A IA nos transportes



Cathy Wu

Professora associada | MIT LIDS, CEE e IDSS

Leituras prévias

- Panorama do setor de transportes diante da mudança climática
  - Jaramillo, Paulina, et al. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of *Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Chapter 10: Transport). IPCC, 2023. (IPCC Executive Summary)*
- IA para os transportes
  - Transportation Research Board Executive Committee, Transforming Transportation: *Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation . Washington, D.C.: National Academies Press, 2026. doi: 10.17226/29350. (PDF)*
- IA para o clima (foco em transportes)
  - Sandalow, David B. et al., Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Chapter 6: Road Transport), 2nd Ed. Academic Commons, 2024. (PDF)
  - D. Rolnick et al., “Tackling climate change with machine learning” (Section 2: Transportation), Jun. 2019. Available: http://arxiv.org/abs/1906.05433v2

Objetivos de aprendizagem

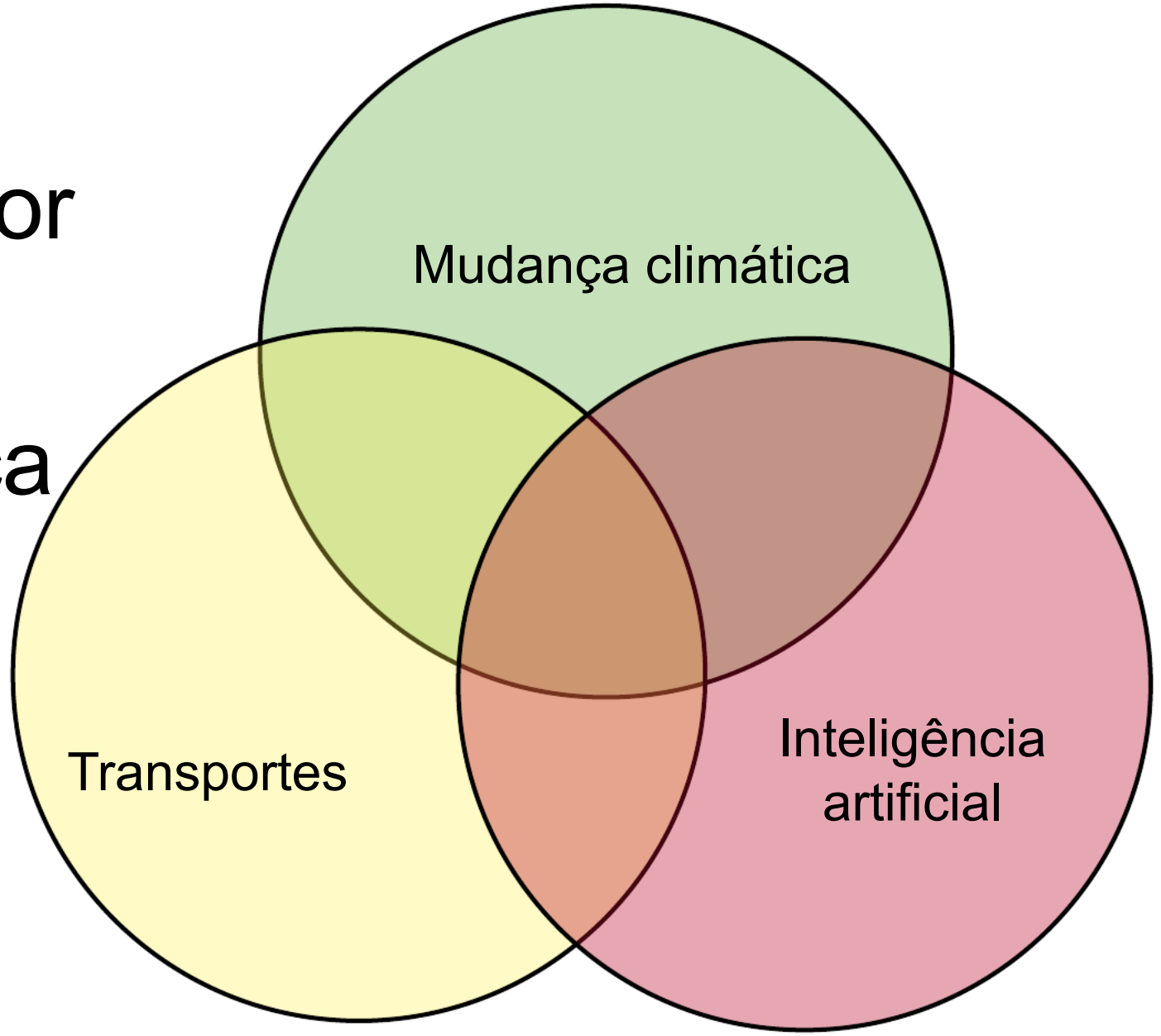
Esta aula busca esclarecer as seguintes questões:

- Por que é difícil descarbonizar os transportes?
- Quais intervenções são importantes para a mitigação?
- Onde a IA realmente ajuda, e onde é uma distração?
- Quais são os riscos éticos e de equidade das estratégias de mitigação?

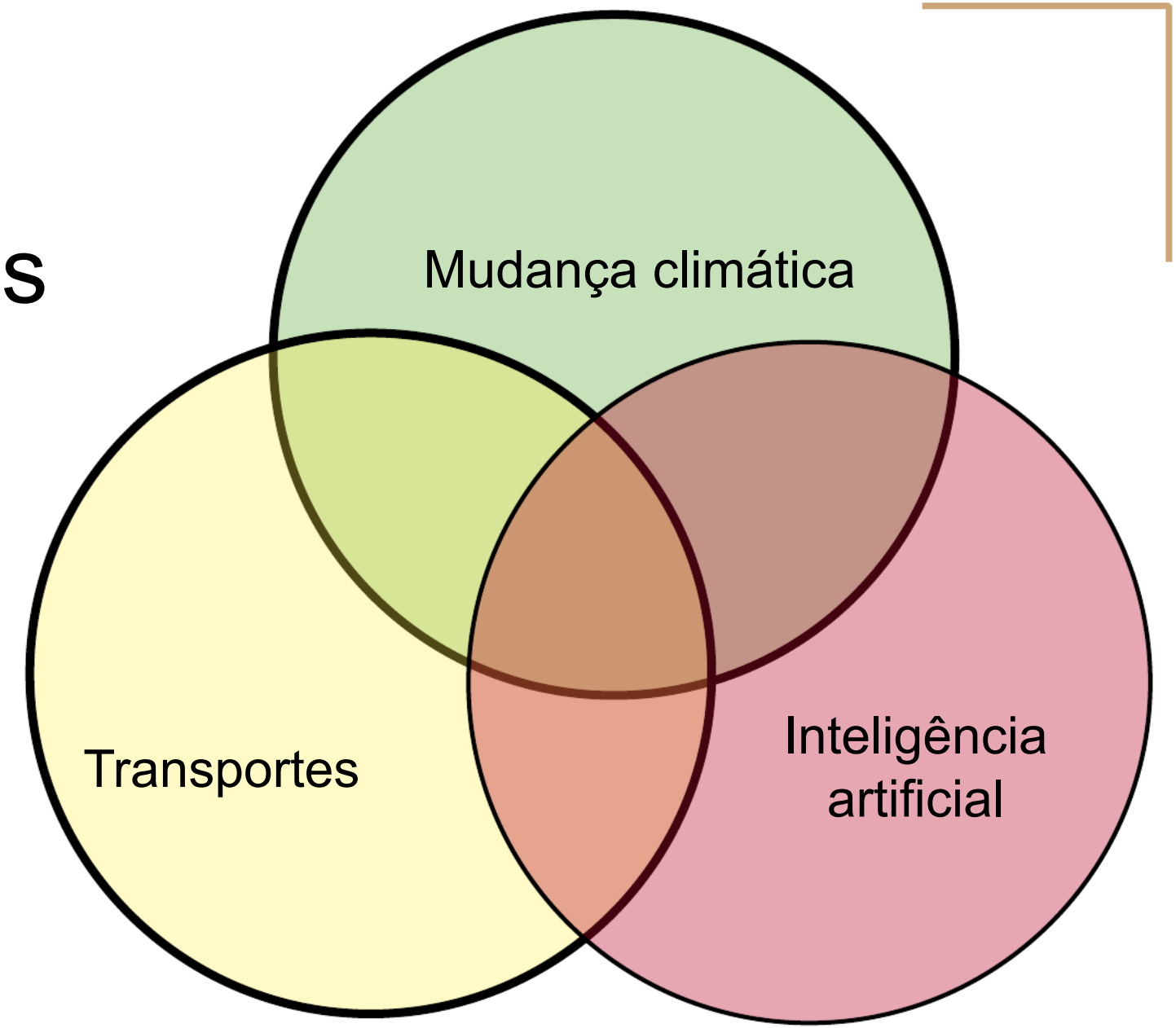
Roteiro

- Panorama do setor
  - Emissões dos transportes: retrato e metas
  - Por que é difícil descarbonizar os transportes
  - Arcabouço de descarbonização
  - Panorama da IA nos transportes
  - IA para a mitigação da mudança climática nos transportes
- Aprofundamento
  - Melhorar: IA para a eletrificação
  - Mudar: IA para a mudança modal
  - Melhorar: IA para a eficiência dos transportes
- Considerações finais
  - Síntese, pontos de entrada e próximos passos

Panorama do setor Transportes, mudança climática e IA



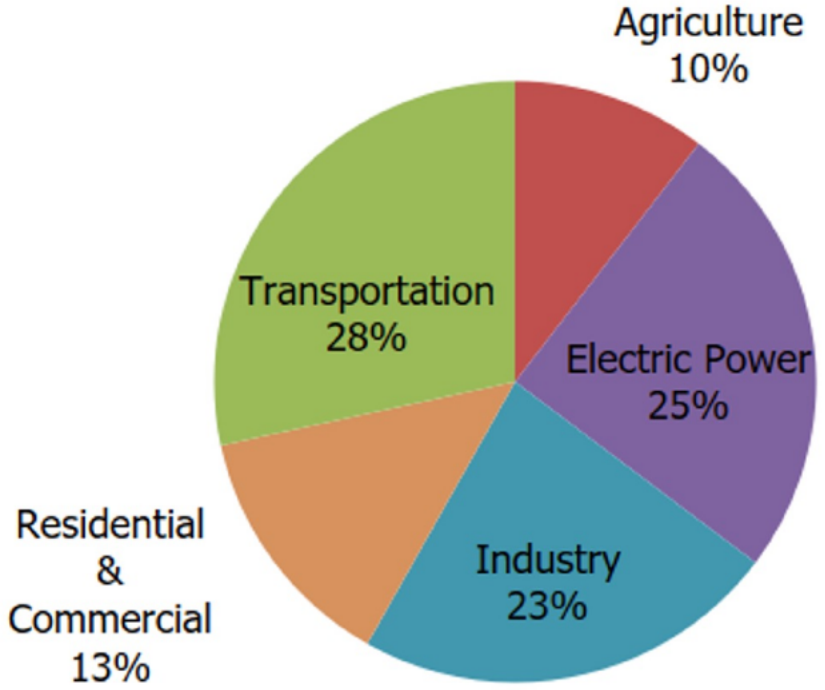
Emissões dos transportes: retrato e metas



Estados Unidos: retrato e metas de GEE

- Metas do Acordo de Paris [1]
  - Redução de 45% em relação a 2010 até 2030
  - Zero líquido até 2050
- Estados Unidos [2]
  - Pico nacional de GEE em 2005
  - Meta: redução de 50-52% em relação a 2005 até 2030
  - 2025: GEE 18% abaixo de 2005.
- Os transportes são o maior setor emissor de GEE nos EUA [3]

Emissões totais de GEE dos EUA por setor econômico em 2022



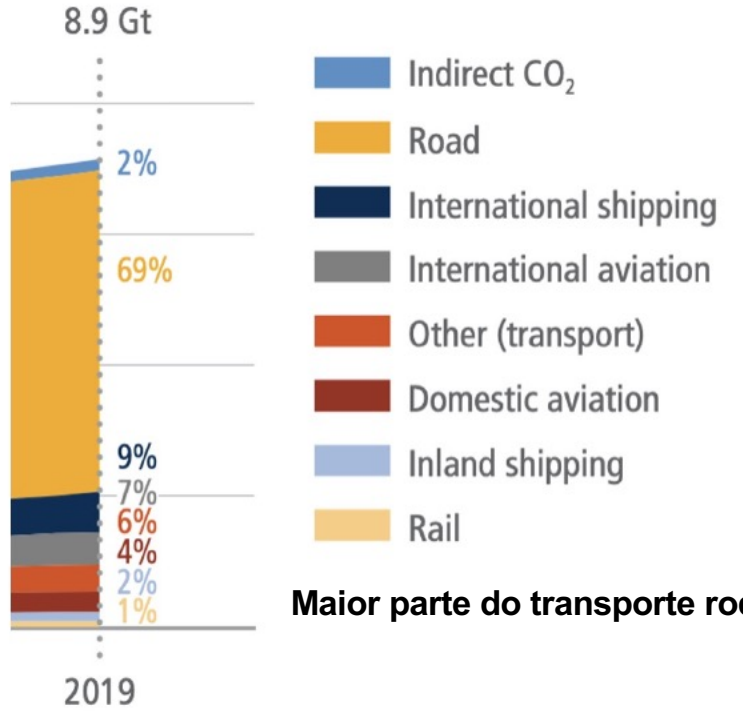
Fonte: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks, US EPA, 2026.

[1] Rogelj, J., D. et al, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 93-174, doi:10.1017/9781009157940.004.
[2] U.S. Department of State. (2021). The United States of America's Nationally Determined Contribution: Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2030 Emissions Target. Submitted to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) in 2021.
[3] "Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks." US EPA, 10 June 2026, url .

Contribuição do setor de transportes para a mudança climática



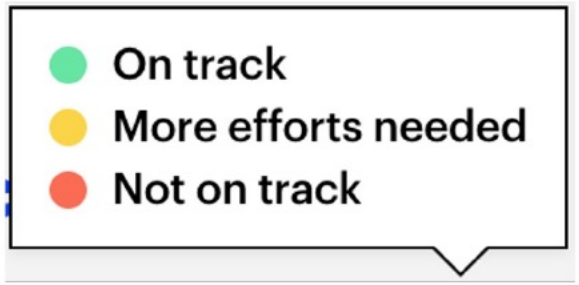
23% das emissões globais de CO_2 ligadas à energia, em alta



Maior parte do transporte rodoviário

Jaramillo, P., et al., 2022: Transport. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157926.012

Como estamos indo?



Tracking Transport

Not on track

In 2022, the rebound in passenger and cargo transport activity following the coronavirus (Covid-19) pandemic led to a 3% increase in transport CO_2 emissions compared to the previous year. Transport emissions grew at an annual average rate of 1.7% from 1990 to 2022, faster than any other end-use sector except for industry (which also grew at around 1.7%). To get on track with the Net Zero Emissions (NZE) by 2050 Scenario, CO_2 emissions from the transport sector must fall by more than 3% per year to 2030. Strong regulations and fiscal incentives, as well as considerable investment in infrastructure to enable low- and zero-emission vehicle operations, will be needed to achieve these emissions reductions.

- **Transport**
- **Cars and Vans**
- **Trucks and Buses**
- **Rail**
- **Aviation**
- **International Shipping**
- **Electric Vehicles**

Ver: relatório de 2026

Tracking Transport. International Energy Agency (IEA), 2023

Emissões associadas aos transportes (as definições importam)

- “Setor de transportes” = emissões operacionais
  - Emissões de GEE pelo escapamento
- Excluídas: emissões associadas aos transportes, incluindo o setor industrial (emissões incorporadas)
  - Fornecimento de combustível e eletricidade: extração/refino de petróleo, produção de hidrogênio, geração de eletricidade.
  - Ciclo de vida dos veículos: fabricação, baterias, manutenção, descarte/reciclagem.
  - Ciclo de vida da infraestrutura: estradas, pontes, ferrovias, aeroportos, portos, concreto, asfalto, aço.
  - Efeitos do uso do solo: espraiamento, estacionamento, tráfego induzido, viagens mais longas.
  - Efeitos digitais/da automação: computação, sensores, data centers, reposicionamento vazio, tráfego induzido.

Por que é difícil descarbonizar os transportes

Inúmeros mecanismos de inércia e resistência:

- **A demanda cresce com a renda, a urbanização e o comércio eletrônico;**
- **As viagens dependem do uso do solo, da moradia, do emprego e da logística**
- **Os ativos se renovam devagar (décadas): veículos, vias, garagens, portos, carregadores, redes**
- **As decisões são fragmentadas entre famílias, empresas, cidades, concessionárias e governos**
- **Benefícios e danos são distribuídos de forma desigual**
- **Ganhos de eficiência podem gerar mais viagens, mais km ou viagens mais longas (paradoxo de Jevons)**

Diferentes sistemas de transporte têm estruturas de decisão diferentes:

Fator	**Transporte de passageiros**	**Carga / transporte pesado**
Principal gargalo	Uso do solo + opções de mobilidade → custo/conveniência → comportamento	Densidade energética + logística → custo operacional
Estrutura de decisão	Bilhões de famílias e viajantes	Menos empresas, frotas, embarcadores, transportadoras, portos
Caminho da eletrificação	Mais fácil para viagens leves	Mais difícil para pesados e longas distâncias
Risco de demanda induzida	Viajar mais barato/fácil → mais km rodados	Logística/bens mais baratos → mais carga

A descarbonização não é o único objetivo (multiobjetivo)

Reflita: esses objetivos competem ou se complementam? Até que ponto podem se alinhar?

Objetivos dos transportes, sem ordem específica:

- Descarbonização
- Acesso
- Acessibilidade financeira
- Mobilidade
- Segurança viária
- Eficiência / custo
- Saúde pública
- Conforto / habitabilidade
- Qualidade do ar
- Segurança pública
- Privacidade
- Resiliência
- Segurança energética
- Economia local

Arcabouços de descarbonização

Lente 1: arcabouço Evitar-Mudar-Melhorar (ASI)

Evitar: reduzir os km rodados

- uso do solo compacto,
- teletrabalho,
- encadeamento de viagens,
- reforma do estacionamento,
- pedágio urbano,
- consolidação de carga.

Mudar: transferir viagens de modos mais emissores para modos menos emissores

- planejamento multimodal e navegação (a pé, bicicleta, trem, transporte público),
- desenho de ruas completas,
- transporte intermodal,
- prioridade a veículos de alta ocupação,
- mobilidade como serviço (MaaS).

Melhorar: reduzir as emissões por quilômetro

- eletrificação,
- veículos eficientes,
- condução econômica e anti-marcha lenta,
- gestão do tráfego,
- programas de sucateamento de veículos poluentes,
- combustíveis mais limpos e de baixo carbono.

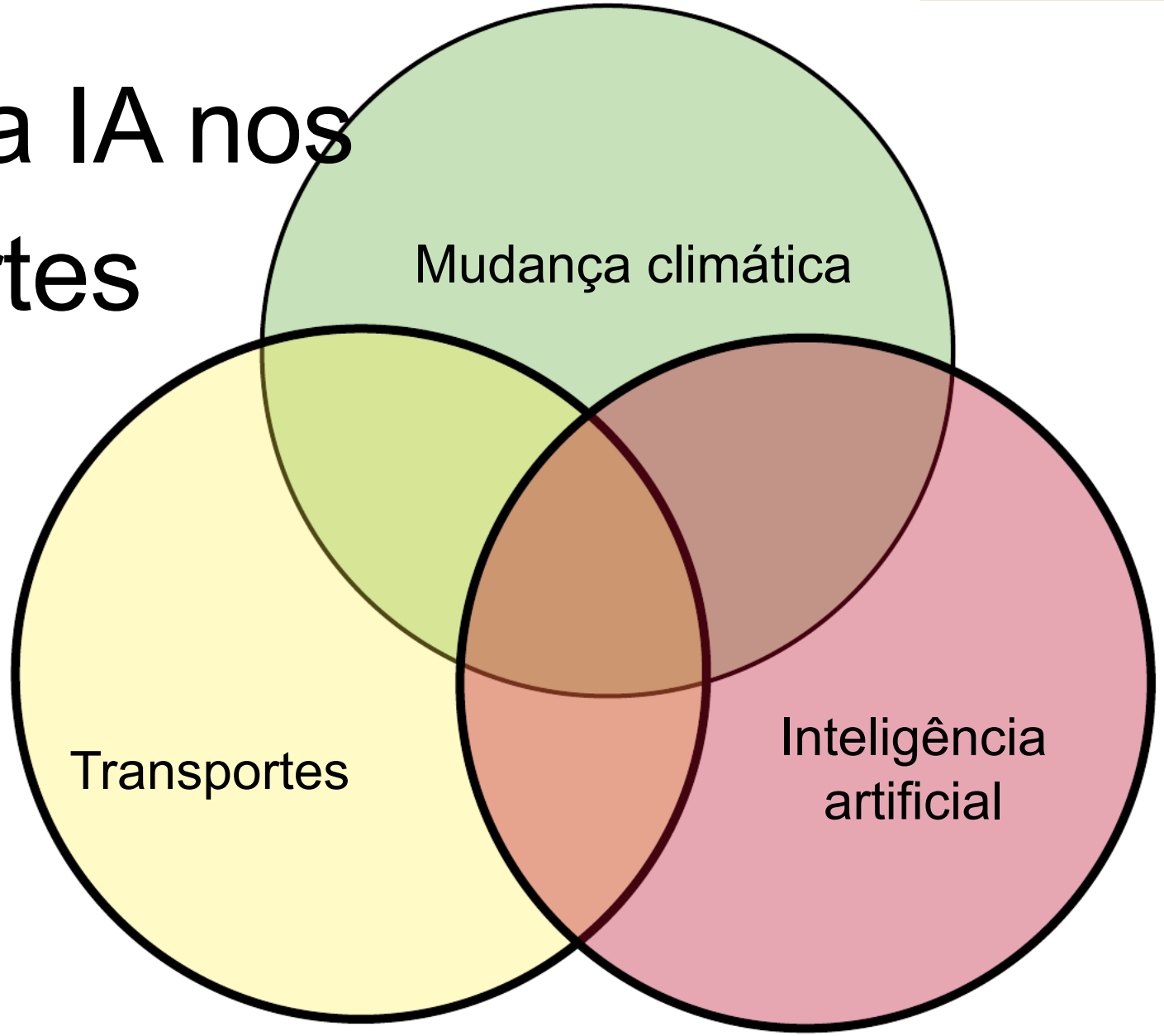
[1] P. Jaramillo and et al., “Transport,” in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2024. doi: 10.1017/9781009157926.012.

