidente que a redução de emissões de escapamentos nas cidades pode ter um efeito benéfico ao melhorar a qualidade de ar urbano e consequentemente a qualidade de vida da população levando à uma menor incidência de problemas respiratórios e de chuvas ácidas. Todavia, é necessário atentar para o risco de que a substituição de ICEVs por NEVs se configure apenas como um deslocamento — espacial ou setorial — dos impactos ambientais, sem que isso implique uma redução efetiva dos danos em escala global.

Nesse sentido, tal transição pode resultar não apenas em uma transferência de responsabilidades, mas também em uma reconfiguração do tipo predominante de impacto ambiental, sem enfrentar, de forma substantiva, os desafios centrais associados à garantia do desenvolvimento sustentável e à proteção do meio ambiente.

Como consequência, entende-se que o potencial de redução nas emissões de GEEs decorrente da substituição de ICEVs por NEVs esteja, em grande medida, condicionado a uma série de fatores locais, como a matriz energética regional; os impactos ambientais associados à produção de combustíveis fósseis e de insumos industriais em determinados países e cadeias produtivas; e a eficiência energética dos veículos e das baterias comercializados em cada contexto. Nesse sentido, torna-se relevante investigar e comparar estudos de ciclo de vida do produto, a fim de avaliar em que condições a sustentabilidade atribuída a essa transição pode não se concretizar integralmente.

O trabalho de Mera *et al.* (2023) apresenta uma análise de ciclo de vida de caráter predominantemente atribucional que combina 2 ciclos de emissões: i) o ciclo de produção do veículo e ii) o ciclo do combustível e da eletricidade. Isso significa que além de emissões geradas na produção, descarte e reciclagem dos veículos e suas peças são contabilizadas as emissões associadas ao uso e manutenção dos mesmos – por exemplo o uso de combustíveis

⁷ Dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) é uma medida internacionalmente convencionada utilizada para comparar as emissões de diferentes GEEs baseada no potencial de aquecimento global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*) de cada um utilizando o CO₂ como denominador comum. O CO₂ eq é obtido multiplicando o GWP de cada GEE pela sua quantidade de emissões e depois somando tudo em unidades de CO₂ eq. Por exemplo, para um período de 100 anos cumulativos o CH₄ (metano) tem um GWP de 28 vezes e o N₂O (óxido nitroso) tem um GWP de 265 vezes (IPCC, 2014).

fósseis e as mudanças indiretas no uso da terra⁸ no caso dos ICEVs; e a produção de energia elétrica e a recarga de baterias no caso dos NEVs. Considerando um ciclo de vida para os veículos de 22 anos e uma quilometragem média acumulada de 228 mil quilômetros avaliam o ciclo do veículo — abrangendo produção, manutenção e reciclagem — e o ciclo energético, que contempla a produção e o uso de combustíveis fósseis, biocombustíveis, eletricidade ou hidrogênio de modo a comparar a emissão de gramas de CO₂ equivalente por quilômetro rodado em cada categoria de veículo. Os resultados em geral são bastante otimistas em favor da adoção de BEVs como estratégia para alcançar as metas de redução de emissões estipuladas no Acordo de Paris. Tomando como referência o segmento dos compactos, em geral os BEVs têm emissões de 55 g CO₂ eq./km ao passo que os ICEVs flex têm emissões de 155 g CO₂ eq./km, o que resulta em uma redução de cerca de 65% nas emissões ao adotar um BEV.

Apesar de indicar uma indiscutível redução de emissões no ciclo de vida para um BEV, o artigo de Mera *et al.* (2023) nos permite levantar três questões fundamentais que questionam a garantia de redução de emissões para os BEVs. A primeira delas é a dependência de uma matriz energética com baixa emissão de CO₂ eq. por MJ gerado. A matriz energética brasileira, considerada relativamente limpa, permite estes resultados favoráveis em favor dos BEVs, mas fica evidente que quanto mais “suja” a matriz energética, menores serão os resultados em favor deste tipo de veículo.

A segunda questão é o uso de combustíveis como o etanol frente à gasolina. Para o caso brasileiro o trabalho em questão indica que a operação exclusiva com etanol pode reduzir as emissões de um ICEV flex em até 31%, enquanto operar exclusivamente com gasolina pode aumentar as emissões em até 20% em relação às médias atuais de um ICEV flex (Mera *et al.*, 2023). Mesmo a adoção exclusiva do etanol ainda não equipara o benefício dos BEVs no caso brasileiro, mas novamente no caso de matrizes menos limpas e melhor eficiência na produção de etanol e no aproveitamento de energia do motor de combustão interna essa balança pode se aproximar.