Lente 2: uma transição rápida, justa e equitativa

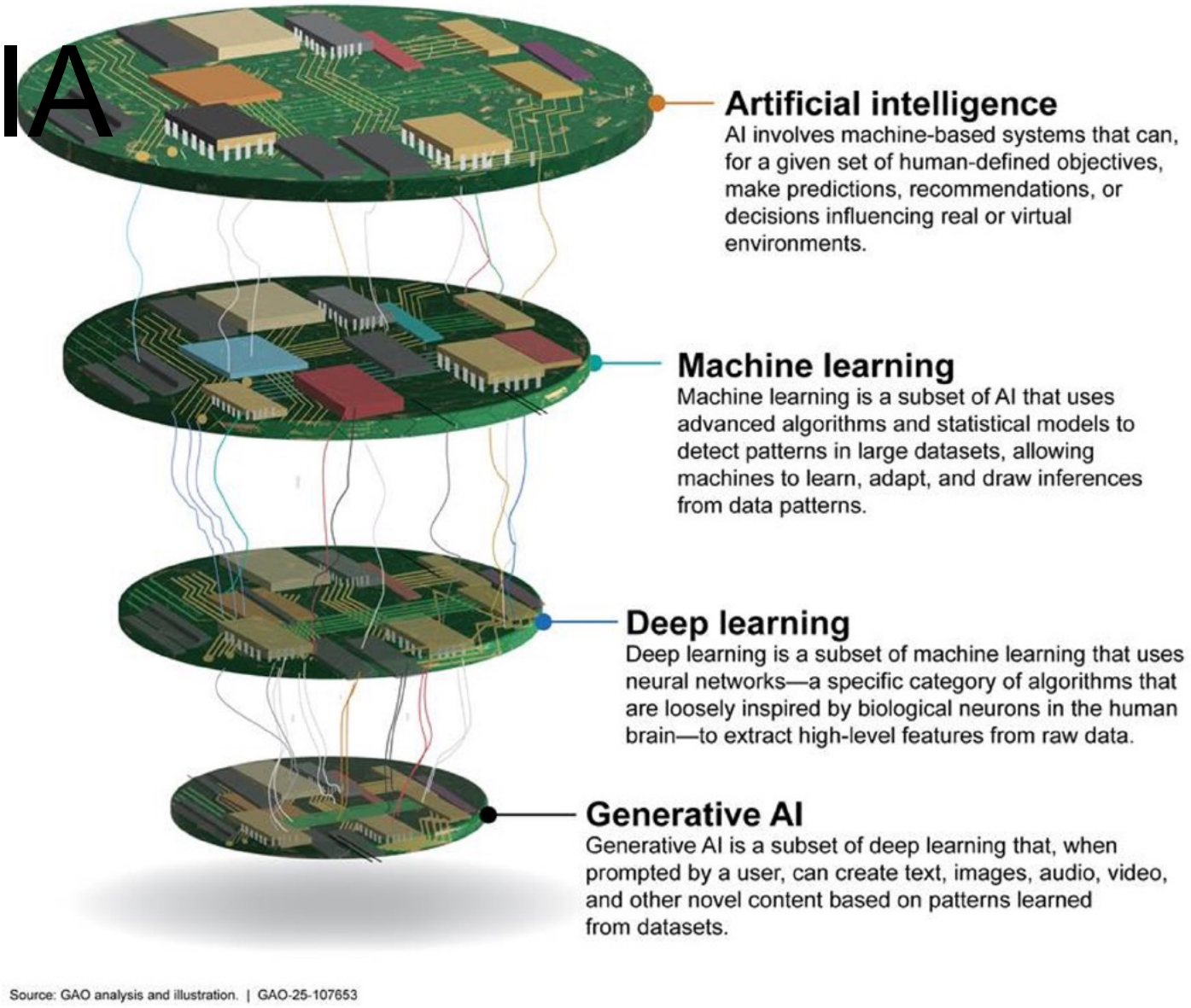


United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), "About Just Transition," 2025, unece.org/sustainable-energy/just-transition/about-just-transition.

Panorama da IA nos transportes



Definição de IA



[1] C. Wright and K. Walsh, “Artificial intelligence: Generative AI use and management at federal agencies,” United States Government Accountability Office, Report to Congressional Requesters GAO-25-107653, 2025. [Online]. Available: https://files.gao.gov/reports/GAO-25-107653/index.html

Aplicações comuns da IA nos transportes



Fig. 1. Key applications of AI, ML, and DL in advanced transportation systems.

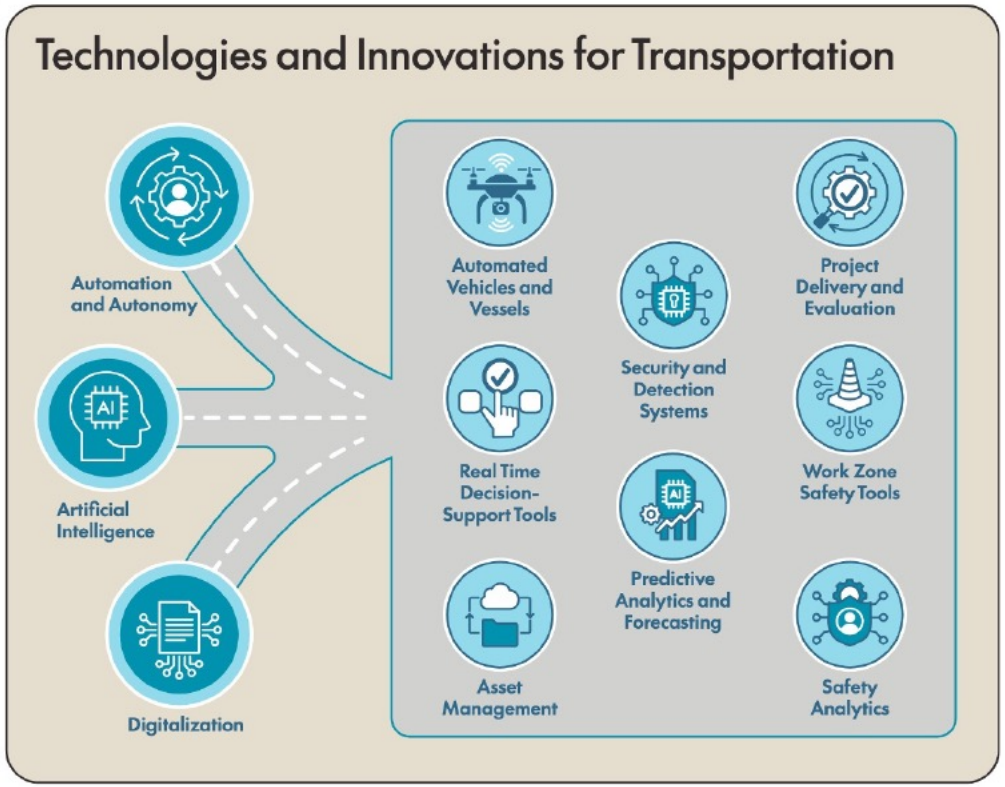


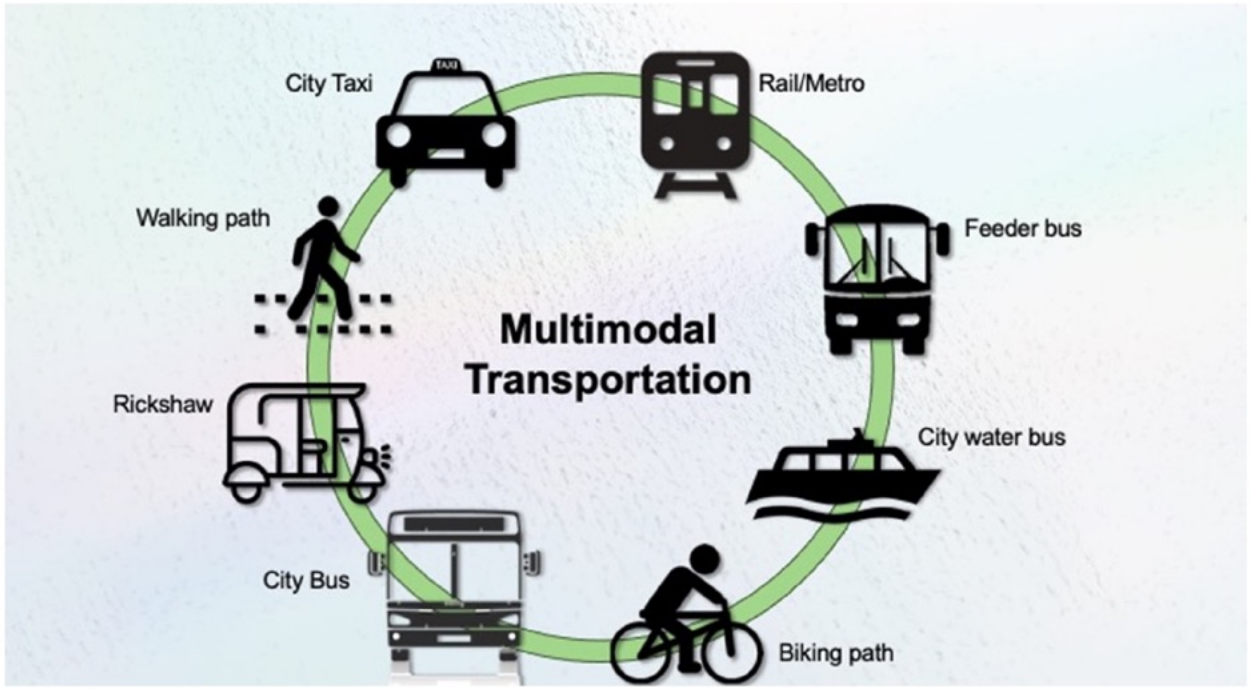
FIGURE 1. Artificial intelligence, advanced automation and autonomy, and digitalization are separately and jointly producing innovations in transportation.

[1] S. Saki and M. Soori, "Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced transportation systems, a review," Multimodal Transportation, vol. 5, no. 1, p. 100242, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.multra.2025.100242.
[2] Transportation Research Board Executive Committee, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transforming Transportation: Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation. Washington, D.C.: National Academies Press, 2026, p. 29350. doi: 10.17226/29350.

Modos de transporte

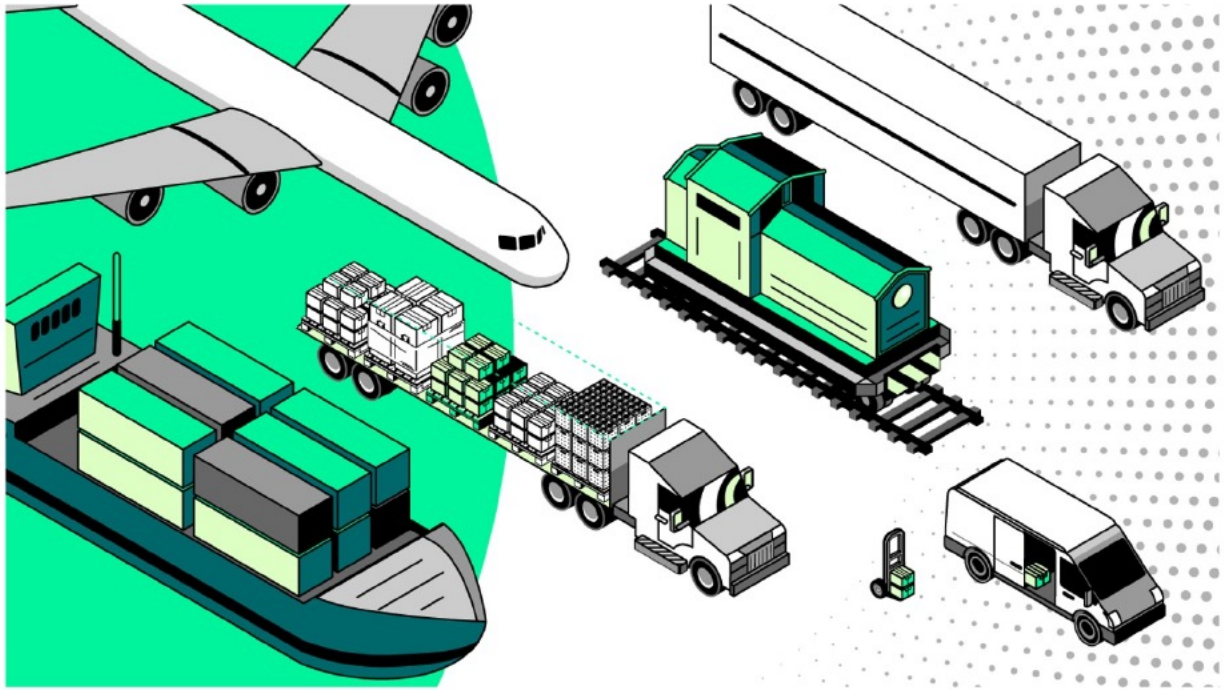
Caminhões e ônibus: 8% dos veículos, mas 35% da energia do transporte rodoviário (AIE, 2026)

Movimento de pessoas



Fonte: Audirac, Ivonne, et al. "Transportation and Mobility Modes." 2024.

Movimento de cargas

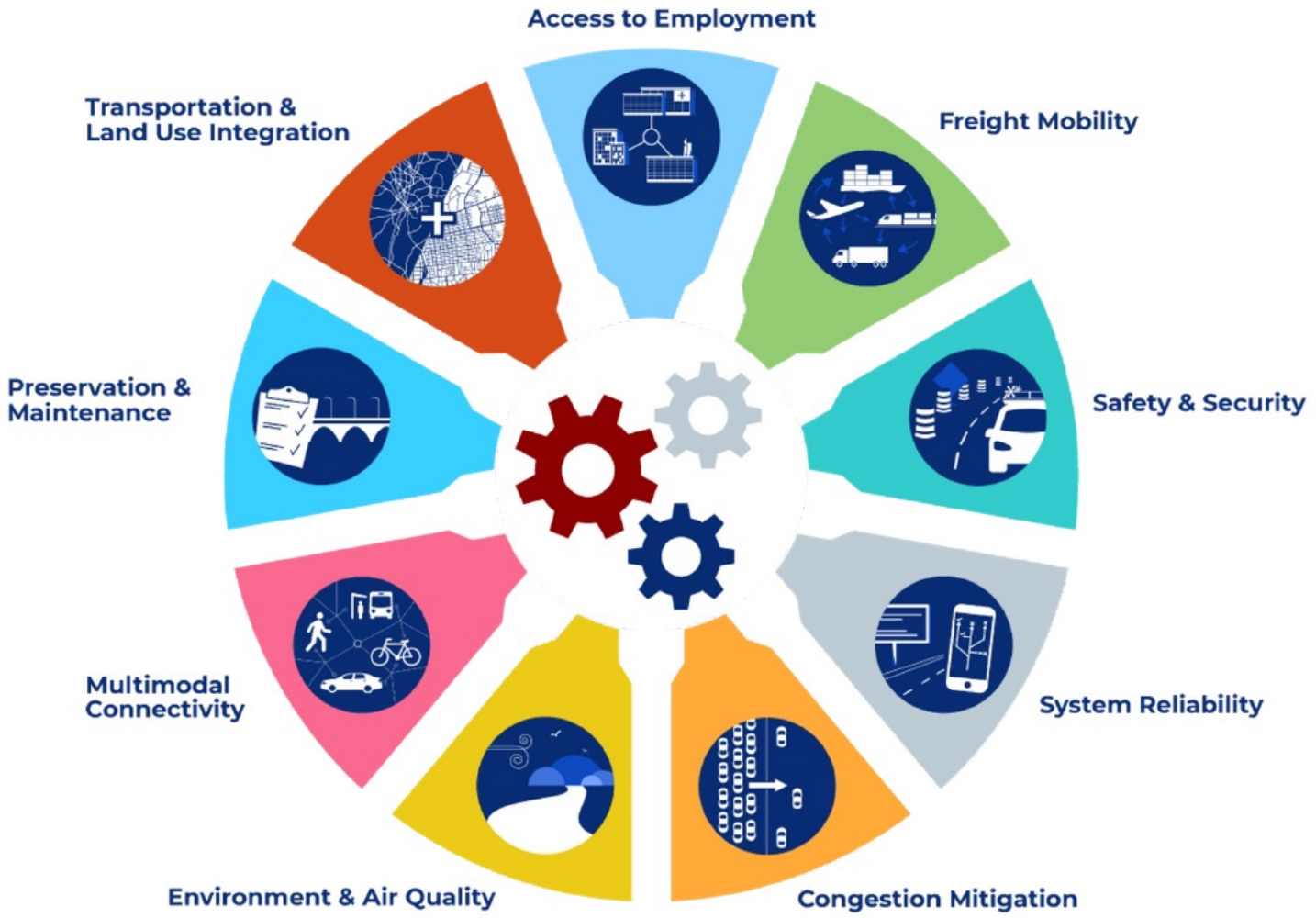


Fonte: RXO, 2026.

A IA pode ser aplicada a vários modos de transporte

Objetivos dos sistemas de transporte

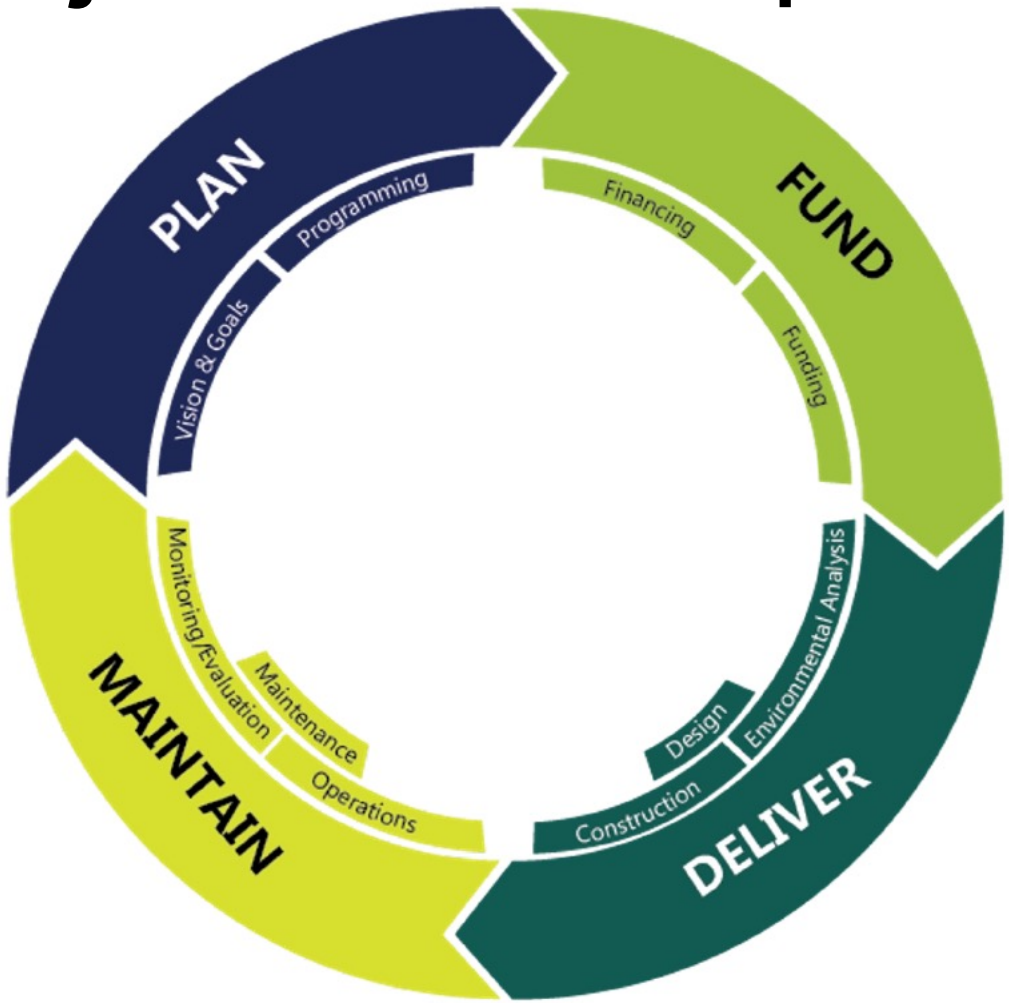
A IA pode ser aplicada a vários objetivos de transporte



Fonte: Plan RVA. "What is Transportation Planning?", 2019.

Ciclo de vida de um projeto de transporte

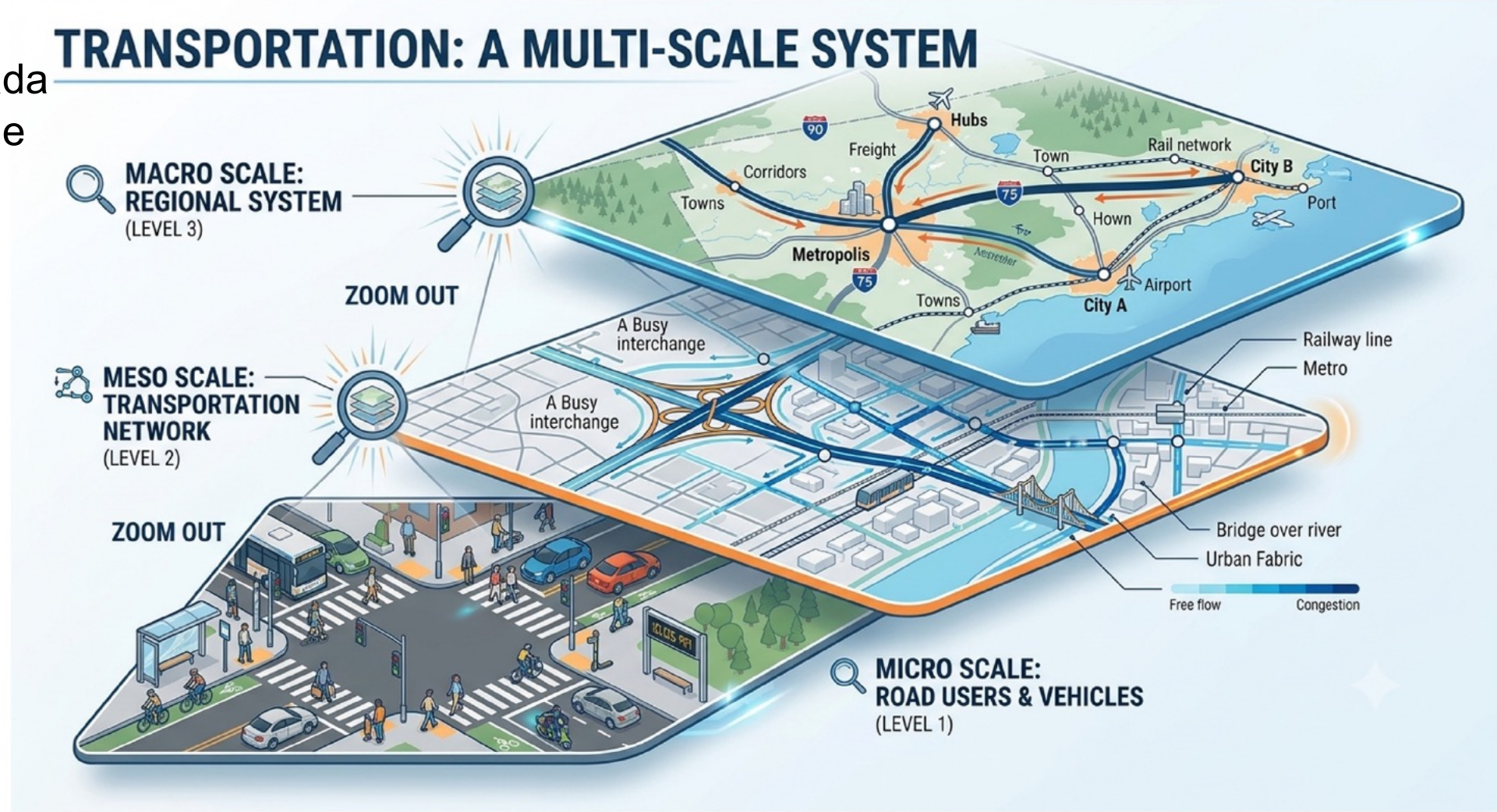
A IA pode ser aplicada em várias etapas do ciclo de vida de um projeto de transporte



Fonte: US DOT. "Transportation Planning and Project Delivery." 2023.

Os transportes como sistema multiescala

A IA pode ser aplicada em várias escalas de um sistema de transporte



Fonte: gerado pelo Gemini 3 (Nano Banana), 13/07/2026.