A terceira questão apresenta-se como a mais incerta e de difícil projeção no longo prazo, incidindo tanto sobre a própria natureza dos veículos NEVs em comparação aos veículos tradicionais de combustão interna quanto sobre as implicações dessa transformação para o seu ciclo médio de vida. À medida que os NEVs passam a incorporar volumes crescentes de tecnologia embarcada e sistemas microeletrônicos, coloca-se o problema de sua caracterização enquanto mercadorias: se permanecem predominantemente vinculados à lógica metalmeccânica ou se se aproximam, de forma crescente, do padrão das mercadorias microeletrônicas e tecnológicas. Esse deslocamento parece ganhar força diante da entrada de empresas oriundas do setor de tecnologia da informação no segmento de NEVs, como *Huawei* e *Xiaomi*.

Nesse contexto, emerge uma preocupação adicional relacionada à durabilidade e ao ciclo de vida desses veículos. À medida que os automóveis se tornam cada vez mais dependentes de componentes microeletrônicos, softwares e atualizações tecnológicas — e menos de estruturas puramente metalmeccânicas —, combinada à rápida substituição por motores e sistemas mais eficientes, há o risco de um encurtamento significativo de seus ciclos de vida. Tal dinâmica levanta questões relevantes acerca dos impactos econômicos, ambientais e produtivos associados à obsolescência acelerada, tensionando as promessas de sustentabilidade frequentemente atribuídas aos NEVs.

Outra contribuição importante é a realizada por Hawkins *et al.* (2013), que fazem um trabalho parecido elaborando uma análise de ciclo de vida comparando BEVs e ICEVs no mercado europeu. É um trabalho que também busca incorporar no ciclo de vida toda sorte de

⁸ O conceito de mudança indireta no uso da terra (ILUC, do inglês *Indirect Land Use Change*) captura o impacto em emissões gerado por uma expansão da área utilizada para agricultura (desmatando áreas remanescentes e liberando grandes quantidades de CO₂ na atmosfera) quando puxado indiretamente por uma demanda para produção de biocombustíveis (Mera *et al.*, 2023).

emissões geradas na produção, uso (incluindo cadeia de combustíveis fósseis e eletricidade), descarte e reciclagem dos veículos. As grandes diferenças em relação ao trabalho de Mera *et al.* (2023) são a seleção de um ciclo de vida útil de 150 mil quilômetros, o uso da matriz energética média europeia e a avaliação dos impactos em outras categorias além das emissões de GEEs como por exemplo potencial de acidificação terrestre e de eutrofização das águas.

Para o impacto em emissões de GEEs, Hawkins *et al.* (2013) apontam uma redução em torno de 20% a 24%, no contexto dos seus ciclos de vida completos, comparando um BEV com um ICEV movido à gasolina. É uma redução bem mais tímida que o percentual de 65% de redução nas emissões encontrado para o caso brasileiro no estudo de Mera *et al.* (2023).

Destacam-se duas considerações apresentadas por Hawkins *et al.* (2013) a partir de testes de sensibilidade. A primeira de que a redução do ciclo de vida para 100 mil quilômetros praticamente equipara as emissões de um BEV e de um ICEV movido à diesel e reduz apenas 9% a 14% em relação às emissões de ICEV movido à gasolina. Ora, isso leva a crer que ciclos de vida menores ou uso de combustíveis ainda mais eficientes que diesel do ponto de vista das emissões de CO₂ como o etanol possa fazer com que não haja real benefício associado aos BEVs. A segunda é que o uso de matrizes energéticas mais sujas como por exemplo uma matriz exclusiva de carvão pode levar à uma maior emissão no caso dos BEVs, ou seja, a vantagem dos BEVs em relação ao ICEVs é fortemente dependente da maneira como é gerada a energia elétrica mais ou menos emissora de GEEs.

Fica evidente que a fase de produção dos BEVs é mais ambientalmente intensiva do que a dos ICEVs, já que por exemplo cerca de metade das emissões de GEEs de um BEVs ocorre na fase de produção. Porém, mais interessante ainda é a avaliação de impacto que Hawkins *et al.* (2013) apresentam sobre categorias além das emissões de GEEs, chamando atenção para três categorias em que os BEVs são mais perigosos: o potencial de toxicidade humana, o potencial de ecotoxicidade da água e o potencial de eutrofização. Isso em geral ocorre devido aos resíduos gerados na produção de cobre e níquel demandados em maior escala para a produção das baterias dos BEVs. De maneira simplificada, as baterias hoje são formadas por uma combinação lítio-íon compostas de um ânodo constituído por grafite e envolto de alumínio e um cátodo composto desta liga de lítio-íon envolto por cobre, e uma das combinações mais comuns, a NMC 111, é composta de lítio, níquel, manganês e cobalto (Gauto, 2021).

Como consequência isso levanta uma outra questão acerca dos impactos futuros da mineração e do processamento destes materiais já que à medida que uma maior demanda possa ir esgotando as reservas de mais fácil acesso, levando à uma maior escassez, preços mais elevados e maiores impactos ambientais para sua exploração. A grande problemática que aqui se coloca seria, portanto, transferir o problema das emissões de GEE para um outro impacto ambiental apenas mascarando temporariamente o impacto da automobilidade sobre a crise climática.

Outra abertura de análise que faz necessária é a dos híbridos HEVs e PHEVs já que em certa medida representam um avanço no sentido da eletrificação da frota, mas, por outro lado, reproduzem a dependência de combustíveis fósseis, configurando uma relativa dicotomia. O senso comum compartilha o entendimento de que esses veículos apresentam as mesmas vantagens dos veículos puramente elétricos; todavia, na prática, eles incorporam impactos combinados de um veículo elétrico e de um veículo à combustão, o que pode resultar em uma contribuição pouco significativa para a redução dos impactos ambientais. Como demonstram Mera *et al.* (2012) os HEVs apresentam reduções de GEEs em torno de 14% e os PHEVs reduções em torno de 3% – em relação à um ICEV flex – para as características atuais do mercado brasileiro. Portanto, isso leva a crer que os híbridos, apesar de incorporarem o mesmo simbolismo sustentável dos elétricos, podem significar benefícios marginais e limitados em termos da redução do impacto ambiental dos veículos e até não oferecerem nenhum benefício

dependendo do tipo de combustível fóssil utilizado e da distribuição de potência entre os motores elétricos e à combustão.

Portanto, fica escancarado que o potencial impacto de um NEV não necessariamente é menor que de um ICEV, pois isso vai depender de uma série de fatores como o tipo de combustível utilizado nos ICEV e as emissões embarcadas na produção destes combustíveis, a intensidade de carbono da matriz energética bem como a eficiência de distribuição desta rede elétrica, de como será a eficiência e a distribuição de potência dos motores elétricos e à combustão no futuro, de como será a eficiência das baterias e as emissões embarcadas na sua produção e do ciclo de vida médio dos veículos.

Por fim, há que se considerar o aumento na quantidade da frota mundial de veículos. Em 2015 havia cerca de 1,1 bilhão de veículos em circulação; em 2023, esse número já era de cerca de 1,47 bilhão, e a expectativa é que chegue a 2 bilhões até 2040 (Smith, 2016; Stumpf, 2023). Certamente, mesmo que a longo prazo se concretizem benefícios ambientais evidentes em favor dos NEVs, quando comparados aos ICEVs, a substituição da frota já existente e o aumento da quantidade de veículos em circulação pode compensar negativamente esses benefícios, ou seja, há a incerteza de que benefícios relativos do ponto de vista de cada veículo individualmente se concretizem como benefícios do ponto de vista absoluto e combinado para a frota como um todo.

2.2 O pano de fundo da automobilidade: aspectos estruturais e limitações associadas a eletroautomobilidade

A mobilidade urbana contemporânea é fortemente marcada pela dependência do veículo individual motorizado como elemento principal de deslocamento e acesso aos serviços e locais de reprodução material. De certo modo, nossas ruas e cidades são planejadas e orientadas em favor do deslocamento destes veículos, isto é, um dos objetivos principais do urbanismo contemporâneo é evitar congestionamentos e acidentes e viabilizar as melhores rotas e condições para o deslocamento dos veículos automotores. Todavia, é evidente que este é um modelo que enfrenta uma série de desafios quando é escalado sendo inviável de ser universalizado. Um dos mecanismos clássicos é o de reprodução circular de congestionamentos, que vai pressionar a construção de novas estradas e faixas de rodagens, mas depois estas reforçam o estímulo ao uso do carro e isso recria novos congestionamentos (Matiolli *et al.*, 2020). Resta, portanto, a necessidade de investigar se os NEVs reconfiguram ou interferem de alguma maneira esta complexa relação dos veículos com a sociedade capitalista contemporânea.