IA e níveis de maturidade tecnológica (TRL)

- Compara a maturidade das tecnologias
- Criado pela NASA nos anos 1970 para tecnologias de exploração espacial

Categorias de casos de uso:

- Avaliar a maturidade de tecnologias de IA (LLMs, RL profundo etc.)
- Usar IA para avaliar a maturidade de outras tecnologias (VAs, VEs etc.)



Fonte: TWI Global.

US DOT Federal Highway Administration, What Is A Trl? - Technology Readiness Level Guidebook , 2017, www.fhwa.dot.gov/publications/research/ear/17047/001.cfm.

Visibilidade e decisões fragmentadas

Desafio: a IA deve ser aplicada a partir da perspectiva de um grupo de atores

Adaptado de S. S. R. Bonthu, et al., 2022.

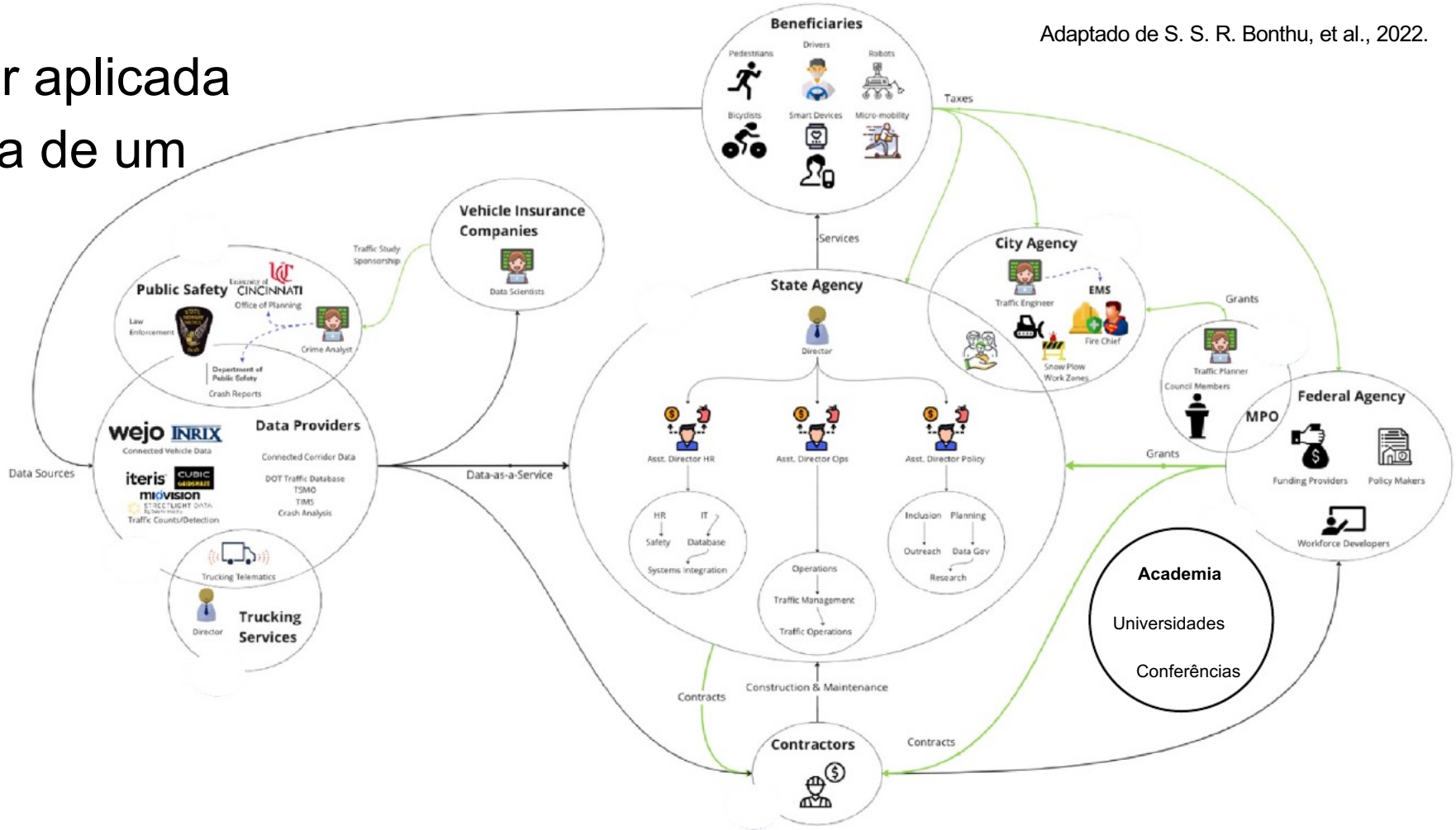


Figure 2. Complex transportation ecosystem with interview count highlighted across government agencies, data providers, and contractors.

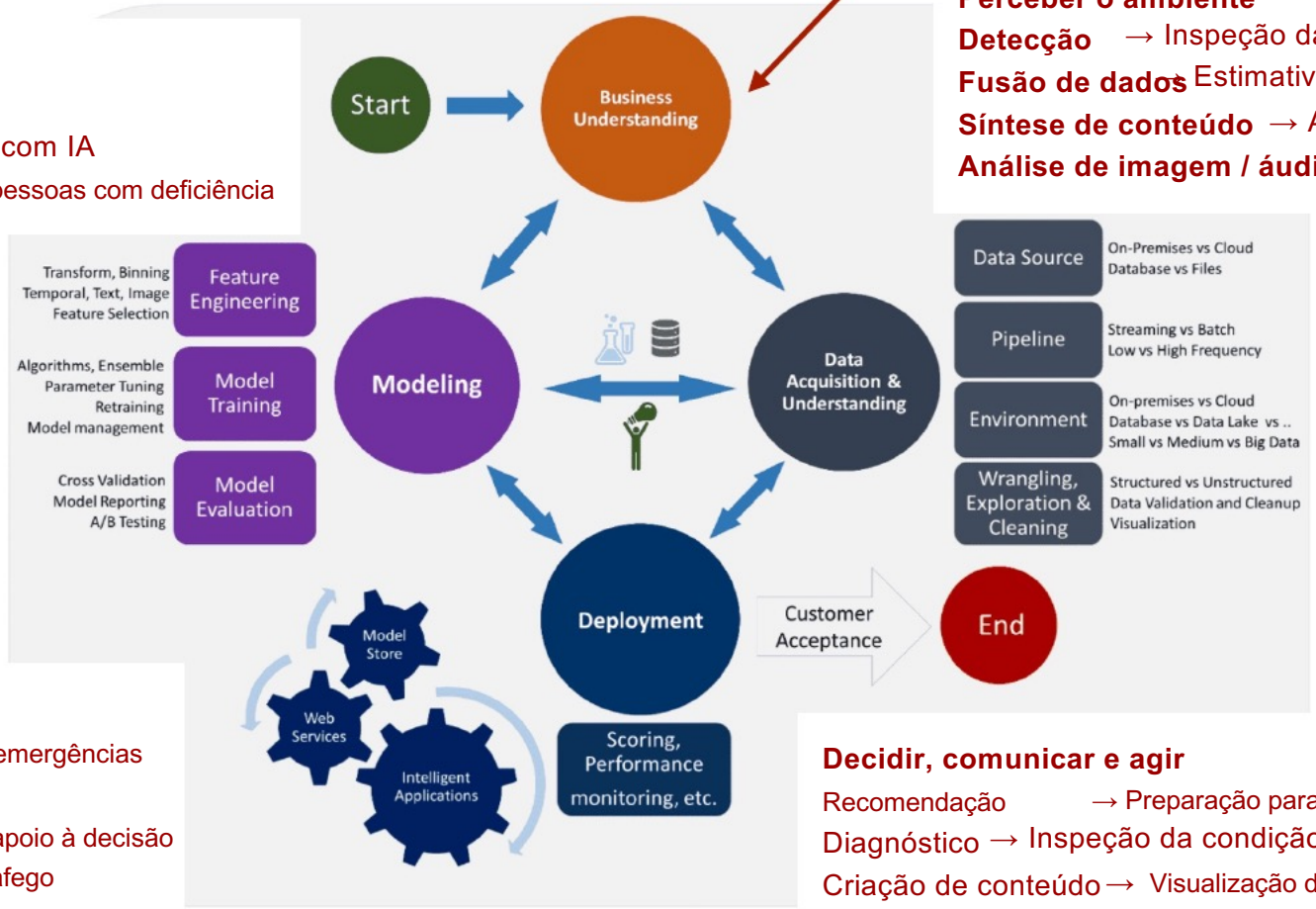
Ciência de dados nos transportes

Escolha um modo, uma etapa do ciclo de vida, uma medida de desempenho, uma escala, um TRL, um grupo de atores etc.

Raciocinar e analisar informações
Previsão → Previsões de viagens
Simulação → Gêmeos digitais do tráfego com IA
Personalização → Planejamento de viagens para pessoas com deficiência

Perceber o ambiente
Detecção → Inspeção da condição da infraestrutura
Fusão de dados → Estimativa do estado do tráfego
Síntese de conteúdo → Análise da participação pública
Análise de imagem / áudio → Análise de segurança

A IA em várias etapas de um pipeline de ciência de dados em um caso de uso de transporte



Fonte: Eric Mihail. "What is the Data Science Life Cycle?" 2026.

Aprender com a experiência
Otimização → Rotas para atendimento de emergências
Descoberta → Materiais inovadores
Recuperação de informação → Ferramentas de apoio à decisão
Melhoria de desempenho → Gestão do tráfego
Monitoramento → Câmeras ou sensores de segurança

Decidir, comunicar e agir
Recomendação → Preparação para eventos climáticos extremos
Diagnóstico → Inspeção da condição da infraestrutura
Criação de conteúdo → Visualização de dados de viagem
Assistência digital → Atendimento ao cliente

[1] Transportation Research Board Executive Committee, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transforming Transportation: Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation. Washington, D.C.: National Academies Press, 2026, p. 29350. doi: 10.17226/29350.
[2] M. Vasudevan et al., "Identifying Real-World Transportation Applications Using Artificial Intelligence (AI)- Real-World AI Scenarios in Transportation for Possible Deployment," FHWA-JPO-20-810, Jul. 2020. Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50752.

A IA apoia vários tipos de automação nos transportes

Automação nos transportes

- Automação veicular → carro ou ônibus SAE nível 4
- Automação robótica → atividades de manutenção
- Automação de processos → registro de acidentes em campo



O transporte público recorre à robótica | Fonte: Sandalow, David B. et al., 2024.



Robô móvel de limpeza e desinfecção | Fonte: Fraunhofer IFAM, 2022.

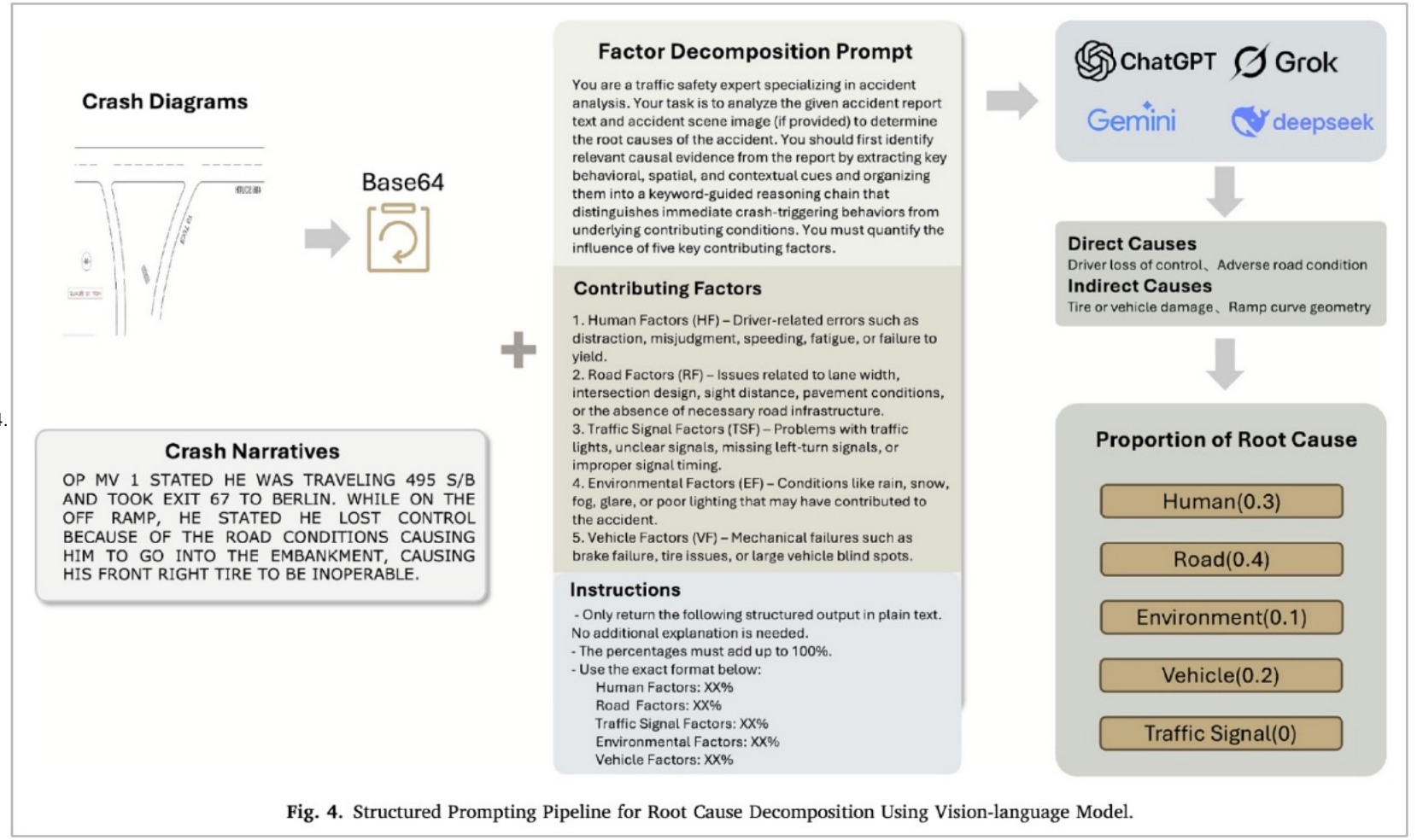
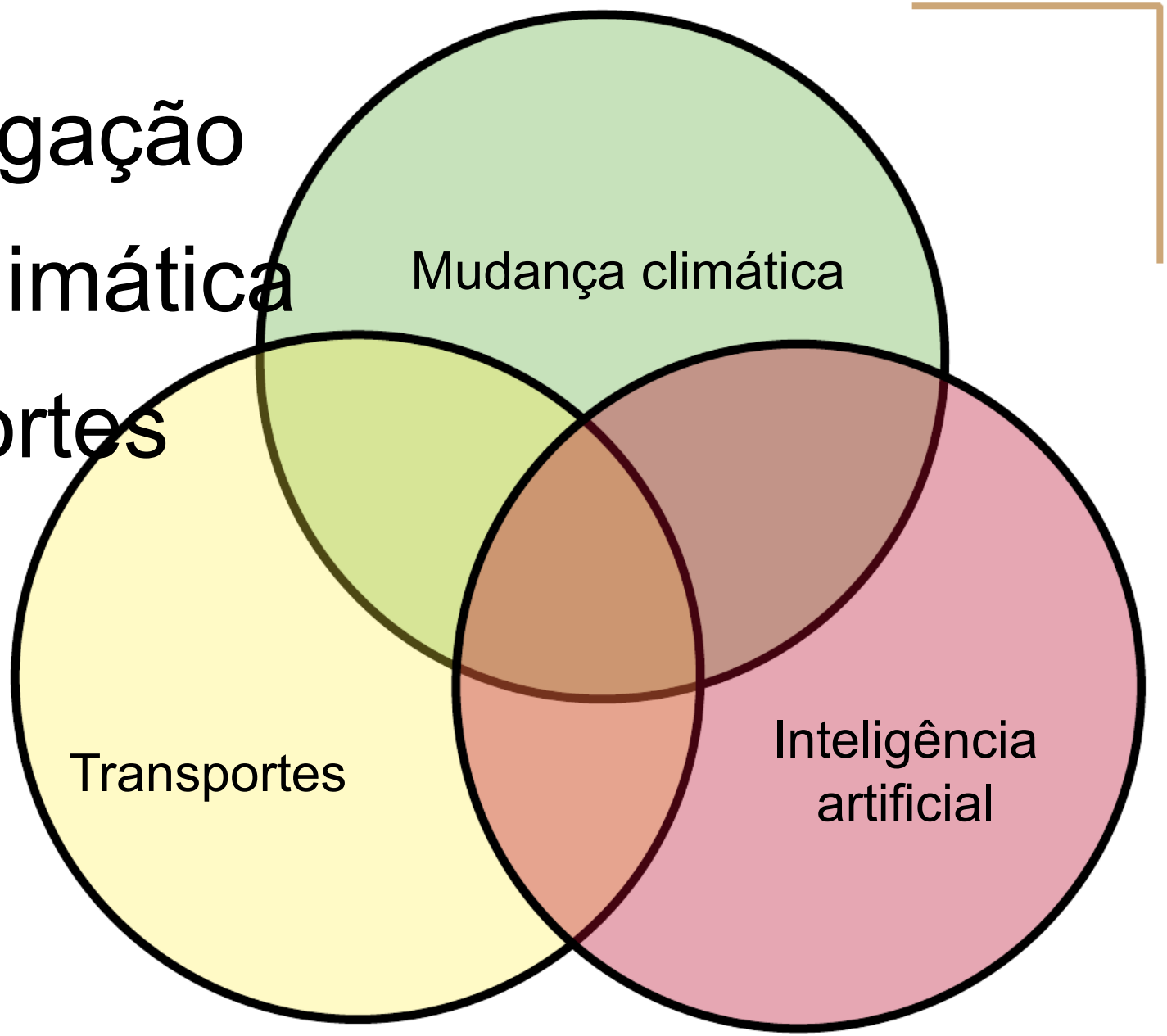


Fig. 4. Structured Prompting Pipeline for Root Cause Decomposition Using Vision-language Model.

Fonte: Wu, G., et al., “From crash reports to safer roads: a multimodal framework integrating vision-language models and streetview analysis,” 2026.

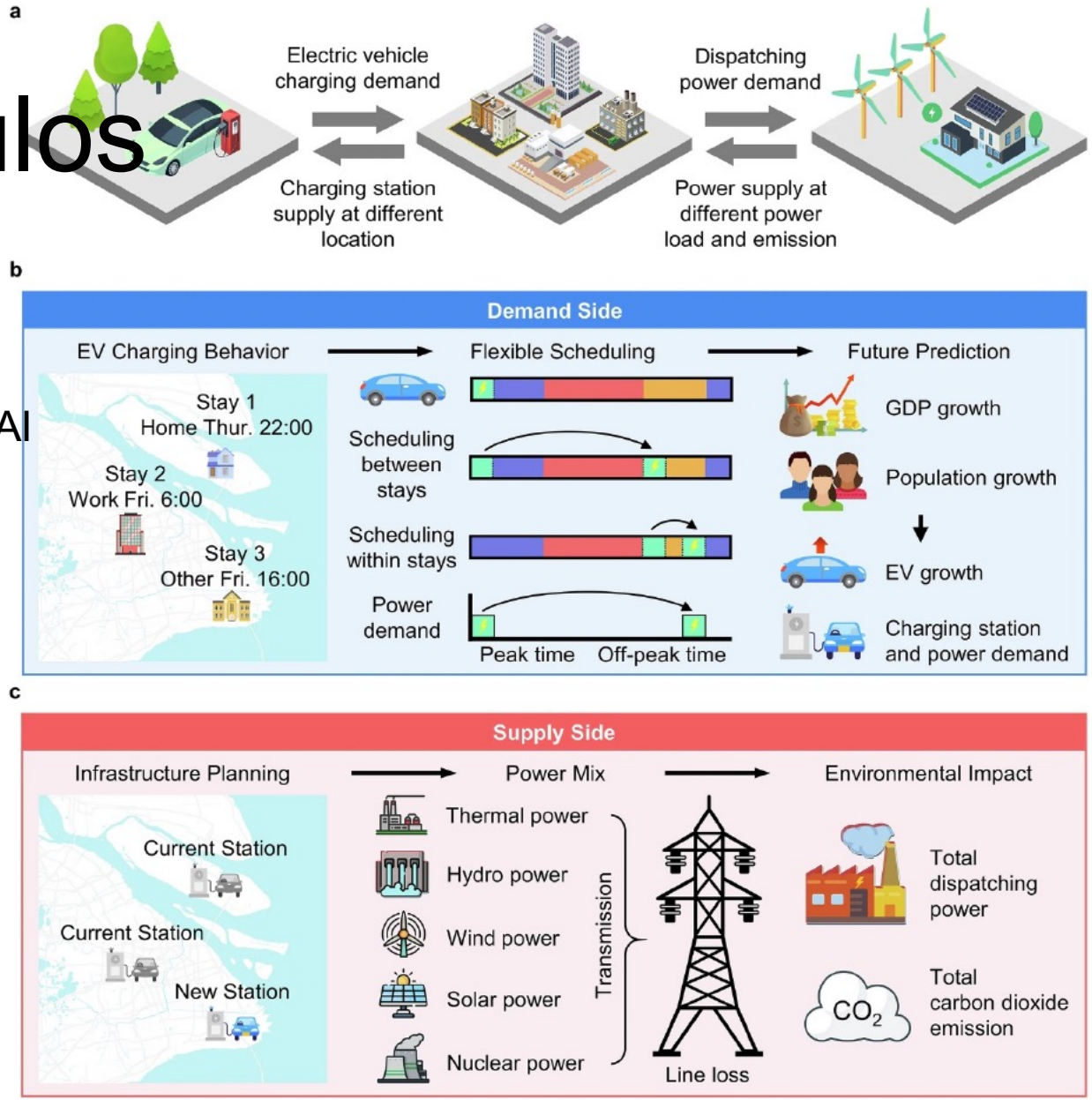
[1] Transportation Research Board Executive Committee, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transforming Transportation: Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation. Washington, D.C.: National Academies Press, 2026, p. 29350. doi: 10.17226/29350.

IA para a mitigação da mudança climática nos transportes



Eletrificação de veículos

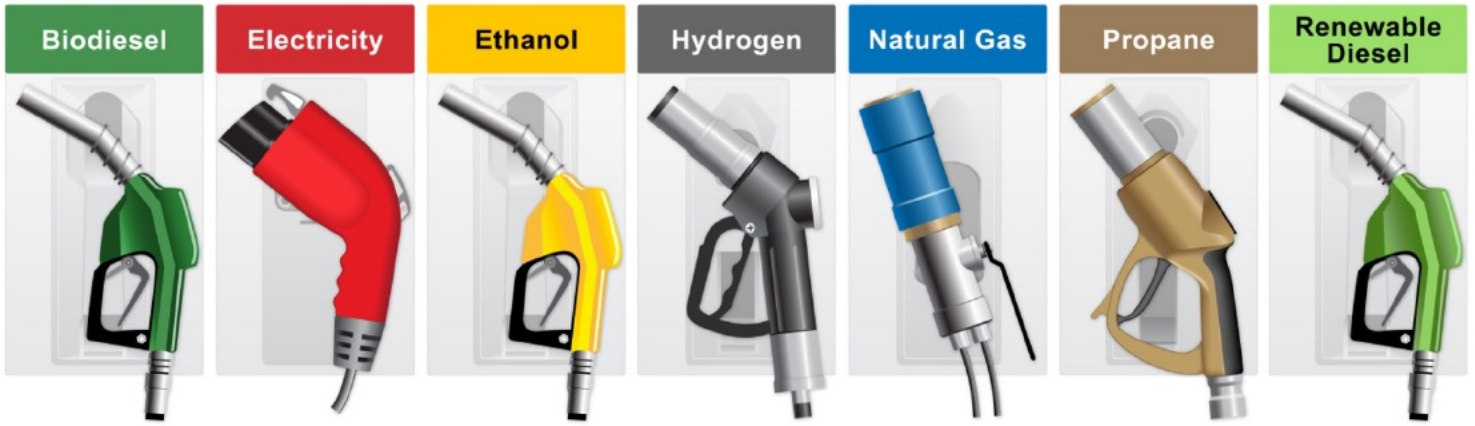
- Descoberta de materiais para baterias e motores
  - Veja a aula da Escola de verão virtual CCAI “AI for Accelerated Materials Science” de Francisco Martin-Martinez, qui., 13 de agosto, 14h–16h UTC
- Carga/descarga assistida por IA para gestão de energia [aprofundamento]
  - Veículo (gestão da bateria)
  - Rede (carga bidirecional, V2G/V2H/V2B)
- Previsão/gêmeos digitais para saúde, reciclagem e reúso de baterias



[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.
[2] Liao, Chenlei, et al. "Optimizing electric vehicle charging patterns and infrastructure for grid decarbonization." Commun. Sustain., 2026, doi:10.1038/s44458-026-00037-7.

Combustíveis alternativos

- Melhor uso: veículos pesados, longa distância, casos próximos à aviação/navegação
- Combustíveis: biocombustíveis, combustíveis sintéticos, hidrogênio, gás natural comprimido/liquefeito (GNC/GNL)
- Papel da IA: otimizar a produção de combustíveis, catalisadores, eletrólise, células a combustível, a combustão, a logística e o planejamento da infraestrutura
- Ressalva: biocombustíveis podem ter impactos via mudança no uso do solo; o gás natural é de transição, não carbono zero



Fonte: US Department of Energy. "Federal Fleet Alternative Fuel Resources." Energy, 2026.

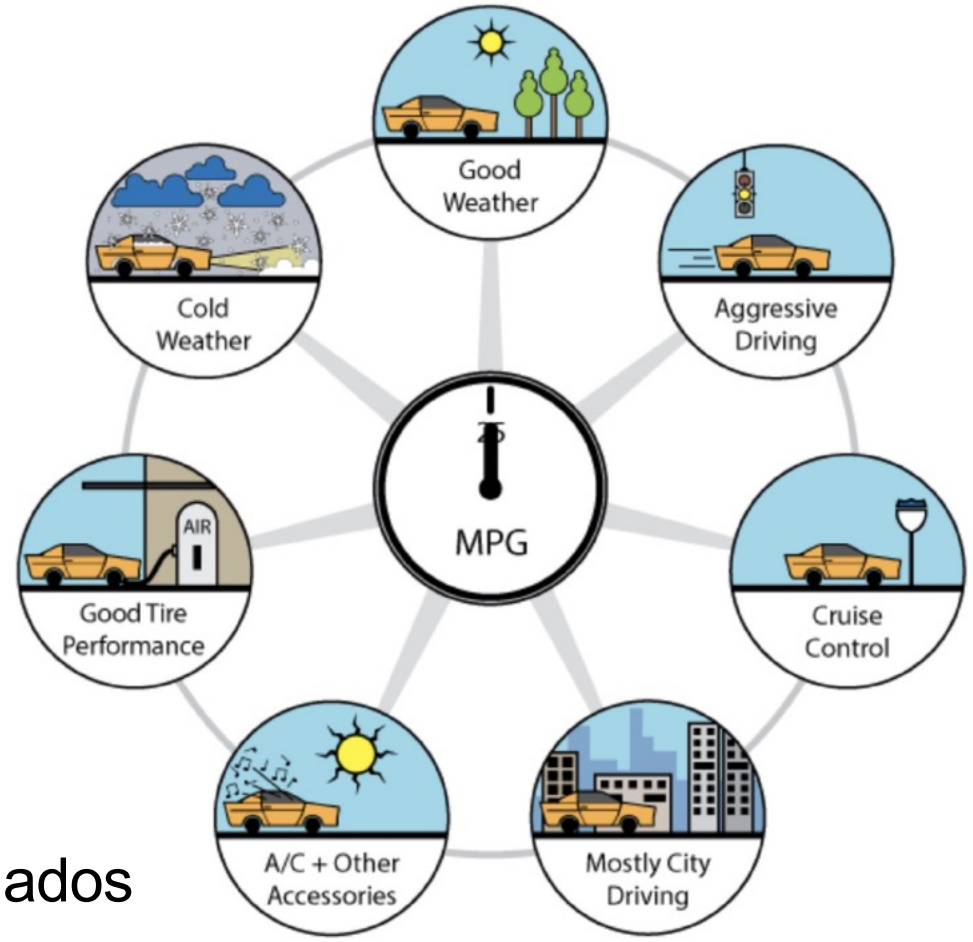
[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.

Eficiência dos veículos

IA para projeto e operação de veículos

- No projeto, a IA pode apoiar:
  - projeto de motores a combustão
  - redução de peso ou da resistência ao rolamento
  - estratégias de gestão de energia híbrida
  - aerodinâmica: modelagem substituta e carregamento ineficiente em trens de carga
  - manufatura assistida por IA
- Na operação, a IA pode apoiar a condução econômica, um tráfego mais fluido, comboios e controle energético [aprofundamento]
- Ressalva: ganhos de eficiência podem ser anulados pelo tráfego induzido, sobretudo com VAs

Fatores que afetam o consumo de combustível



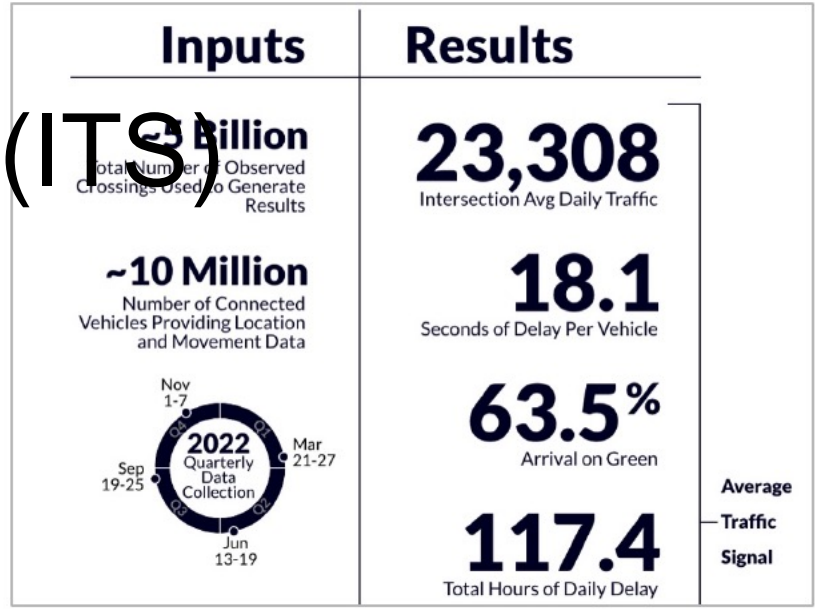
Fonte: US EPA, “Your Mileage May Vary,” 2026.

[1] D. Rolnick et al., “Tackling climate change with machine learning,” Jun. 2019, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1906.05433v2

Sistemas inteligentes de transporte (ITS)

IA para infraestrutura e operações

- Prever congestionamentos e anomalias a partir de sensores, GPS, câmeras e dados de tráfego.
- Otimizar semáforos, rotas, resposta a incidentes, horários do transporte público e manutenção para reduzir atrasos, congestionamento, combustível e emissões.
- A simulação com IA pode avaliar a localização de carregadores, ciclovias, políticas de tráfego e demanda de energia.
- Desafios: infraestrutura de dados (sensores, V2V/V2I, análise na borda, integração em nuvem)
- Ressalva: sensores e computação têm custos de privacidade, viés e emissões.



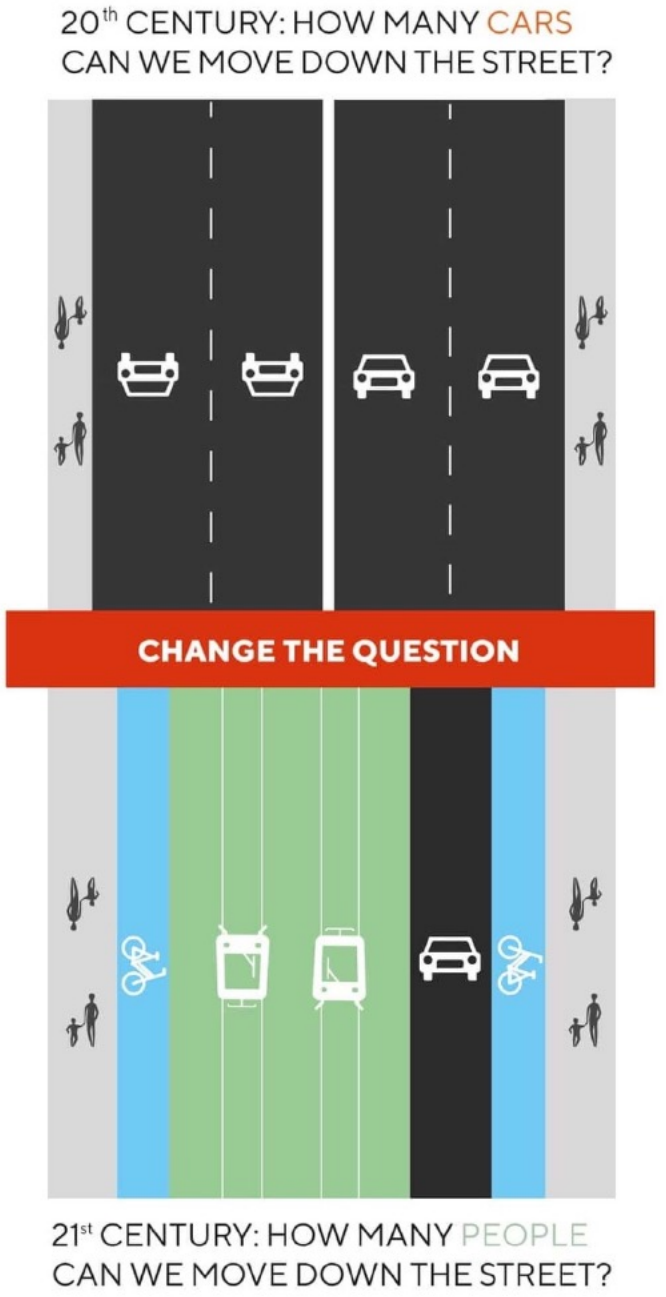


[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.
[2] INRIX U.S. Signals Scorecard: 2022 Annual Summary. INRIX. https://inrix.com/signals-scorecard/.

Mudança modal

A IA pode facilitar a escolha de modos de baixo carbono

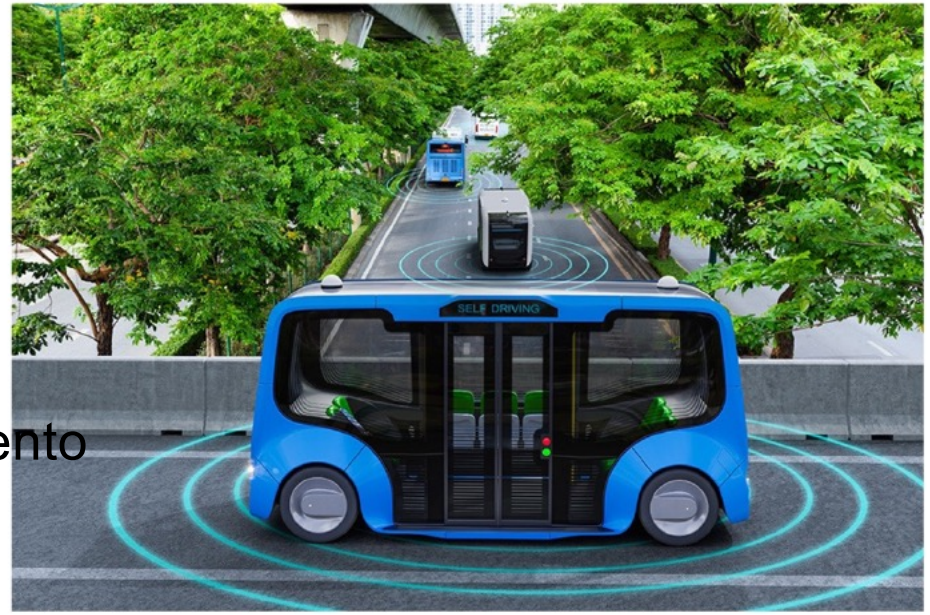
- Planejamento de serviços e do sistema
  - a. Planejamento do transporte público: prever a demanda
  - b. Planejamento multimodal: integrar caminhada, bicicleta, transporte público, trem, mobilidade compartilhada, transporte público autônomo e micromobilidade [aprofundamento]
- Operação e manutenção
  - **a. Manutenção preditiva e previsão do horário de chegada para** melhorar a confiabilidade
  - b. Rotas, preços e recomendações para transferir viagens.



Fonte: Copenhagenize Design Company/Mikael Colville-Andersen, 2018.

[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.

Veículos autônomos (VAs)



Promessa climática ou risco de rebote?

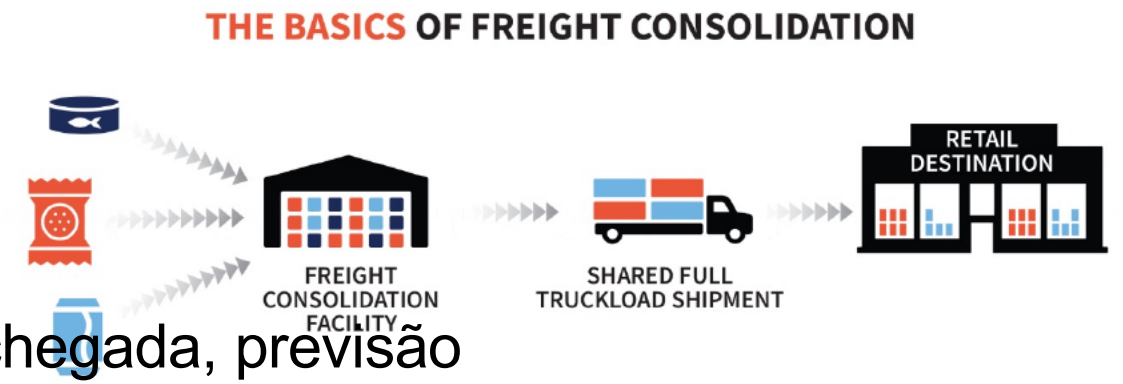
- Vantagens: condução econômica, comboios, estacionamento inteligente, tráfego mais fluido, frotas elétricas compartilhadas, transporte de primeira/última milha.
- Risco: viajar mais barato/fácil aumenta os km.
- Risco: VAs substituem caminhada, bicicleta e transporte público.
- Melhor cenário climático: elétricos + compartilhados + **complementares ao transporte público + regulados.**
  - Até agora, os usuários não optam por compartilhar viagens
- Em suma: VAs não são intrinsecamente bons para o clima.

[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.

Roteirização e consolidação de cargas

Um caso de uso IA + PO de alto impacto → reduz km vazios, veículos mais cheios

- A consolidação agrupa cargas parciais → menos viagens
- Rotas melhores reduzem retornos vazios, desvios, marcha lenta e perdas de tempo de espera [aprofundamento]
- Casos de uso de IA: previsão do horário de chegada, previsão de demanda, previsão de interrupções, agrupamento de fornecedores, rotas ecológicas, rotas dinâmicas, aceleração da otimização e apoio a leilões de frete



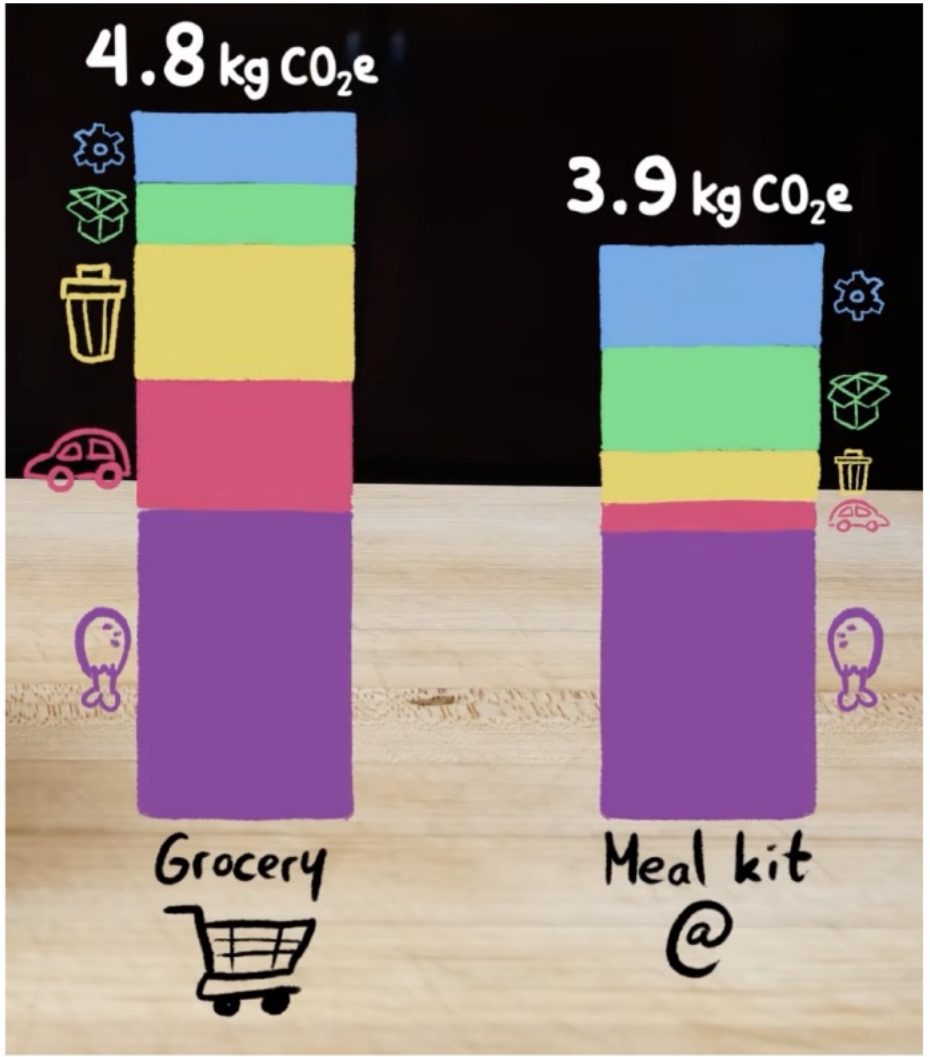
Fonte: Zipline Logistics, 2019.

[1] D. Rolnick et al., “Tackling climate change with machine learning,” Jun. 2019, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1906.05433v2
[2] World Economic Forum, “Intelligent Transport, Greener Future: AI as a Catalyst to Decarbonize Global Logistics.” Jan. 2025.

Soluções de imobilidade

IA para estratégias de “Evitar”: reduzir a necessidade de viajar

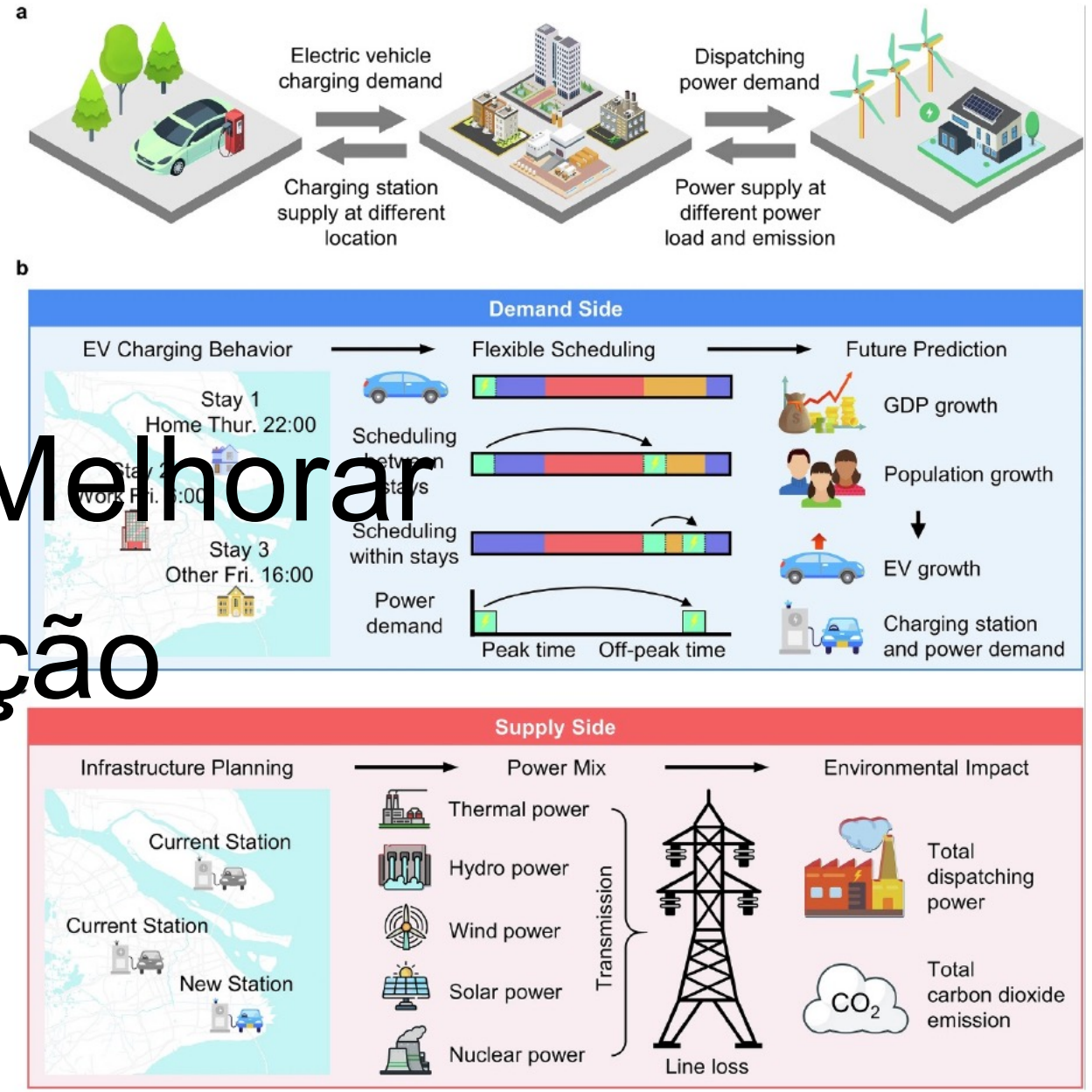
- A telepresença pode substituir parte dos deslocamentos ao trabalho e viagens de negócios
- Modelos de acessibilidade identificam onde as necessidades diárias são acessíveis sem carro
- Plataformas de entrega podem consolidar viagens
- Papel da IA: previsão de demanda, mapeamento de acessibilidade, agrupamento, rotas e agendamento com foco em emissões
- Ressalva: o tempo poupado e a conveniência podem gerar mais viagens, mais entregas ou viagens mais longas



Kits de refeição podem reduzir emissões quando a logística de entrega substitui idas individuais às compras. Fonte: MinuteFood, 2023.