O argumento principal neste aspecto é de que os NEVs não criticam ou contestam os elementos centrais desta relação. Em linhas gerais, a literatura reforça que os NEVs não se propõem a atacar as questões que tornam a indústria automobilística problemática do ponto de vista da sustentabilidade por si só e que estes podem, ainda, ocultar novos problemas associados ao seu desenvolvimento (Matiolli *et al.*, 2020; Brand; Wissen, 2021). Na prática, os NEVs apresentam uma “roupagem sustentável” para a indústria automobilística, mas são uma solução proposta de dentro do setor que não ataca o cerne da problemática da dependência do automóvel e, portanto, não pode ser capaz de resolver de maneira sistêmica os problemas estruturais desta grande indústria. Logo, se faz necessário examinar melhor essa relação simbiótica entre capitalismo e indústria automobilística que produz uma relação de deslocamento humano dependente do automóvel, cunhada de “automobilidade”.

A ideia de automobilidade parte do reconhecimento de que a dependência urbana do automóvel e a centralidade da indústria automobilística e do veículo automotor rodoviário particular dentro do padrão de consumo difundido nos centros desenvolvidos da economia capitalista global é produto de um processo histórico e material, alcançado através de disputas

e *lobbies* que selecionaram em favor desta trajetória de desenvolvimento tecnológico e a fortaleceram através de um processo de dependência cada vez maior desta trajetória (“*path-dependence*”).

Mattioli *et al.* (2020) demonstram de maneira bastante compreensível como isto vai além de uma inércia de hábito de consumo já que a automobilidade envolve um regime socioeconômico complexo e interligado através de um “sistema de provisão” que conecta a indústria automobilística, a infraestrutura viária construída, o modelo de urbanização geograficamente difuso e disperso, a precarização do transporte público e uma cultura de consumo “carrocentrada”.

Central nesta dinâmica é a produção de uma subjetividade automotiva compatível com as dinâmicas vigentes do modo de produção capitalista, resultando em um sujeito extremamente individualista e que só realiza sua liberdade e seu acesso aos meios de reprodução material na potência máxima através da propriedade individual de um veículo (Brand; Wissen, 2021). Vale recordar que o automóvel surge como bem de luxo e apenas com o desenvolvimento do Fordismo e uso de políticas de difusão popular que ele se torna um bem massificado. Correspondentemente, a subjetividade automotiva se metamorfoseia para acompanhar estas transformações e fetichiza relações de produção do espaço urbano: as ruas se tornam espaços de movimentação de veículos e não mais de interação humana, deslocando progressivamente os pedestres com intuito de não atrapalhar o tráfego. Chega a ser cômico como a própria massificação do automóvel recoloca as limitações para acesso a liberdade e poupança de tempo que deveria fornecer; à medida que a massificação gera congestionamentos isso ativa o fluxo de reprodução circular de congestionamentos, criando um efeito insustentável do ponto de vista da degradação ambiental.

Também é importante reconhecer como esta subjetividade incorpora relações desiguais de classe e gênero dentro da dinâmica capitalista. Como o uso do carro (e a propriedade de veículos) cresce desproporcionalmente com a renda, todo o gasto, incentivo e infraestrutura financiados pelo Estado beneficiam desproporcionalmente os mais ricos e isso reforça a desigualdade social (Brand; Wissen, 2021). Se isto não bastasse, frequentemente, o automóvel é vendido como produto cultural símbolo de status, respeitabilidade e um estereótipo de masculinidade agressiva e sexualizada. Isso tudo, produz um espaço urbano espacialmente segregado e dependente do carro: separa-se a classe média em espaços suburbanos – com pouco acesso à infraestrutura e ao transporte público – das áreas centrais da cidade – onde estão localizados os empregos e o comércio. Conforme apontam Brand e Wissen (2021) a combinação destes elementos reforça uma separação de gênero já que este modo de organização urbana incompatibiliza a conciliação do trabalho urbano assalariado localizado no centro das cidades com o trabalho não remunerado do cuidado localizado nas casas suburbanas, pois é um sistema de transporte pensado para homens com trabalhos assalariados em tempo integral se deslocando de carro.