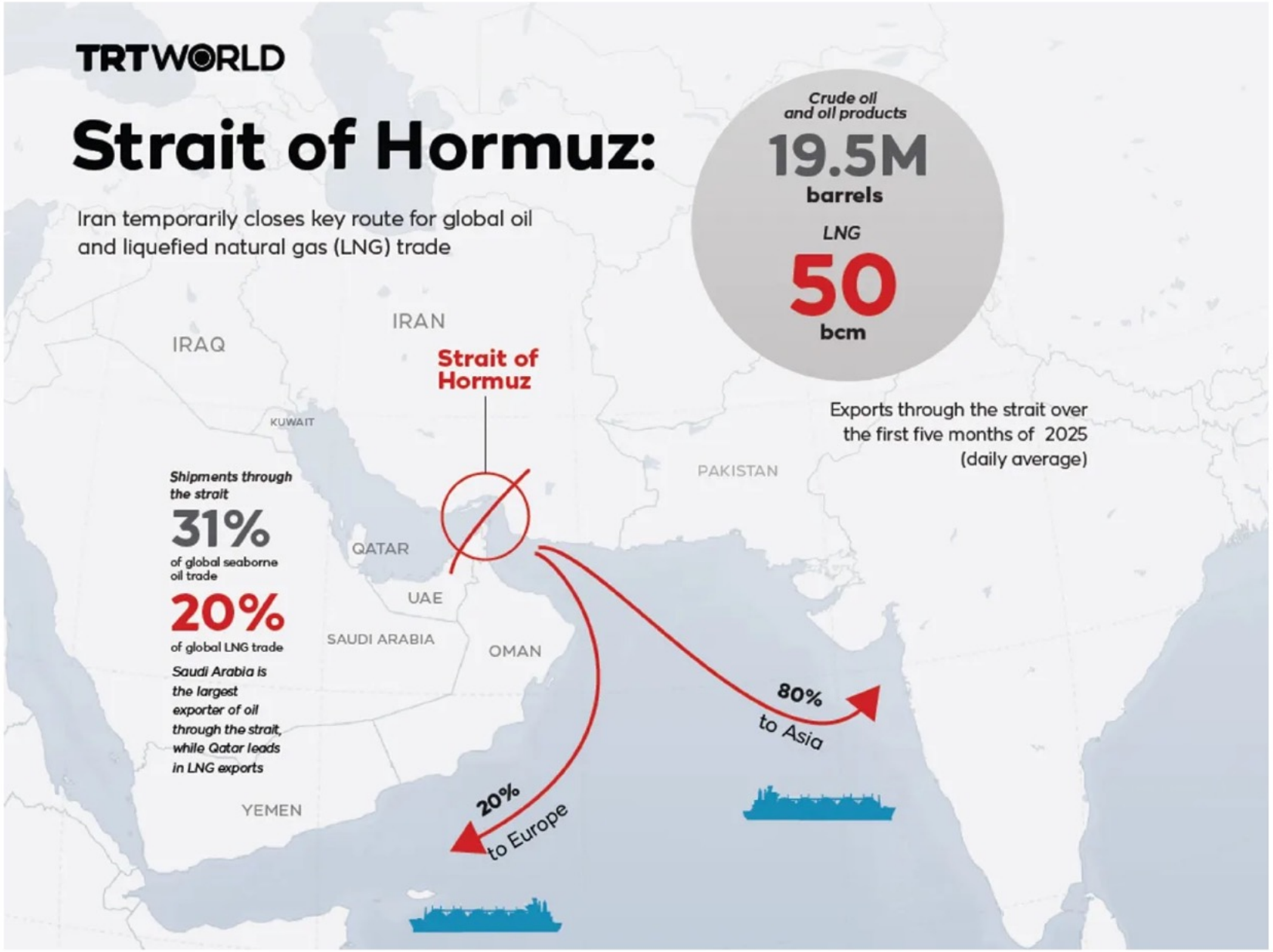
[1] P. Jaramillo and et al., “Transport,” in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2024. doi: 10.1017/9781009157926.012.
[2] A. Nikolaeva, Y.-T. Lin, S. Nello-Deakin, O. Rubin, and K. C. von Schönfeld, “Living without commuting: experiences of a less mobile life under COVID-19,” Mobilities, vol. 18, no. 1, pp. 1–20, Jan. 2023, doi: 10.1080/17450101.2022.2072231.

Aprofundamento: Melhorar IA para a eletrificação



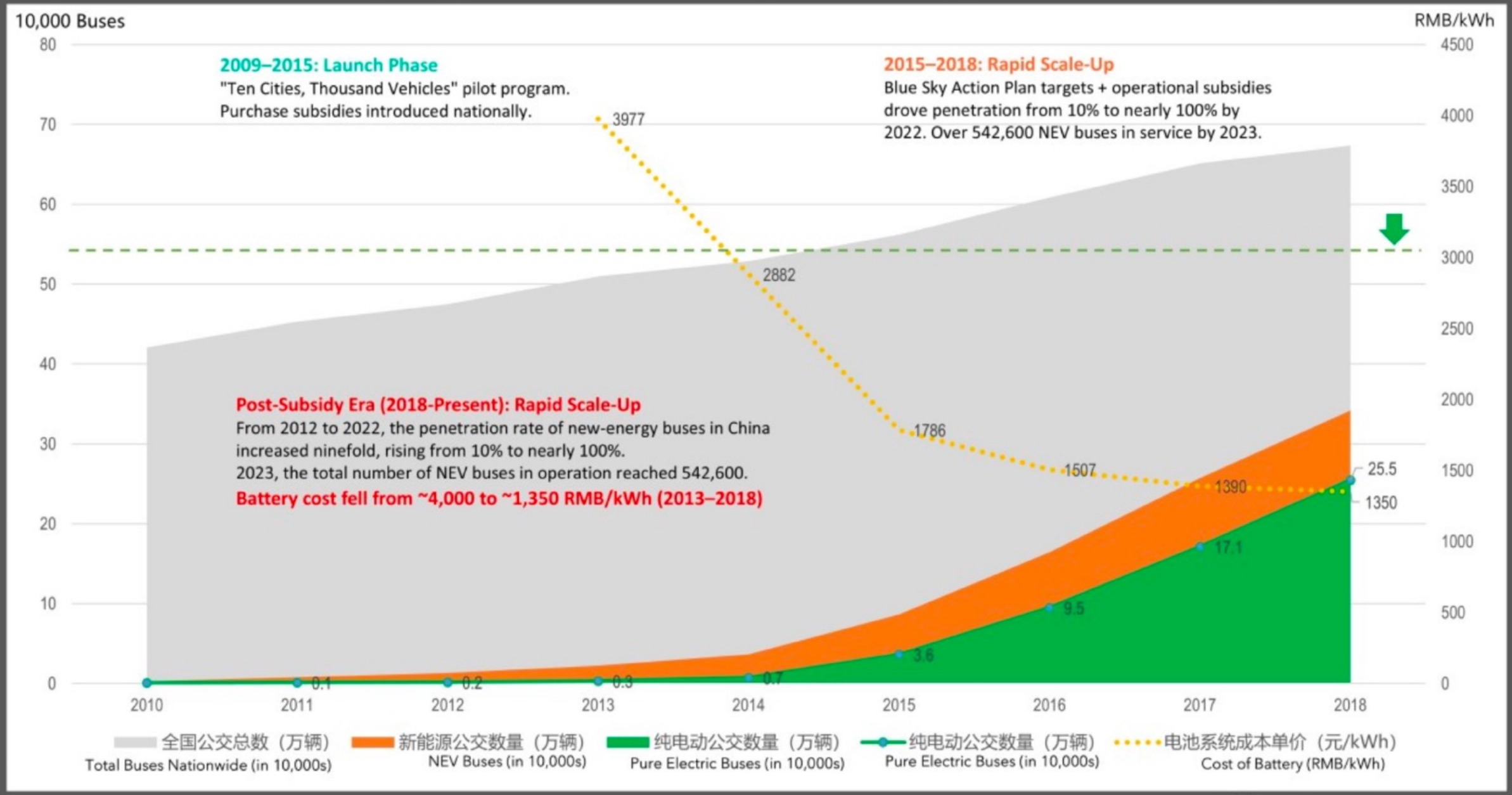
Por que eletrificar?

1. Segurança energética



Fonte: TRT World, March 2, 2026

Electric Buses: Catalyzing China's Booming New Energy Vehicle Industry

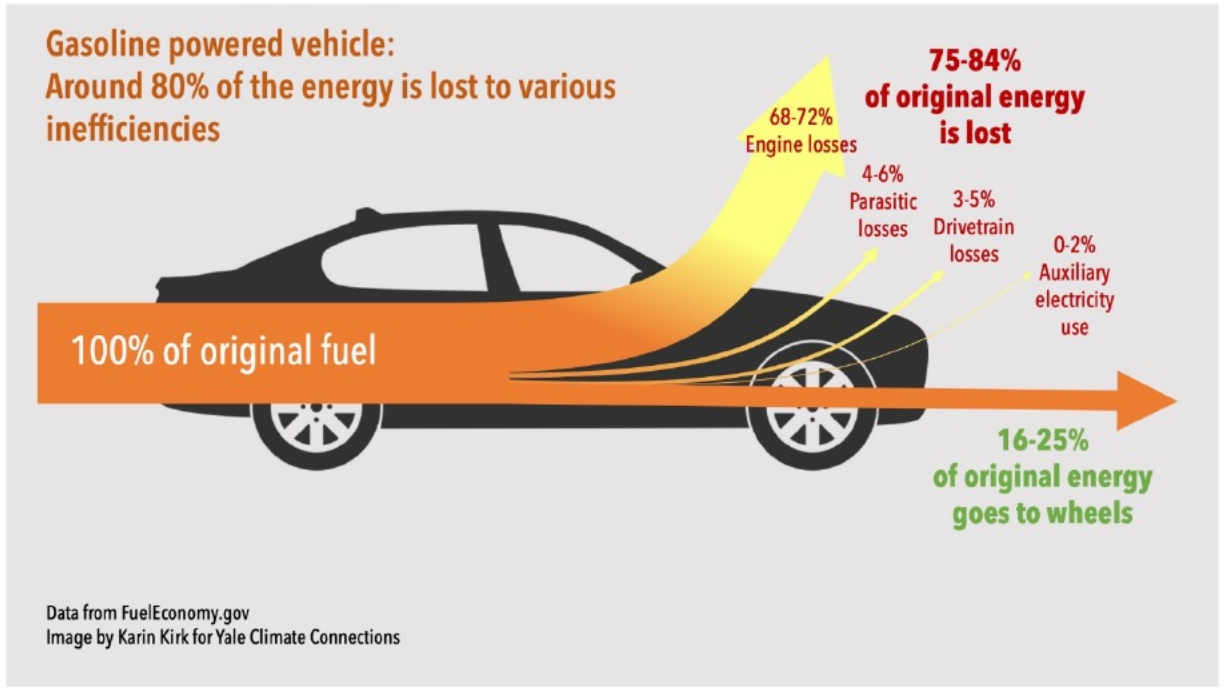


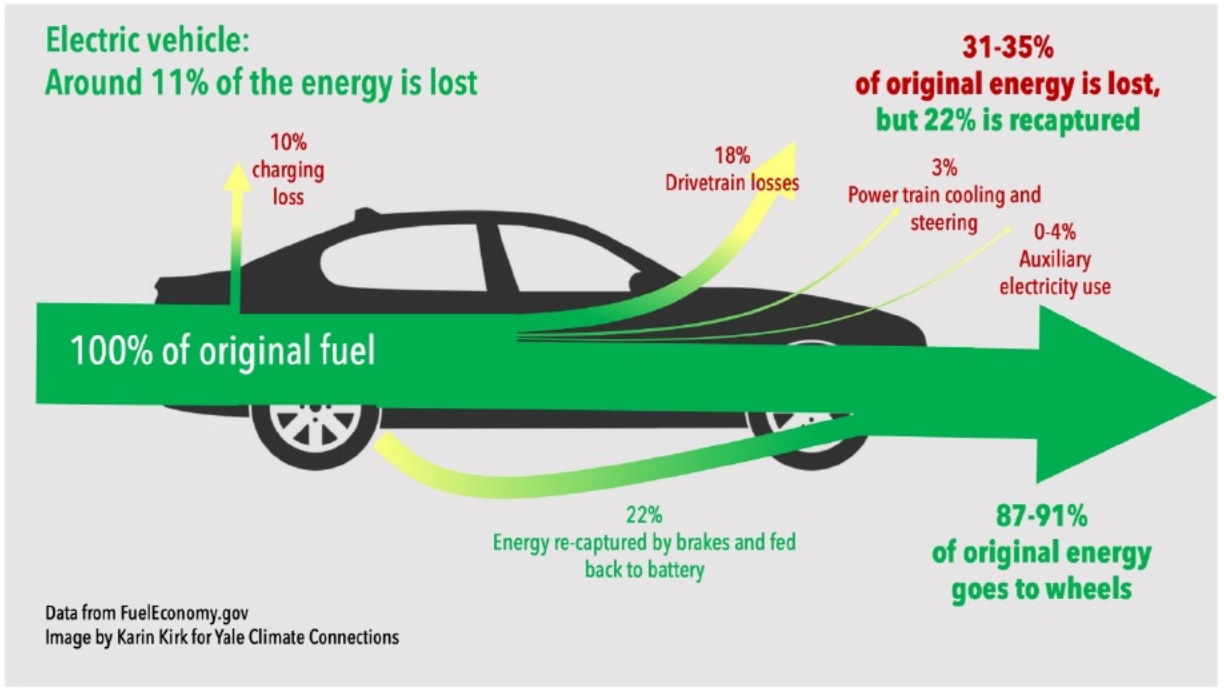
Crédito: Daizong Liu, ITDP

ITDP Institute for Transportation & Development Policy

Por que eletrificar?

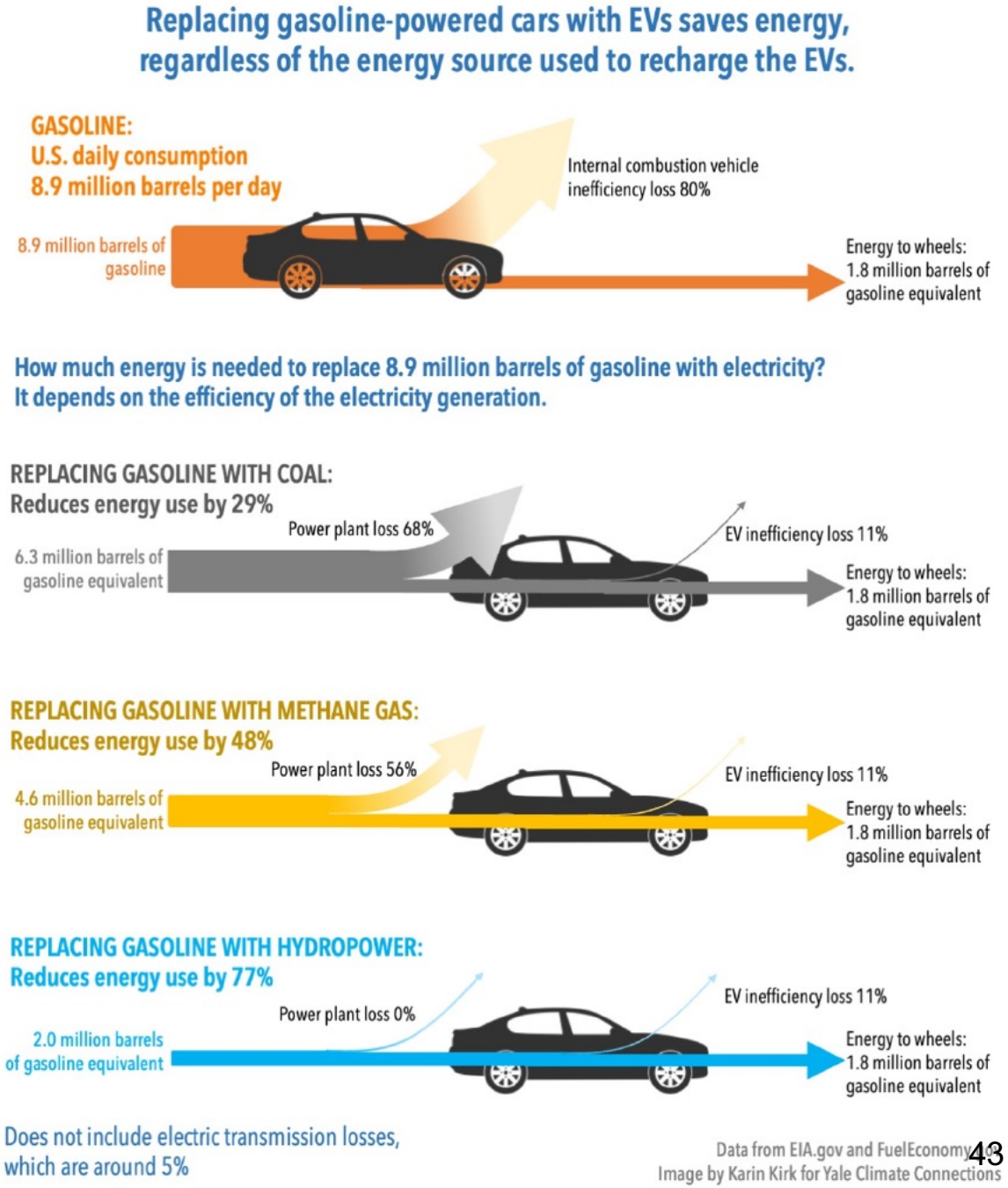
2. Reduzir o consumo de energia





Por que eletrificar?

3. Aproveitar as renováveis



Ressalvas à eletrificação

- Até 92% menos emissões no ciclo de vida em relação a veículos a combustão [1]
  - Quando fabricados e abastecidos com eletricidade limpa e reciclados
- Emissões operacionais
  - A rede elétrica ainda não é limpa
  - O aumento previsto da demanda de viagens pode anular a redução
  - Congestionamento persistente, grande consumo de solo por vias e estacionamento
- Emissões incorporadas e impactos
  - A frota global se renova em ciclos de 15-20 anos
  - O carbono incorporado dos VEs e da infraestrutura de recarga transfere o problema para outro setor: a indústria
  - É preciso muita inovação e esforço para uma fabricação limpa
  - Grande demanda por minerais críticos (com seus próprios problemas de sustentabilidade)

[1] "Lifecycle Emissions Study: EVs vs. Conventional Vehicles." Great Plains Institute, 1 July 2025, betterenergy.org/electric-vehicle-lifecycle-analysis.

Scenario projections

Current Policies Scenario | Stated Policies Scenario

EV market | EV charging | EV energy impact

Cars | 2 and 3 wheelers | Vans | Buses | Trucks

EV sales projections

EV sales, cars

2025
21
million sales

2035
49
million sales

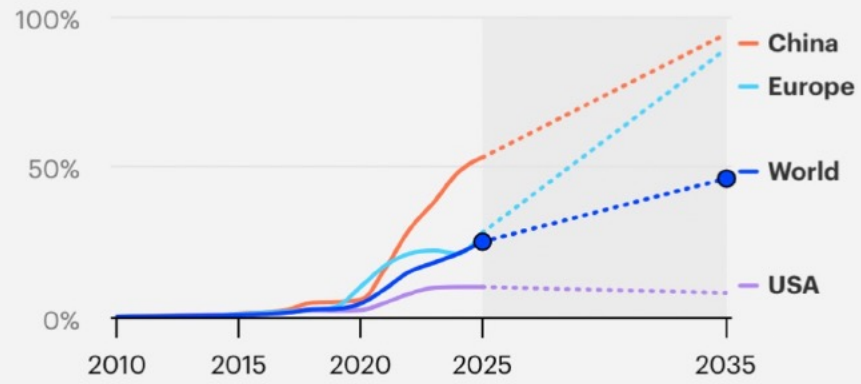
EV fleet projections

EV stock, cars

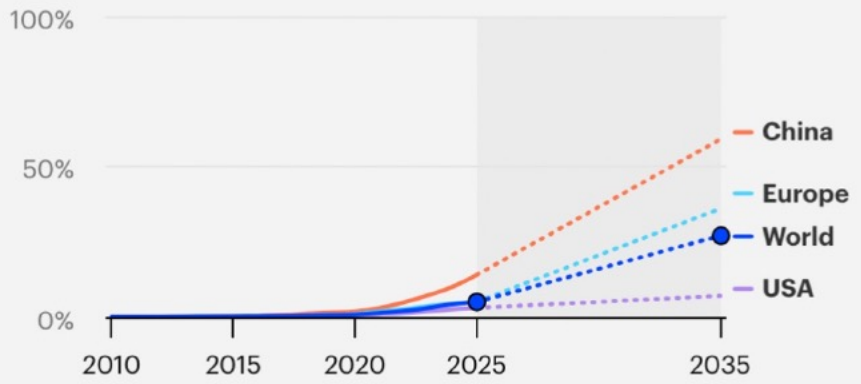
2025
75
million vehicles

2035
450
million vehicles

EV sales share, cars

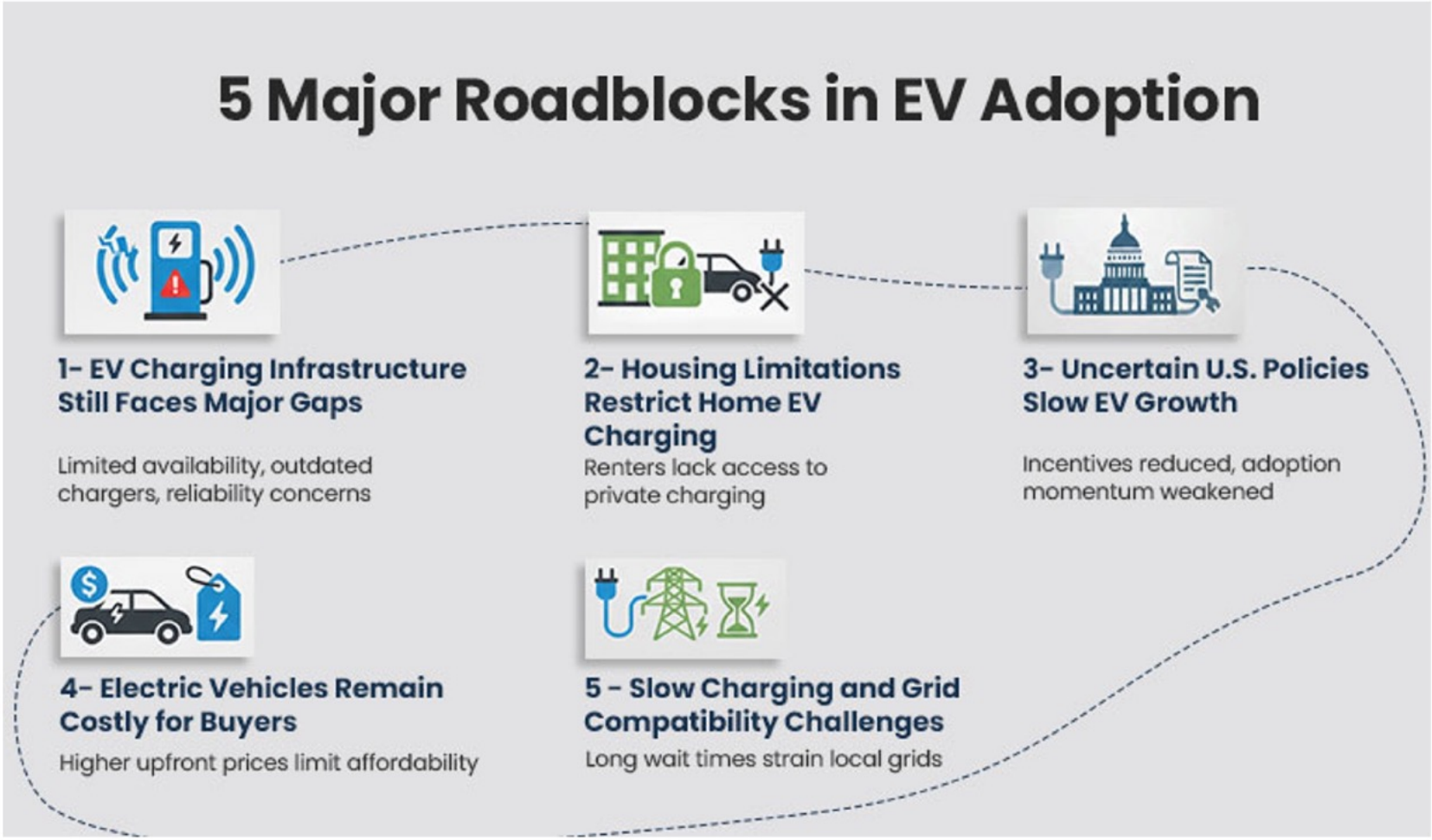


EV stock share, cars



"Global EV Data Explorer – Data Tools - IEA." IEA, May 2026, www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer.