É certo que tamanho arranjo carrega consigo contradições latentes e que, portanto, a reprodução e reconfiguração desta subjetividade da automobilidade necessita de alguma forma de legitimação política e econômica. É aí que entra em cena a construção histórica de um poderosíssimo *lobby* que concatena outros setores gigantes com estreita relação com o automobilístico, como do petróleo e da mineração, reforçando o *path-dependence* em favor da automobilidade. Mattioli *et al.* (2020) investigam como este poderoso *lobby* se aproveita de retóricas associadas a promoção do crescimento econômico, do consumo popular, do desenvolvimento regional, da solução dos problemas urbanos de congestionamentos e da “expertise técnica” para naturalizar o apoio ao setor dentro do aparato dos Estados nacionais. Na prática, o fato de a indústria automobilística ser grande o suficiente para impactar substancialmente o volume de produção industrial e o próprio PIB das economias a eleva a um

status de “grande demais para quebrar” garantido sua legitimidade política (Matiolli *et al.*, 2020).

Finalmente, é preciso discutir como a construção histórica de uma automobilidade deste modo encontra a etapa de capitalismo neoliberal. Isso se expressa através do design dos automóveis cada vez mais dominados pelos SUVs. Como demonstram Brand e Wissen (2021) os SUVs são uma categoria de automóvel dispendiosa em recursos e que emite mais GEEs que carros compactos, são verdadeiros “caminhões tanque bebedores de gasolina”. Sua progressiva difusão por todos os mercados ao redor do globo expressa a tendência de universalização da automobilidade neoliberal: sendo grande e robusto, o SUV apresenta-se como maneira de defender-se e isolar-se dos riscos externos e do espaço público colocando o condutor em uma posição individualista inatacável. A contrapartida dessa individualidade exacerbada recai sobre os demais indivíduos fazendo com que as ruas fiquem cada vez mais inseguras e perigosas para os pedestres e condutores de veículos não-SUVs em uma eventual colisão com estes modelos. Logo, o condutor de SUV expressa o sujeito neoliberal dentro da automobilidade: extremamente individualista e que acessa seus ganhos materiais próprios sem se importar se isso ocorre às custas dos demais indivíduos.

Uma vez explicitada a complexidade das relações inerentes à automobilidade, observa-se que a emergência dos NEVs, em contraposição aos veículos tradicionais de combustão interna, não promove uma contestação substancial aos fundamentos que estruturais da automobilidade no capitalismo contemporâneo. Uma substituição de ICEVs por NEVs pode ao máximo deslocar o locus de degradação ambiental produzido pela automobilidade para longe dos centros urbanos, mas na prática reproduz a dependência do automóvel, a subjetividade produzida pela indústria do automóvel e todas desiguais relações sociais a ele associadas.

Brand e Wissen (2021) escancaram como a simples eletrificação das frotas é muito mais complexa do que a mera geração de eficiência ecológica; é preciso garantir que essa eficiência não se converta em demanda adicional aumentando as viagens de carros ou deslocando-se para gastos ainda mais poluentes como por exemplo viagens de avião. É neste sentido que Matioli *et al.* (2020) definem a emergência de NEVs como um “*green fix*”, isto é, uma resposta interna apresentada pelo regime automotivo como uma tentativa de compatibilizar o núcleo estrutural deste regime com a crise ecológica.

Na prática há uma mudança de base tecnológica da combustão para a eletricidade que reproduz a dependência do veículo individual para deslocamento e mobilidade humanas, reproduz os recortes de classe e gênero produzidos por esta subjetividade, reproduz um design de veículos compatível com o sujeito neoliberal extremamente individualista e reproduz o poder político do *lobby* do automóvel. Mais ainda, os NEVs legitimam politicamente – pelas mesmas vias historicamente constituídas – o uso do aparato estatal em favor do setor com objetivo de modernizar as vias urbanas, construir infraestrutura de carregamento para os novos veículos e utilizar políticas industriais para desenvolver a cadeia produtiva do setor.