Desafios da eletrificação de veículos nos EUA

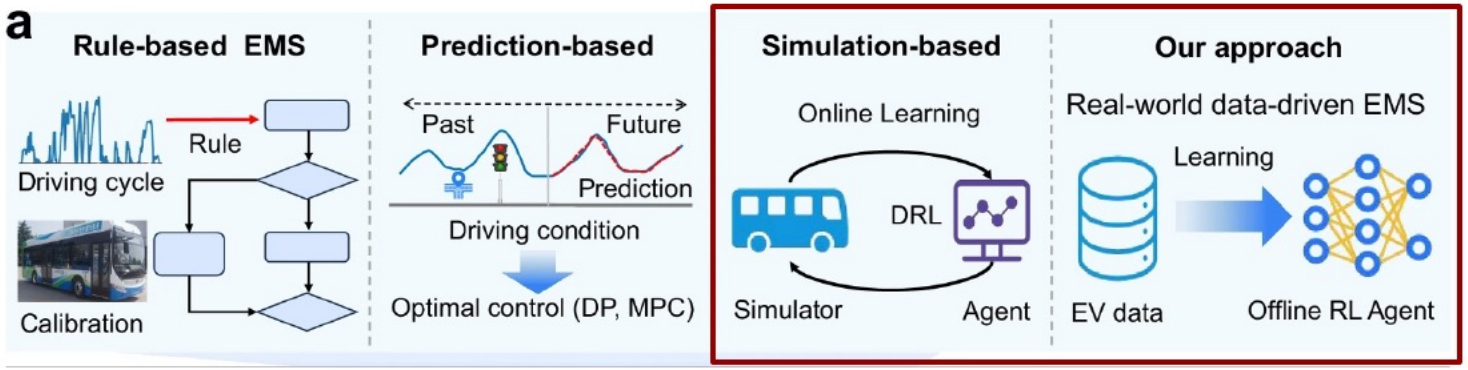


Fonte: SolarSME, 2026

[1] M. Liu et al., “Tariffs on electric vehicles deepen woes of U.S. electrification stagnation,” npj Clim. Action, 2026, doi: 10.1038/s44168-025-00330-6.

Eficiência e vida útil das baterias

- Ampliar autonomia e vida útil da bateria alocando energia com aprendizado por reforço (RL)
- A abordagem poderia aproveitar a plataforma chinesa de monitoramento de VEs, que coleta em tempo real dados operacionais de mais de 20 milhões de VEs



Por que o problema se presta ao RL profundo

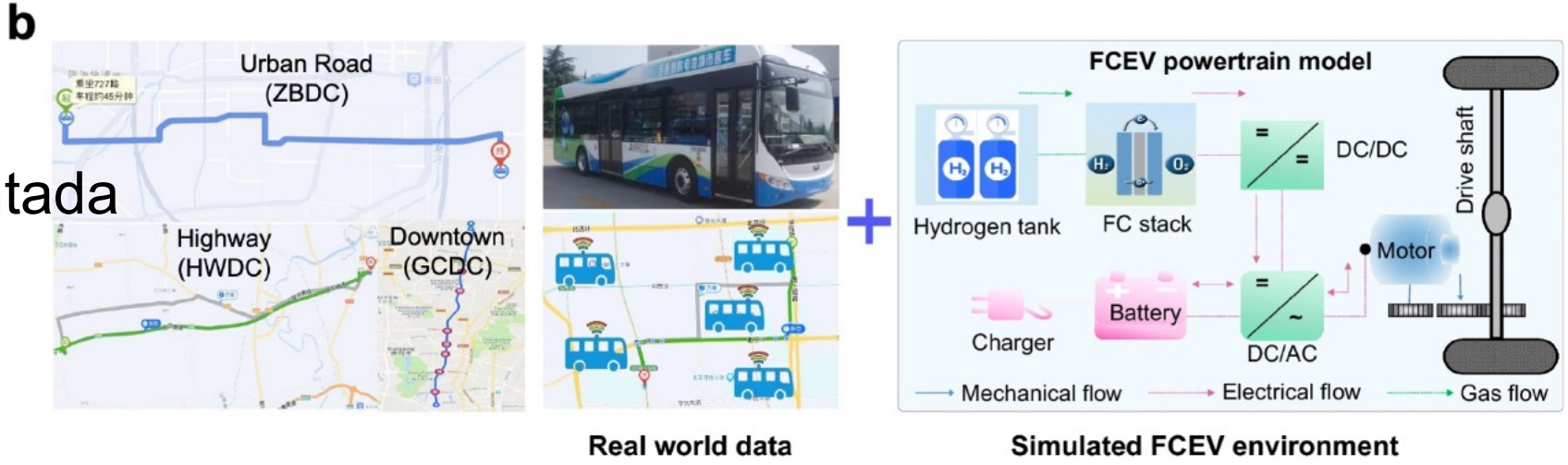
- Condições de tráfego dinâmicas → decisões sequenciais
- Trens de força híbridos complexos (bateria, célula a combustível, combustão) → aprender com os dados
- Aplicação em tempo real → inferência rápida de modelos de AM

[1] X. Hu et al. Reinforcement Learning for Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Management: Recent Advances and Prospects. IEEE Industrial Electronics Magazine 13, 16-25 (2019). https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2913015 .

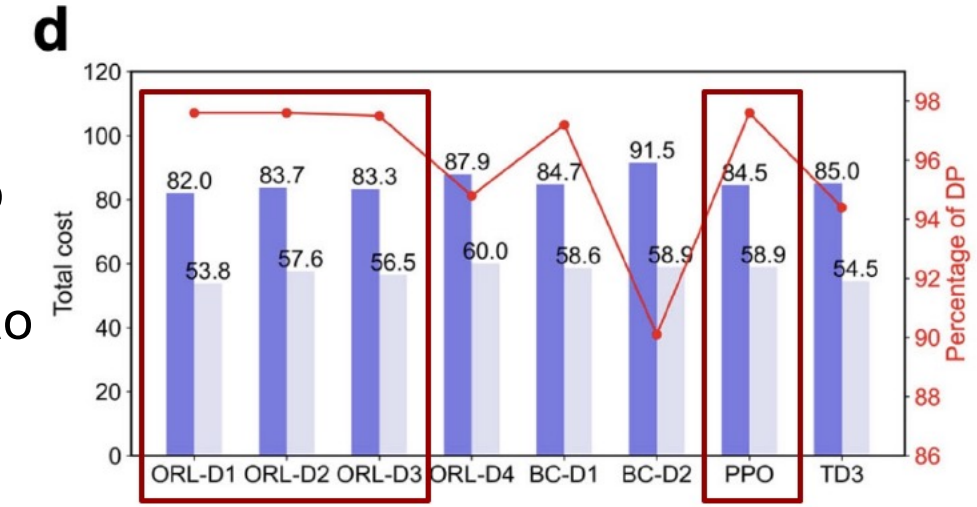
[2] Y. Wang, J. Wu, H. He, Z. Wei, and F. Sun, “Data-driven energy management for electric vehicles using offline reinforcement learning,” Nat Commun, vol. 16, no. 1, p. 2835, Mar. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-58192-9.

Eficiência e vida útil das baterias

Simulação aumentada por dados



O RL atinge desempenho quase ótimo (calculado por programação dinâmica)

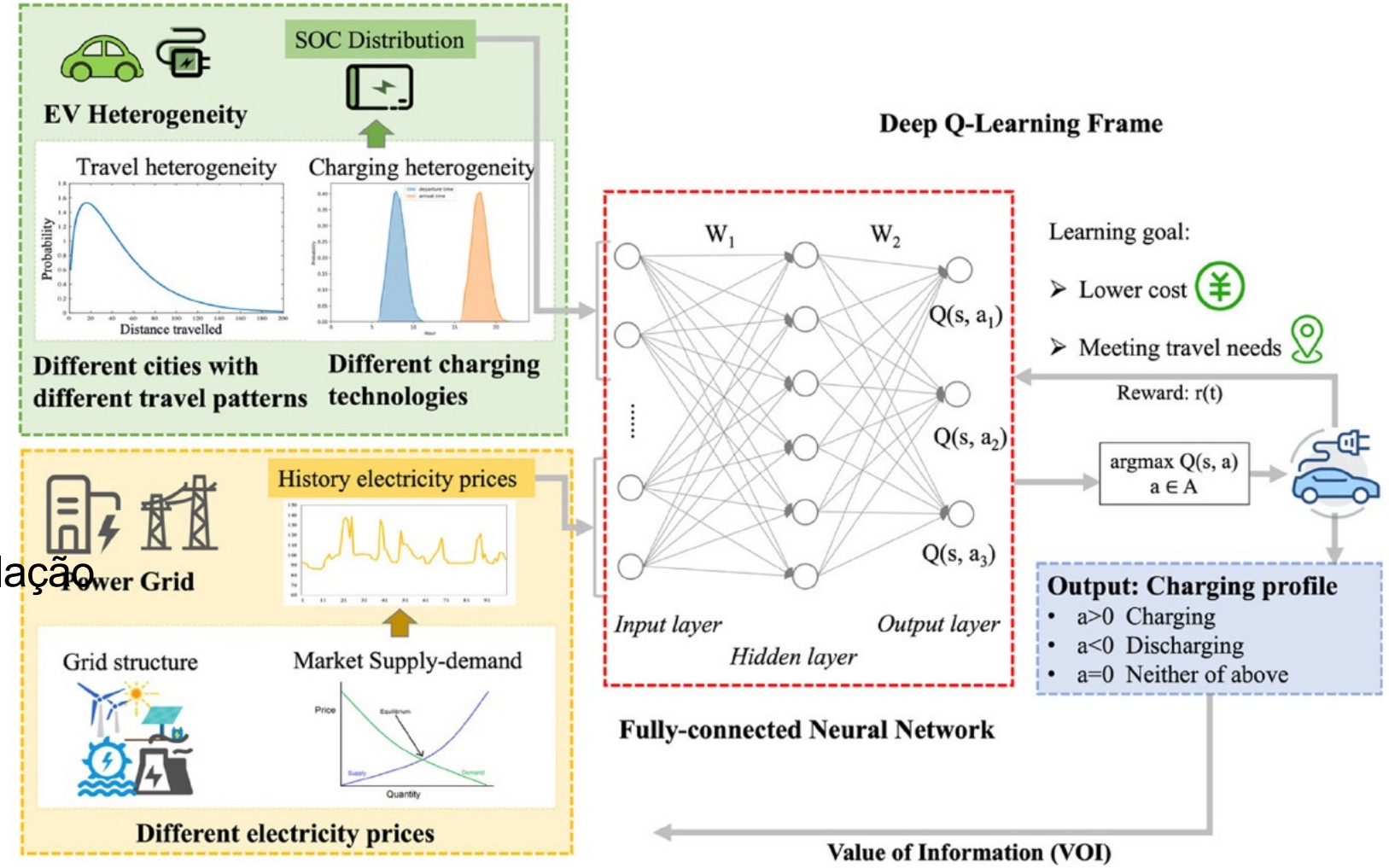


Resultado: o RL reduz o custo total em 13% em relação ao controlador original
Ressalva: o método original não considera a vida útil da bateria, o RL sim (penaliza a inclinação de potência)

[1] Y. Wang, J. Wu, H. He, Z. Wei, and F. Sun, “Data-driven energy management for electric vehicles using offline reinforcement learning,” Nat Commun, 2025.

Recarga inteligente / bidirecional (V2G)

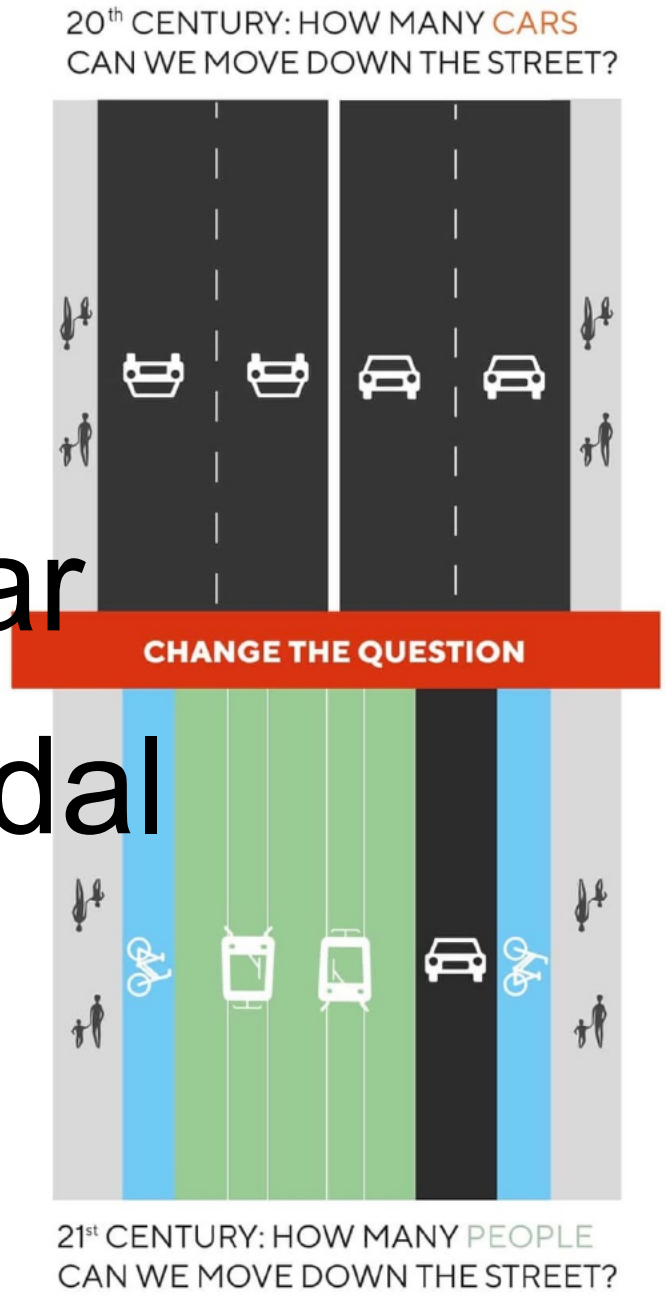
- VEs podem atuar como armazenamento distribuído para deslocar a carga urbana
- Usa Q-learning profundo (DQN) para aprender políticas de carga/descarga sob preços e restrições de mobilidade
- 1 milhão de km de dados de condução de VEs chineses
- A política DQN economizou 98% no custo de eletricidade em relação a carregar o quanto antes (referência fraca)



Hao, Xu, et al. "A V2G-oriented reinforcement learning framework and empirical study for heterogeneous electric vehicle charging management." Sustainable Cities and Society, vol. 89, 1 Feb. 2023, p. 104345, doi:10.1016/j.scs.2022.104345.

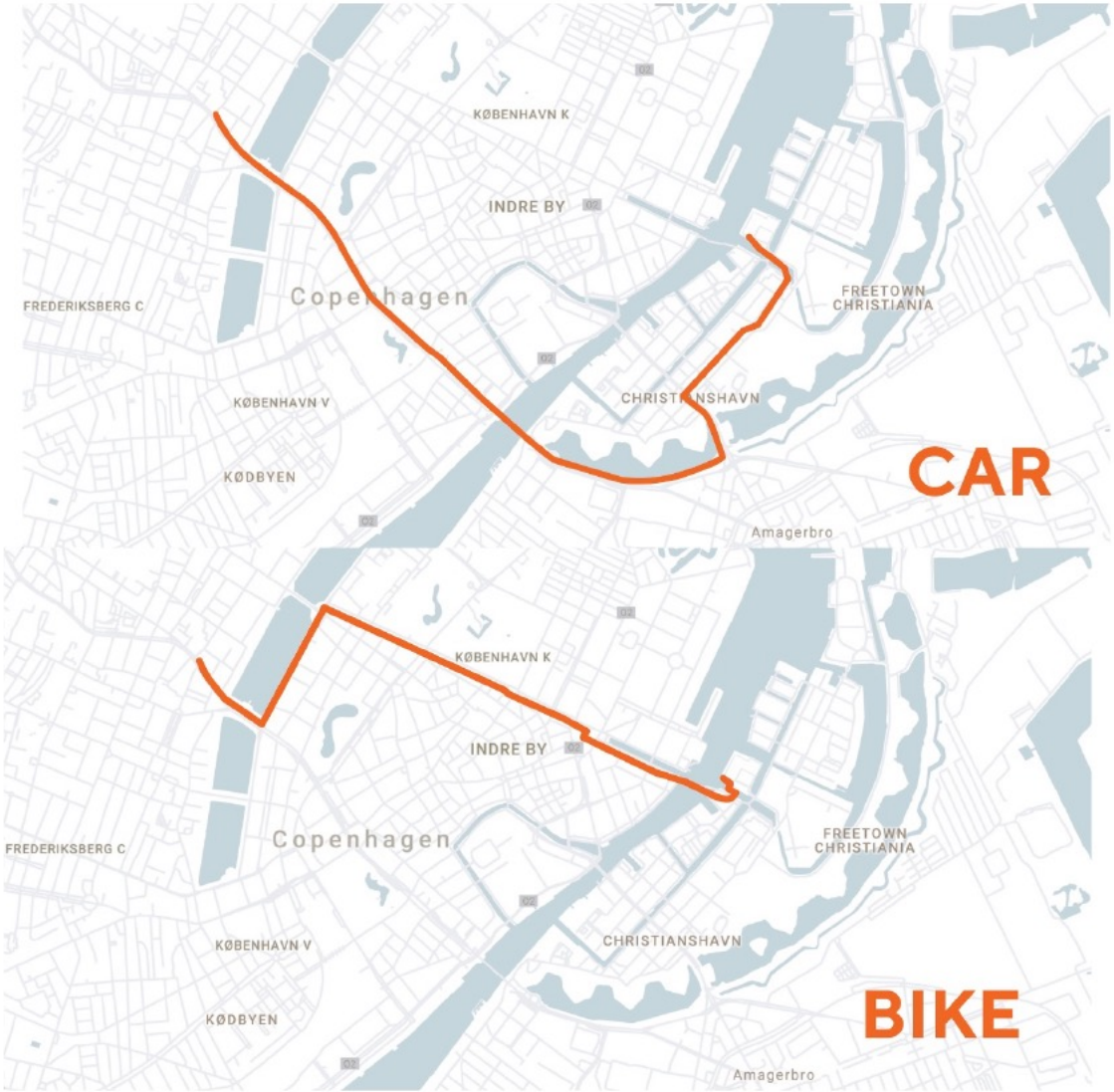
Aprofundamento: Mudar

IA para a mudança modal



Fonte: Copenhagenize Design Company/Mikael Colville-Andersen, 2018.

Por que bicicleta? (Copenhague, Dinamarca)





Fonte: Copenhagenize Design Company/Mikael Colville-Andersen, 2018.

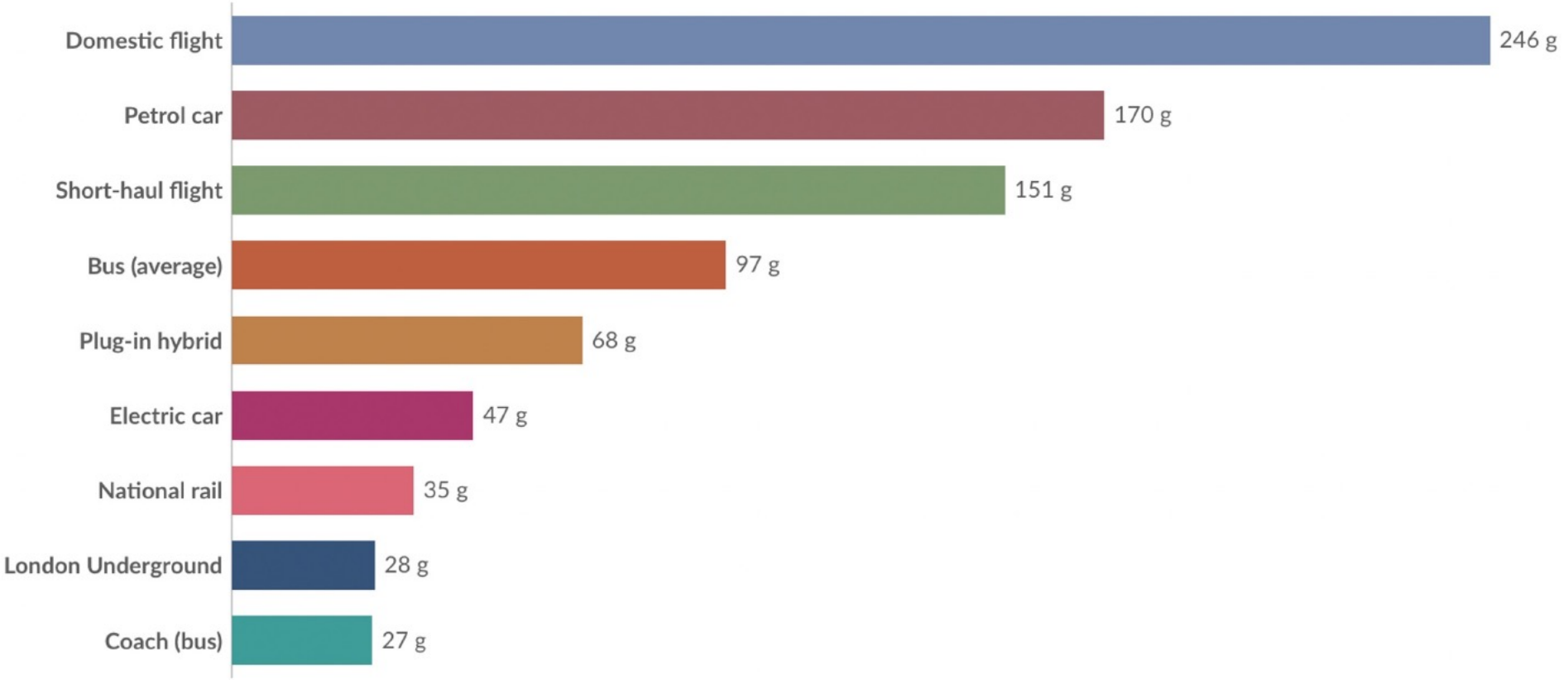
Carbon footprint of travel per kilometer, 2022

The carbon footprint of travel is measured in grams of carbon dioxide-equivalents per passenger kilometer. This includes the impact of increased warming from aviation emissions at altitude.

Our World in Data

Table | Bar

Edit countries and regions



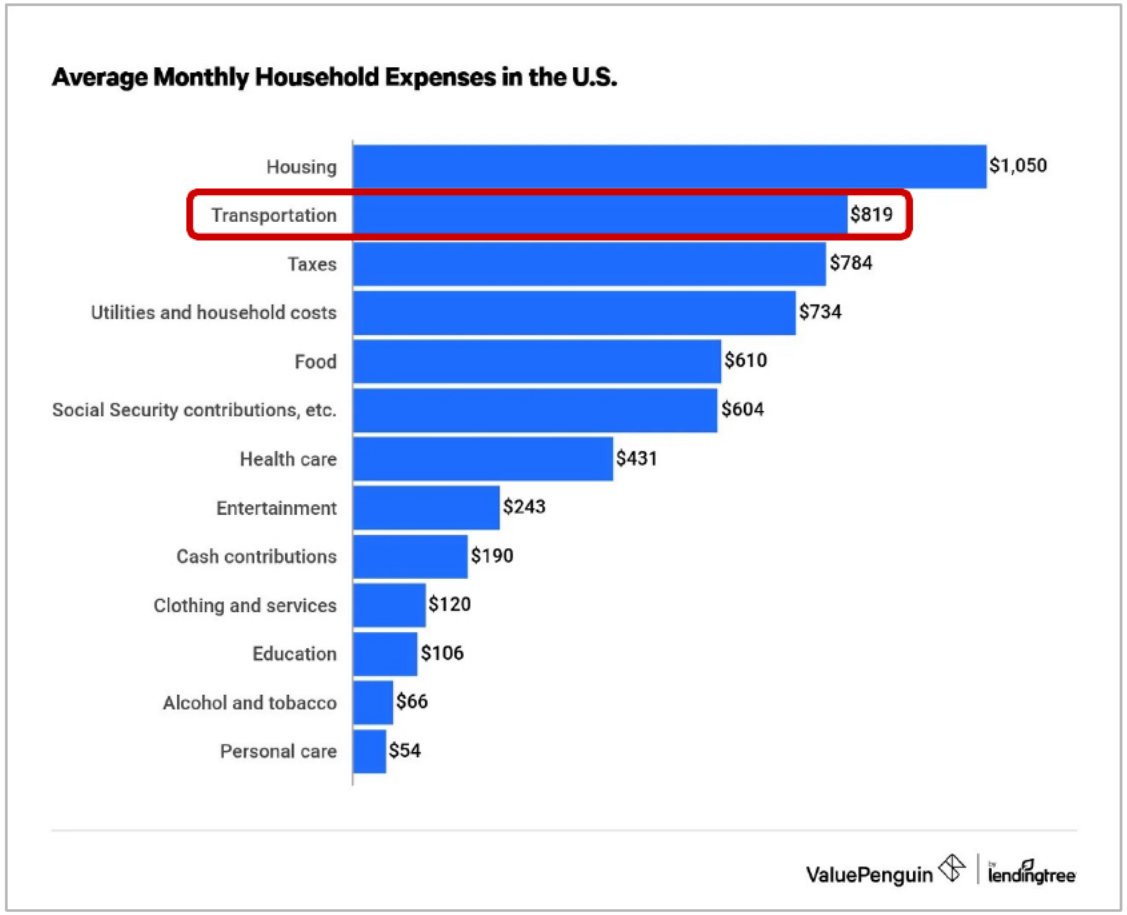
Data source: UK Government, Department for Energy Security and Net Zero (2022) – Learn more about this data

Note: Official conversion factors used in UK reporting. These factors will vary across countries depending on energy mix, transport technologies, and occupancy of public transport. Data for aviation is based on economy class.

OurWorldinData.org/transport | CC BY

Acessibilidade financeira e acesso

Em 2024, 45,5% dos domicílios dos EUA não ganhavam o suficiente para fechar as contas.



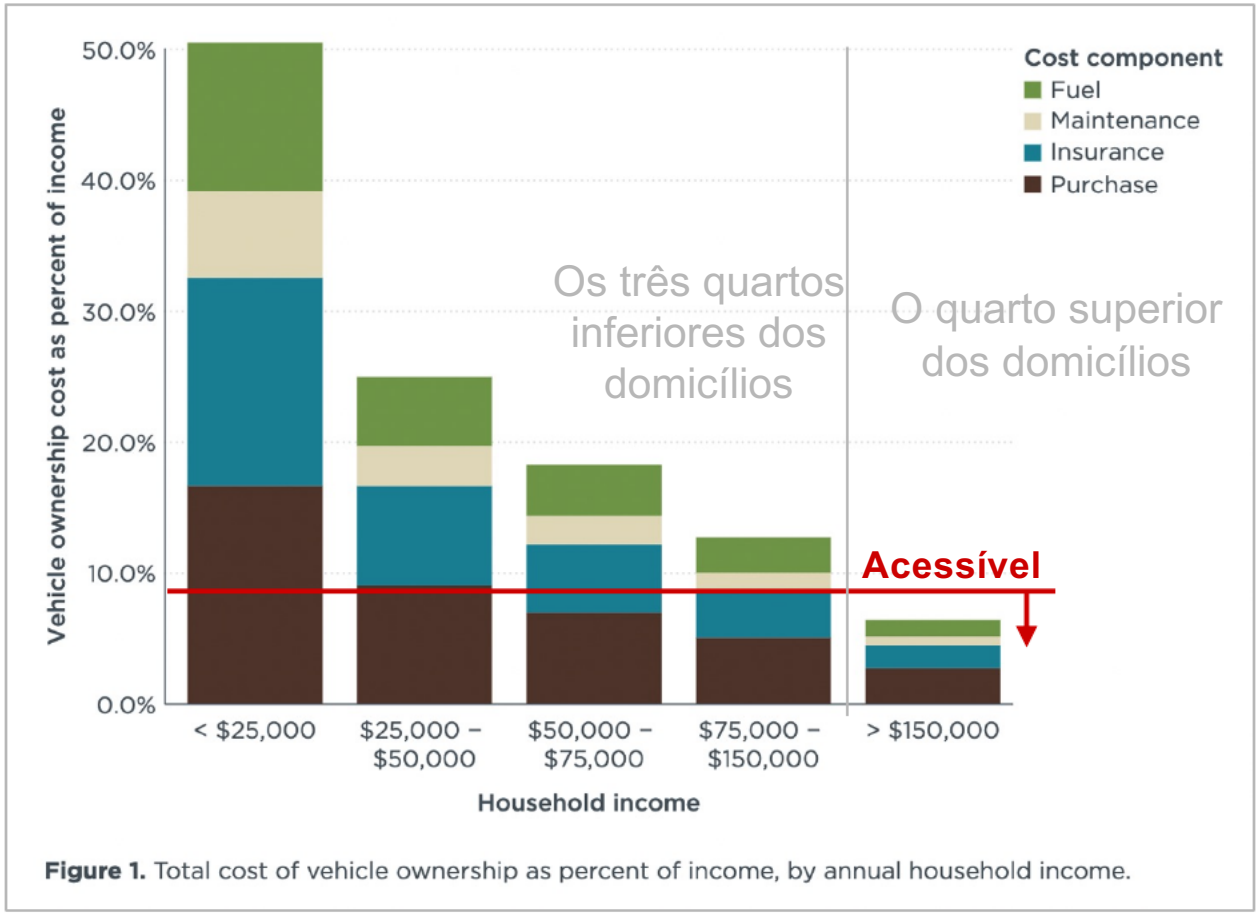


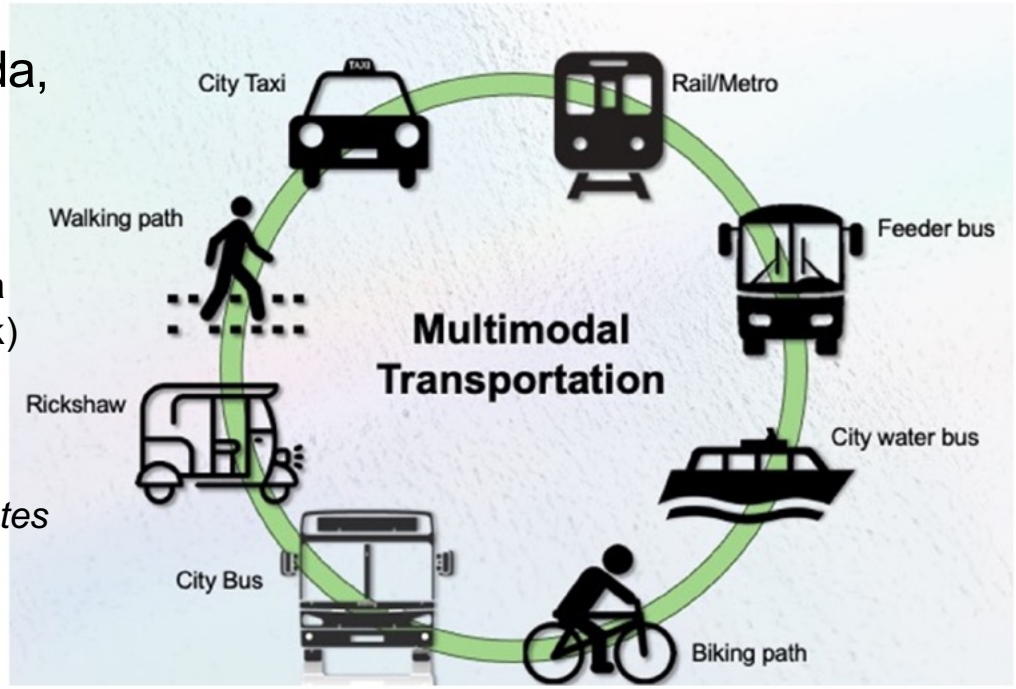
Figure 1. Total cost of vehicle ownership as percent of income, by annual household income.

[1] "States of Affordability: A series on where and why US households struggle to make ends meet | Brookings." Brookings, 24 June 2026, www.brookings.edu/articles/states-of-affordability-a-series-on-where-and-why-us-households-struggle-to-make-ends-meet .

[2] Bauer, Gordon, Chih-Wei Hsu, and Nic Lutsey. "When might lower-income drivers benefit from electric vehicles? Quantifying the economic equity implications of electric vehicle adoption." International Council on Clean Transportation. Working Paper 6 (2021).

Mobilidade urbana multimodal

- Definição: uma abordagem de transporte que apoia todos os modos de deslocamento (veículos particulares, a pé, bicicleta, transporte público, mobilidade compartilhada, combinações de modos etc.).
- Estratégias
  - Transporte público
  - Desenho viário: ciclovias, redução de faixas, prioridade semafórica
  - Pedágio urbano (Bloomberg sobre o pedágio urbano de Nova York)
  - Planejamento de viagens e orientação em tempo real
  - Mobilidade como serviço (MaaS), incl. pagamento integrado
- Por que é difícil
  - *Integração física: as conexões devem ser rápidas, seguras e convenientes*
  - *Coordenação institucional: muitos órgãos públicos e operadores privados*
  - *Interoperabilidade de dados: horários, tarifas, rotas e atualizações em tempo real precisam se conectar*
  - *Modelo de negócio: quem paga, quem se beneficia, quem compartilha os dados?*
  - *Equidade e privacidade: um serviço integrado não deve excluir usuários de baixa renda ou com pouco acesso a dados*



Fonte: Audirac, Ivonne, et al. "Transportation and Mobility Modes." 2024.

[1] StreetLight, "Multimodal Transportation: What Is It, and How Does It Benefit Everyone?", 2024, www.streetlightdata.com/what-is-multimodal-transportation.

IA para simulação de transportes baseada em agentes

Previsão da demanda de viagens

A previsão da demanda de viagens é essencial para avaliar e planejar os sistemas de transporte

- Por que, quando e como as pessoas viajam?

Por quê

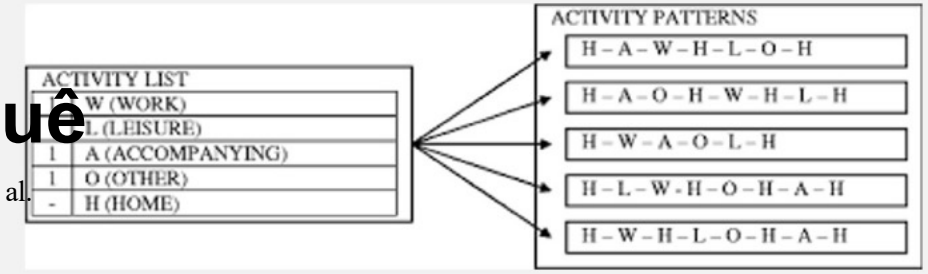


Imagem: Bifulco et al.

Quando

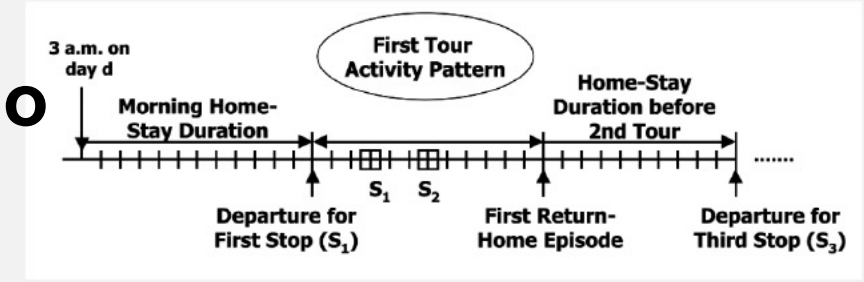


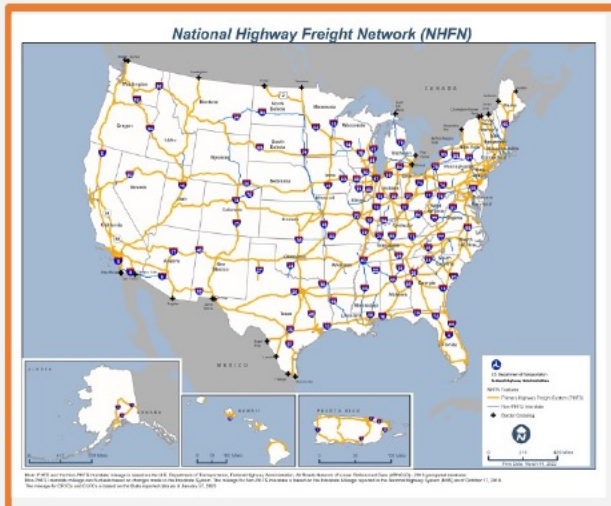
Imagem: Pinjari e Bhat

Como

$$U_c = \alpha T_c + \beta M_c + \varepsilon_c$$
$$U_b = \alpha T_b + \beta M_b + \theta_b Y + k_b + \varepsilon_b$$

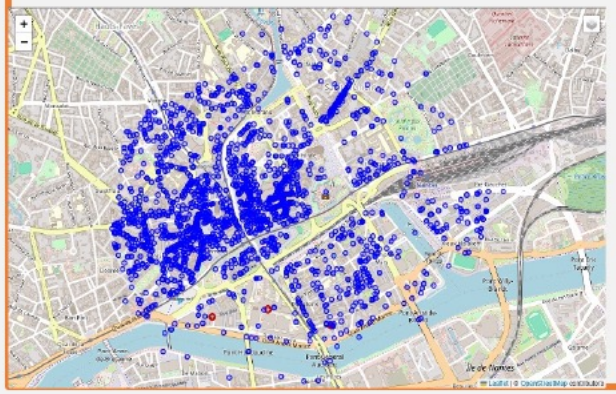
Imagem: Train

apoia



Modelagem do sistema

Imagem: FHWA



Dinâmica Simulação

Imagem: Matsim

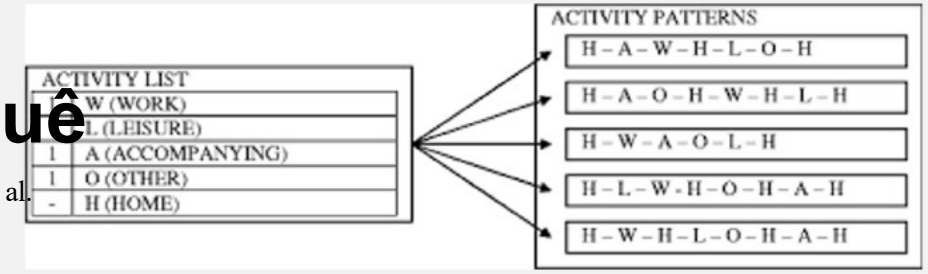
Slides adaptados de Tianming Liu (tianmliu@umich.edu)

Impacto da previsão da demanda de viagens

A previsão da demanda orienta decisões cruciais de planejamento e investimento dos órgãos públicos, do nível federal ao local.

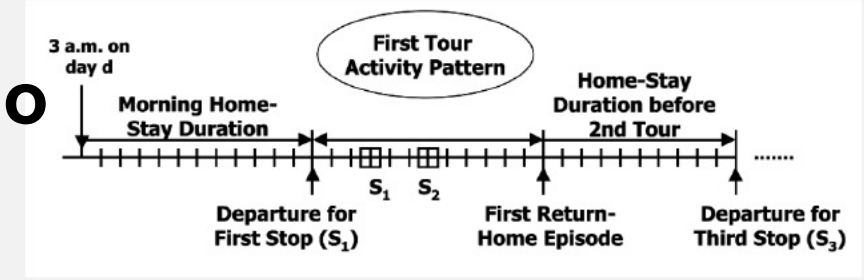
Por quê

Imagem: Bifulco et al.



Quando

Imagem: Pinjari e Bhat



Como

Imagem: Train

$$U_c = \alpha T_c + \beta M_c + \varepsilon_c$$
$$U_b = \alpha T_b + \beta M_b + \theta_b Y + k_b + \varepsilon_b$$

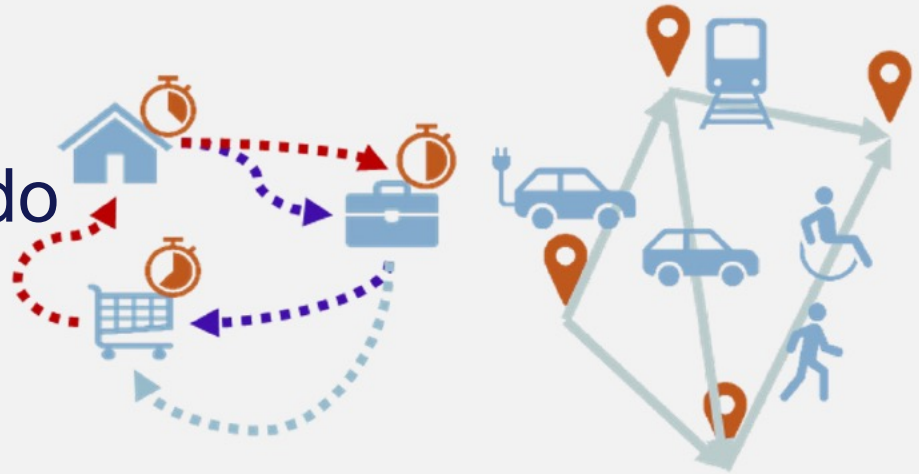
Orienta

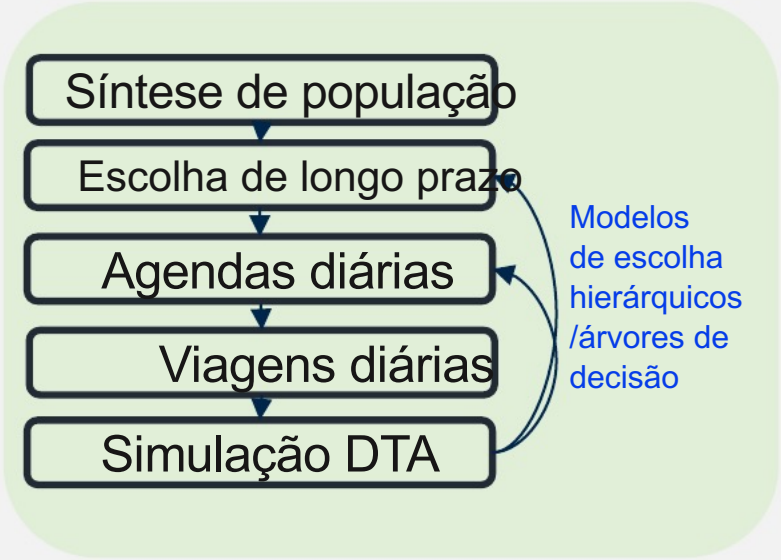




Modelagem da demanda baseada em atividades

- O paradigma mais avançado de modelagem da demanda
- Trabalhos recentes usam sobretudo simulação baseada em agentes





Os agentes seguem regras condição-ação codificadas para programar atividades e viagens. Podem aprender, adaptar-se e melhorar suas interações com outros agentes e com o ambiente dinâmico.

Limitações das abordagens existentes

- As limitações se devem sobretudo às premissas e à **complexidade de montar um bom modelo**

Necessidade de premissas de modelo

Exemplo: modelo MNL

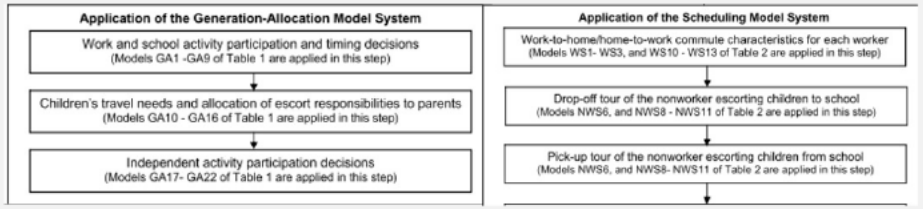
Assumption 1:
- We assume that the error terms each follow the Type-2 extreme value distribution (Gumbel distribution):
  - $\epsilon_{1n} \sim Gumbel(\eta, \mu)$
  - $\epsilon_{2n} \sim Gumbel(\eta, \mu)$

Assumption 2:
- We assume that ϵ_{1n} and ϵ_{2n} are independent and identically distributed (i.i.d.) across individuals, and independent of the attributes x_n.