Também se reproduz uma relação centro-periferia necessária para que um dos polos do sistema seja capaz de absorver os benefícios da modernização ecológica da automobilidade. Se esta modernização não resolve os problemas estruturais da automobilidade, ela no limite oculta e amplia a distância dos problemas de modo a garantir a reprodução deste modo de vida. Sob a automobilidade neoliberal movida à combustão o centro foi progressivamente adotando modelos diferenciados de veículos, os SUVs, e a periferia ficou relegada aos modelos pequenos e compactos. Quando a universalização da automobilidade neoliberal encontra limites e contestações – a partir da problemática ambiental e da redução das vantagens relativas individuais – ela tem de transformar-se e gerar um novo modelo. Já sob este novo modelo de automobilidade eletrificada (ainda neoliberal) o centro deve absorver os benefícios de redução de emissões urbanas e a periferia deve absorver os impactos ambientais da produção dos novos

motores elétricos e baterias sem, contudo, acessar de início em seus mercados locais os benefícios do uso destes veículos (Brand; Wissen, 2021).

Com efeito, a emergência de NEVs cria um fôlego adicional para a automobilidade saturada pelos efeitos latentes da dependência de combustíveis fósseis que reconfigura a própria automobilidade vigente na medida precisa para não alterar as bases materiais sobre as quais esta se sustenta. Uma possível transição para veículos elétricos e híbridos oculta, portanto, propositalmente os possíveis problemas de eficiência ecológica associados às condições como o grau de dependência de carbono das matrizes energéticas, oculta também o benefício apropriado pelos centros do sistema em favor de deslocar os impactos ambientais da mineração e produção das baterias para as periferias e reproduz o modelo de produção do espaço urbano mercantilizado e dependente do automóvel. Logo, sem afetar essas questões mais profundas os NEVs no máximo podem se apresentar como respostas e melhorias locais; sem, contudo, apresentar a capacidade de responder à crise climática em escala sistêmica e global.

Conclusão

À luz das tradições estruturalista e evolucionista mobilizadas ao longo do artigo, a emergência climática pode ser compreendida como um momento de inflexão histórica que tensiona os limites do paradigma tecnológico intensivo em carbono que sustentou o padrão de crescimento do século XX.

Tal inflexão reorienta a direção do progresso técnico, redefine critérios de eficiência e aceitabilidade social e, ao fazê-lo, reabre a disputa por liderança em trajetórias tecnológicas ainda não plenamente estabilizadas. Nesse contexto, a pressão por descarbonização expõe o risco de *lock-in* para firmas e países incumbentes comprometidos com ativos, competências e redes ligadas à economia fóssil, ao mesmo tempo em que cria janelas de oportunidade para estratégias de *catching up* e, potencialmente, de *leapfrogging* em economias de industrialização tardia.

Os Veículos de Nova Energia figuram, nesse sentido, como expressão dessa transição no interior da indústria automobilística, deslocando o núcleo tecnológico dominante — o motor de combustão interna — e sinalizando a reorganização da cadeia de valor em torno de novos segmentos dinâmicos como baterias, eletrônica de potência, *software* e integração com infraestrutura energética. Por isso, mais do que uma substituição incremental, a eletrificação tem implicações estruturais sobre capacidades industriais, padrões de concorrência e hierarquias internacionais.

No plano das promessas que legitimam social e politicamente essa rota, os NEVs são associados à descarbonização do transporte e à maior eficiência energética do motor elétrico frente ao motor à combustão, o que associado à expectativa de redução de externalidades negativas urbanas — em especial poluição local e ruído — tende a ampliar sua aceitação pública e a capacidade de mobilização de políticas de incentivo.

Ao mesmo tempo, o avanço dos NEVs como trajetória relevante depende de coordenação institucional, investimentos de longo prazo e convergência entre políticas industriais, energéticas, urbanas e ambientais, conectando-se ao fortalecimento de um Sistema Nacional de Inovação. O caso chinês é ilustrativo: apesar de uma inserção tardia na indústria automobilística tradicional, a coordenação estatal e os instrumentos de política permitiram uma inserção pioneira e acelerada nos NEVs, evidenciando como janelas de oportunidade podem ser apropriadas quando combinadas a planejamento, seleção de trajetórias e construção deliberada de competências.

Este enquadramento permite situar os NEVs como vetor potencial de desenvolvimento sustentável, mas também exige cautela analítica: os benefícios ambientais e sociais da

eletrificação não decorrem automaticamente da transição tecnológica. Assim, a avaliação do seu potencial requer deslocar o foco da promessa geral para as condições concretas de sua realização. É nesta direção que o presente trabalho buscou evidenciar que a concretização deste potencial, em especial as suas capacidades de mitigação de impactos ambientais globais, dependem de um fino arranjo composto de diversas condicionalidades e fatores locais.

Sob esta ótica, é possível compreender que o potencial de redução global nas emissões de GEEs pela eletrificação de veículos depende de fatores como: i) intensidade de carbono e eficiência da matriz energética; ii) eficiência comparada entre motores elétricos e motores a combustão; iii) distribuição de potência entre estes dois motores no caso dos híbridos; iv) intensidade de carbono do tipo de combustível fóssil (gasolina, diesel, etanol) disponível e utilizado em cada local; e, principalmente, v) as emissões embarcadas na etapa de produção dos NEVs.

Além disso, a eletrificação pode implicar um deslocamento do perfil dos impactos ambientais na cadeia produtiva, ao invés da efetiva eliminação. Afinal, uma melhoria em termos de emissões de GEEs não impede que novos impactos ambientais colaterais se acentuem. Nesta direção os NEVs podem carregar novas questões associadas tanto aos fatores ambientais quanto aos fatores econômicos de sua universalização. Do lado dos fatores ambientais estão os riscos de maior poluição verificados tanto para águas e mananciais quanto para o solo e descarte de resíduos, associados às etapas de produção dos NEVs, suas baterias e à mineração. Do lado dos fatores econômicos estão elementos associados ao encurtamento do ciclo de vida dos veículos, aos impactos da renovação e crescimento da frota global de veículos e à escassez dos minerais críticos para produção de baterias.

Paralelamente, evidenciou-se a existência de elementos estruturais ligando a indústria automobilística a uma automobidade dependente do automóvel que reproduz relações de poder e limitações estruturais para a promoção da sustentabilidade no setor. São relações historicamente determinadas que estabeleceram a centralidade de veículo individual como elemento de deslocamento humano e uma cultura do carro e de um consumismo a ela associado que reproduz desigualdades sociais e estereótipos machistas.

Na prática, existem grandes barreiras para que a eletrificação dos veículos transforme e questione substancialmente estas relações e aspectos estruturais. Mais preocupante ainda é o fato de que, conforme demonstrado, a roupagem benigna associada aos NEVs é capaz de ocultar esses impasses sugerindo que existe uma garantia do endereçamento da questão ambiental e da solução destes impasses setoriais. Como consequência verifica-se que é produzida uma relação de consumo fetichizada. Esta relação é fetichizada pois carrega consigo um simbolismo ambiental positivo associado aos novos tipos de veículos, mas que distancia mais ainda os consumidores dos problemas materiais da automobidade – agora que a maior parte dos impactos dos automóveis não se apresenta no uso dos veículos, mas oculta-se e concentra-se nas etapas de sua produção – e, adjuntamente, minimiza o fato de que nem existe a garantia de que a questão ambiental é obrigatoriamente endereçada.

Em suma, o artigo compreende que a emergência dos NEVs no setor automobilístico é atravessada por tensões: ao mesmo tempo em que abre possibilidades, também produz limites e efeitos colaterais. Apesar das limitações e fatores fundamentais para garantir ganhos materiais em termos de vista do endereçamento da questão ambiental é perfeitamente possível que estes ganhos se concretizem justamente quando combinados com o que permite que os NEVs abram janelas de oportunidade para o desenvolvimento sustentável em economias periféricas: coordenação e planejamento estatal direcionando recursos, selecionando trajetórias e construindo capacidades sociais e instituições bem-preparadas.

Investigar as limitações e aspectos estruturais dos NEVs e da automobidade contemporânea é, sem dúvidas, um tema controverso, porém necessário para avançar justamente nas limitações que a produção de artigos como este encontra atualmente. Em

especial, é possível reconhecer que a recência do tema limita o acesso à bases de dados e à produções acadêmicas maduras e que há a necessidade de que avaliações acerca do desenvolvimento sustentável incorporem, sempre, elementos interdisciplinares, o que extrapola o debate puramente econômico.

Referências bibliográficas

BRAND, U.; WISSEN, M. Automobildade imperial. In: BRAND, U.; WISSEN, M. **Modo de vida imperial: Sobre a exploração de seres humanos e da natureza no capitalismo global**. Rio de Janeiro: Editora Elefante, 2021. p. 201-230.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMAD). **Nosso Futuro Comum**. 2. ed. Rio De Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991. p. 46-71.

DOSI, G. **Technological paradigms and technological trajectories**. Research Policy, Amsterdam, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982. DOI: 10.1016/0048-7333(82)90016-6.

EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY (EAFO). **European Union (EU27), 2026: road – reports by country**. Disponível em: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>. Acesso em: 2 fev. 2026.

FREEMAN, C. **Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan**. Londres: Pinter Publishers, 1987.

GE, Mengpin; FRIEDRICH, Johannes; VIGNA, Leandro. Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector. **World Resources Institute Insights**, 5 dez. 2024. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>. Acesso em: 14 jan. 2026.

GAUTO, M. As emissões invisíveis dos carros elétricos. **Ensaio Energético**, 27 set. 2021. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/as-emissoes-invisiveis-dos-carros-eletricos/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

GILL, I.; KHARAS, H. **An East Asian renaissance: ideas for economic growth**. Washington, DC: World Bank, 2007. ISBN 978-0-8213-6747-6. DOI: 10.1596/978-0-8213-6747-6.

HAWKINS, T. R. *et al.* **Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles**. Journal of Industrial Ecology, v. 17, n. 1, p. 53–64, 2013. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532. x.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 2 fev. 2026

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 2 fev. 2026

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 2 fev. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Genebra: IPCC, 2023. p. 1-34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Genebra: IPCC, 2014. p. 1-156. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: 06 fev. 2026.

LEE, K. **Schumpeterian analysis of economic catch-up: knowledge, path-creation, and the middle-income trap**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

MATTIOLI, G. et al. The Political Economy of Car dependence: a Systems of Provision Approach. **Energy Research & Social Science**, v. 66, p. 101486, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620300633>. Acesso em: 29 dez. 2025.

MERA, Z. *et al.* **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil**. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/publication/comparacao-das-emissoes-de-gas-ao-longo-do-ciclo-de-vida-de-motores-de-combustao-flex-e-eletricos-veiculos-de-passageiros-brasil-oct23/>. Acesso em: 2 fev. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). What is Sustainable Development? **United Nations**, 8 ago. 2023. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2023/08/what-is-sustainable-development/>. Acesso em: 16 mar. 2026.

PEREZ, C.; MAZZUCATO, M. **Innovation as growth policy: the challenge for Europe**. In: FAGERBERG, J.; LAESTADIUS, S.; MARTIN, B. R. (ed.). **The Triple Challenge for Europe**. Oxford: Oxford University Press, 2015. p. 229-264. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198747413.003.0009.

PIGOU, A. C. **The Economics of Welfare**. Londres: Macmillan, 1920.

SCHUMPETER, J. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. Tradução de Maria Sílvia Possas. São Paulo: Nova Cultural, 1997 [1912].

SILVEIRA, J. H. P (org.). **Sustentabilidade e Responsabilidade Social**. 1. ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2017. v. 3

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG) SEEG. **SEEG Brasil**, 2026. O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) oferece dados em tempo real, que apoiam a transformação necessária para enfrentar os desafios globais que afetam todas as regiões brasileiras. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

SMITH, M. N. The number of cars worldwide is set to double by 2040. **World Economic Forum**, 22 abr. 2016. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2016/04/the-number-of-cars-worldwide-is-set-to-double-by-2040/>. Acesso em: 16 jan. 2026

STERN, N. **The Economics of Climate Change: The Stern Review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

STUMPF, R. Here's About How Many Cars Are There in The World in 2023. **The Drive**, 17 out. 2023. Disponível em: <https://www.thedrive.com/guides-and-gear/how-many-cars-are-there-in-the-world>. Acesso em: 16 jan. 2026.

WHITFIELD, L.; WUTTKE, T. **Opportunities for latecomer technological catch-up in the era of renewables capitalism: possible pathways out of the periphery**. *Development and Change*, v. 56, n. 4–5, p. 783–812, 2025. DOI: 10.1111/dech.70016.

ZHANG, H. *et al.* **Effect of Chinese Corporate Average Fuel Consumption and New Energy Vehicle Dual-Credit Regulation on Passenger Cars Average Fuel Consumption Analysis**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Basel, v. 18, art. 7218, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18147218.