Os modelos exigem premissas a priori para funcionar

Calibração complexa

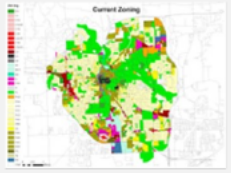
Exemplo: um ABM típico



Ao todo, 49 modelos precisam ser calibrados para modelar o comportamento de viagem

Demanda de dados complexa











É preciso muitos dados para montar o modelo (senão os parâmetros são emprestados)

Agentes LLM e suas aplicações em simulação

Simulacros de comportamento humano

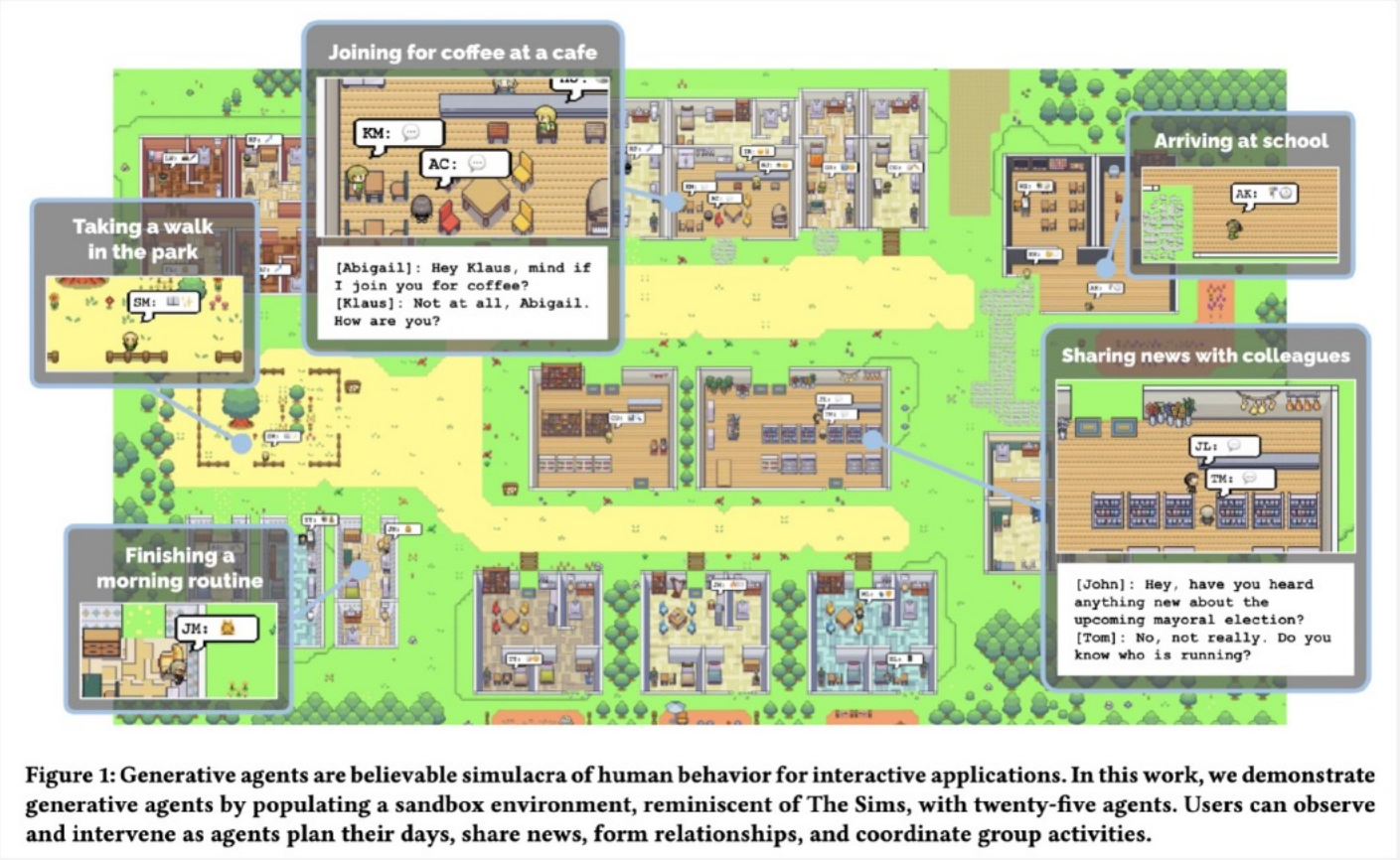


Figure 1: Generative agents are believable simulacra of human behavior for interactive applications. In this work, we demonstrate generative agents by populating a sandbox environment, reminiscent of The Sims, with twenty-five agents. Users can observe and intervene as agents plan their days, share news, form relationships, and coordinate group activities.

Gemini

Qwen3

interpretação de papéis



J. S. Park, et al., "Generative agents: Interactive simulacra of human behavior," in Proceedings of the 36th annual acm symposium on user interface software and technology, 2023.
Grossmann, et al., AI and the transformation of social science research, Science, 2023, 380 (6650).

Slides adaptados de Tianming Liu (tianmliu@umich.edu)

O LLM como substituto do comportamento humano

- Hipótese-chave: LLMs podem atuar como “amostras de silício”
- O principal motivo é que os LLMs têm três propriedades-chave:

Imitação no aprendizado



Interação semelhante à humana



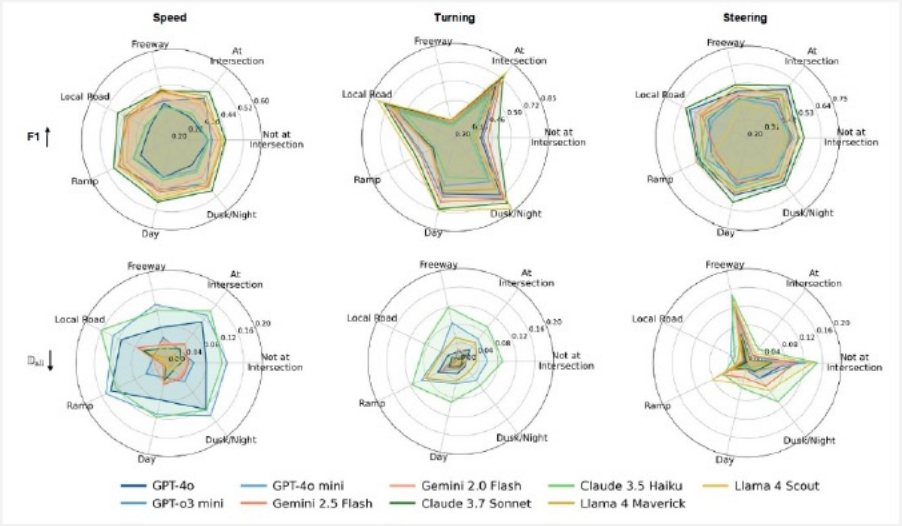
Seguir instruções e interpretar papéis



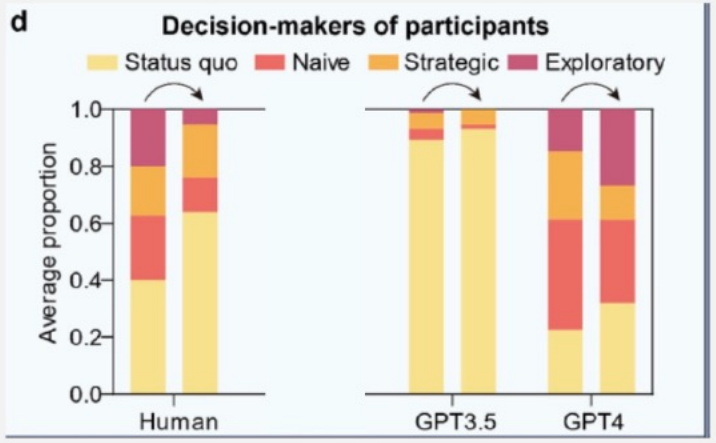
Pergunta crítica: até que ponto se alinham ao comportamento de viagem humano?

* Grossmann, et al., AI and the transformation of social science research, Science, 2023, 380 (6650).
** Hutson, M., Can AI chatbots replace human subjects in behavioral experiments. Science, 2023, 381(6654).

LLMs parecem humanos, mas não são autenticamente humanos



Condução autônoma: mais alinhados a motoristas agressivos



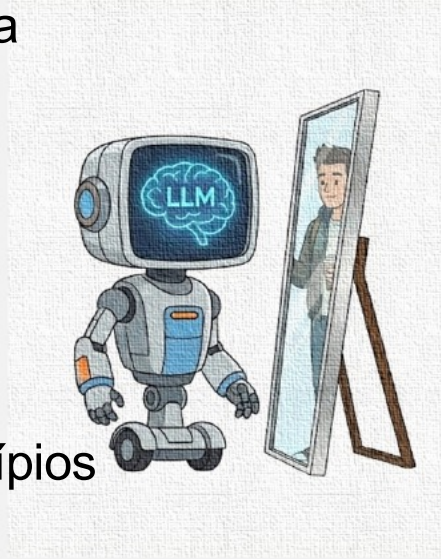
É preciso alinhamento

Jogos de congestionamento: aprender a adaptação da escolha de rota

Purpose	Income Elasticity			
	USDOT	Binsuwadan et al. (2023)*	Shires and de Jong (2009)**	GPT-4o
Commute	1	0.37	0.67	0.24
Business	1	0.53	0.47	0.21
Leisure	1	0.53	0.52	0.22
Personal	1	0.53	0.52	0.22

Valor do tempo: elasticidades menores

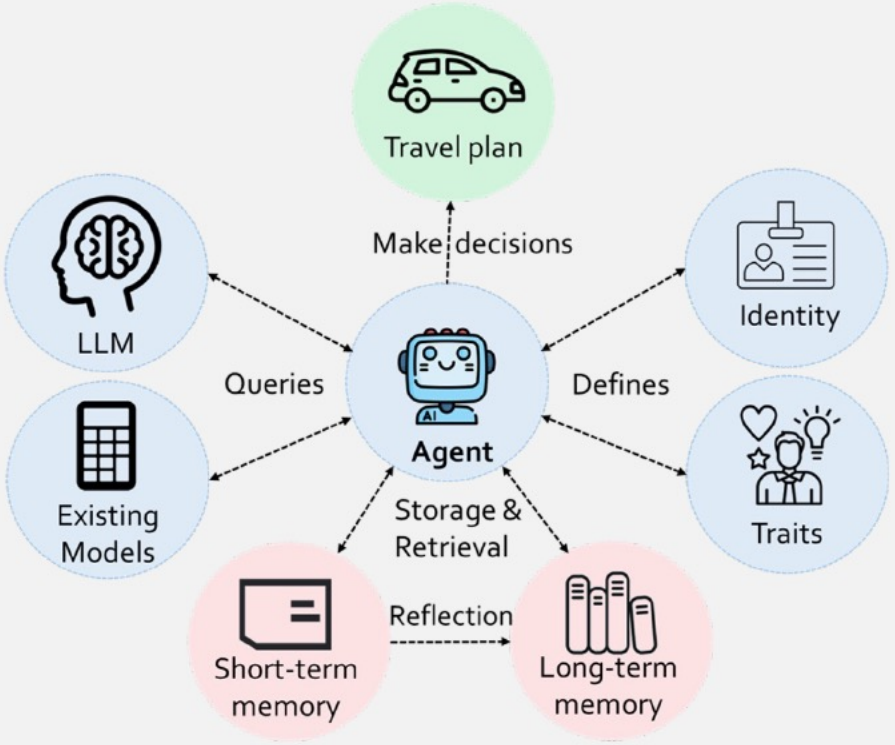




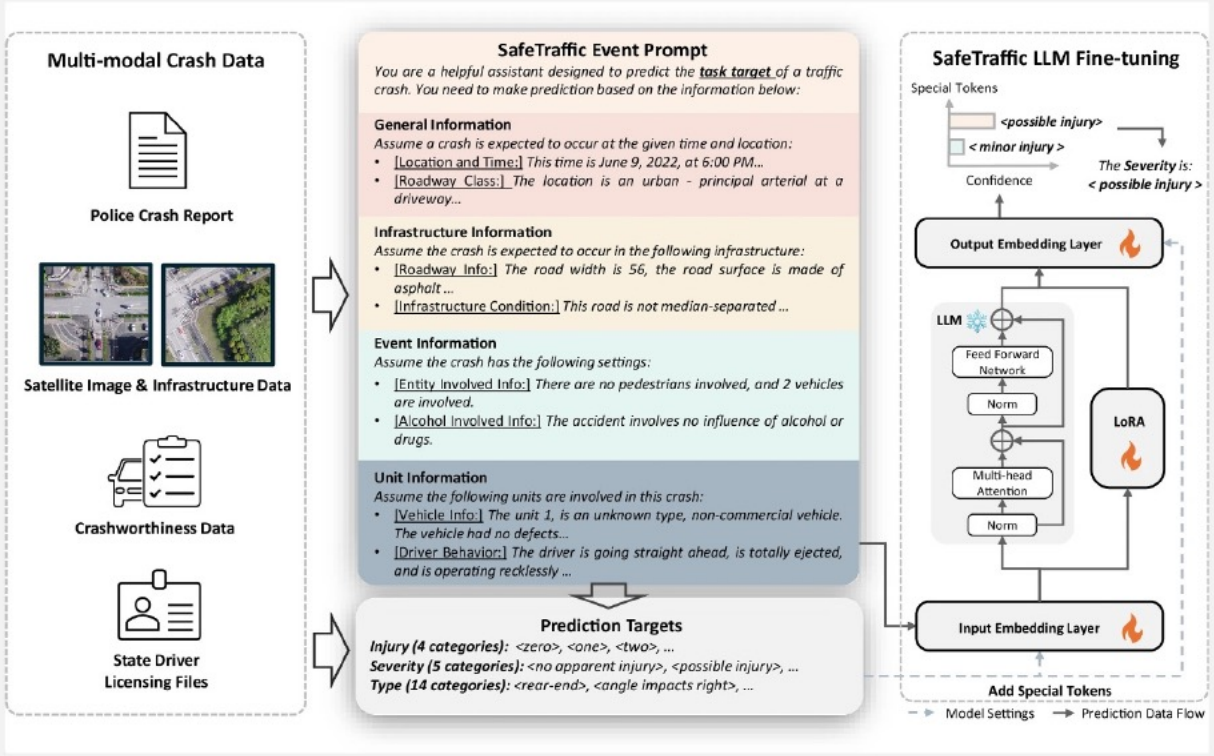
Ética na condução: viés nos princípios

Wang, P., et al. "LLM agents can partially mimic human driving behaviors…." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 186 (2026): 105606.
Xu, Z. et al.. (2025). Where is morality on wheels? …. Travel Behaviour and Society, 40, 101039.
Wang, L. et al. (2025). Comparing AI and human decision-making mechanisms in daily collaborative experiments. Iscience, 28(6).
Yan, Y. et al. (2026). Valuing time in silicon: Can large language models replicate human value of travel time. Travel Behaviour and Society, 44, 101245.

Desenvolvendo LLMs e agentes mais humanos



Agentes e otimização de prompts para imitar a tomada de decisão humana



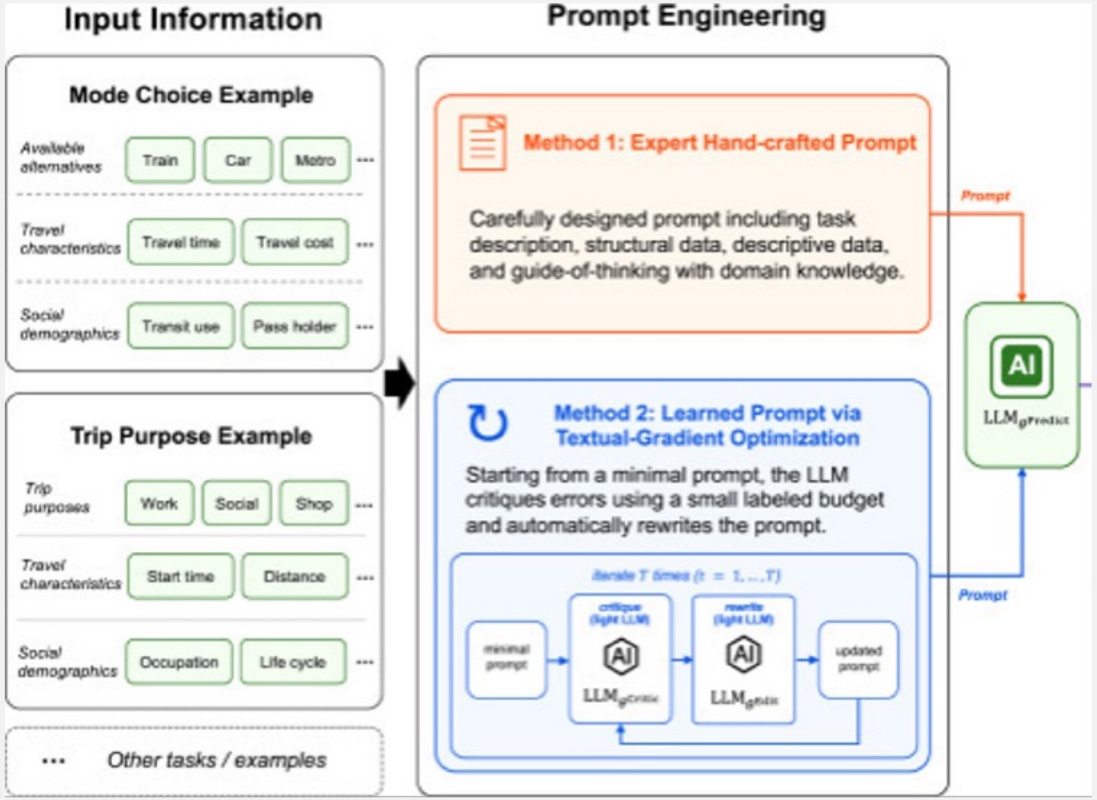
Pós-treinamento para que os LLMs imitem respostas humanas

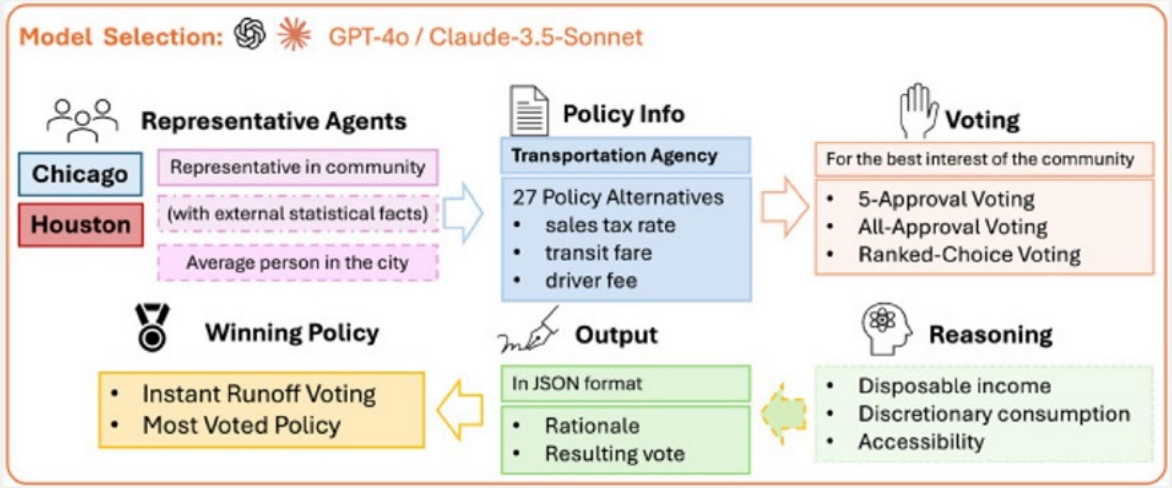
Liu, T. et. al. (2025). Toward LLM-agent-based modeling of transportation systems: A conceptual framework. Artificial Intelligence for Transportation, 1, 100001.

Zhao, Y, et al. (2025). SafeTraffic Copilot: adapting large language models for trustworthy traffic safety assessments and decision interventions. Nature Communications, 16(1), 8846.

Observações da comunidade até agora

O conhecimento interno e a interpretação de papéis dos LLMs podem facilitar a previsão do comportamento de viagem e o planejamento de transportes





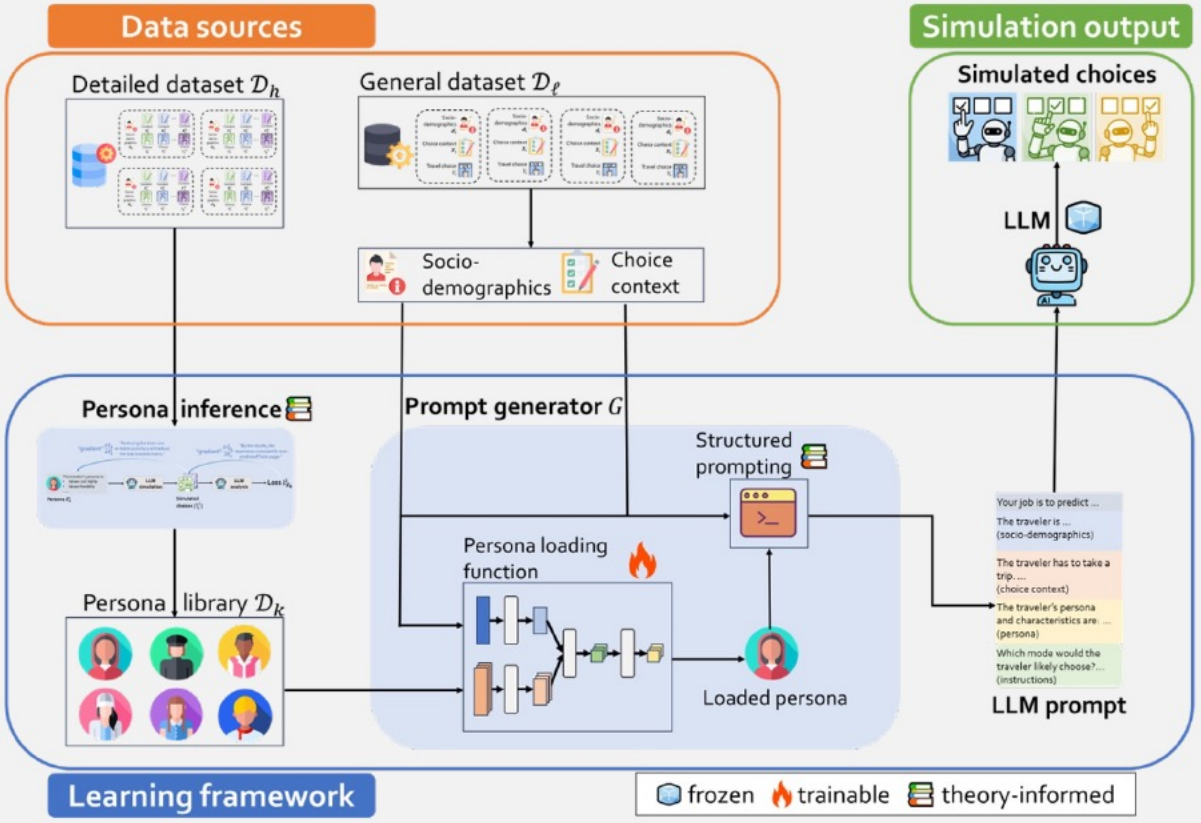
Agentes LLM podem atuar como agentes representativos no planejamento de transportes para reduzir o viés de participação

LLMs podem usar o conhecimento interno para simular o comportamento de viagem

Mo.B. et al. (2026) Large language models for travel behavior prediction. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 38, 102124.
Yan, X., Dai, T., & Nie, Y. M. (2026). Addressing the alignment problem in transportation policy making: an LLM approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 188, 1
Cho, J. H., & Wu, C . (2026). AGORA: Can Deliberation and Governance Gates Absorb Participation Bias in Transit Planning?. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference.

Observações da comunidade até agora

Treinados com poucos dados humanos, agentes LLM podem prever a demanda de viagens melhor que os modelos existentes.



- Agentes LLM precisam de poucos dados humanos para simular bem as escolhas
- Ao relaxar premissas de comportamento, agentes LLM se adaptam a viajantes com comportamentos diversos
- Com memória, arquétipos comportamentais e pós-treinamento com dados humanos, agentes LLM diagnosticam padrões e intenções em rastros de mobilidade e preveem bem as trajetórias

Liu, T. et. al. (2026). Aligning LLM with Humans for Travel Choices: A Persona-Based Embedding Learning Approach. TransportationScience, Articles in Advance.
Liu, T. et al. (2026). Aligning LLM agents with human learning and adjustment behavior: a dual agent approach. TransportationResearch Part C: Emerging Technologies, 191, 105818.
Qin, Z. et.la. (2026). A foundational individual mobility prediction model based on open-source LLMs. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 185, 105562.
Wang, J. et al.. (2024). Large language models as urban residents: An llm agent framework for personal mobility generation. Advances in Neural Information Processing Systems, 37, 124547-124574.

Desafios

Fundamentos e casos de uso

- Identificar o melhor caso de uso e os trade-offs dos LLMs: onde mais ganham e quando é melhor aplicá-los
- Desenvolver abordagens e procedimentos unificados para aplicar LLMs em diferentes contextos

Validação

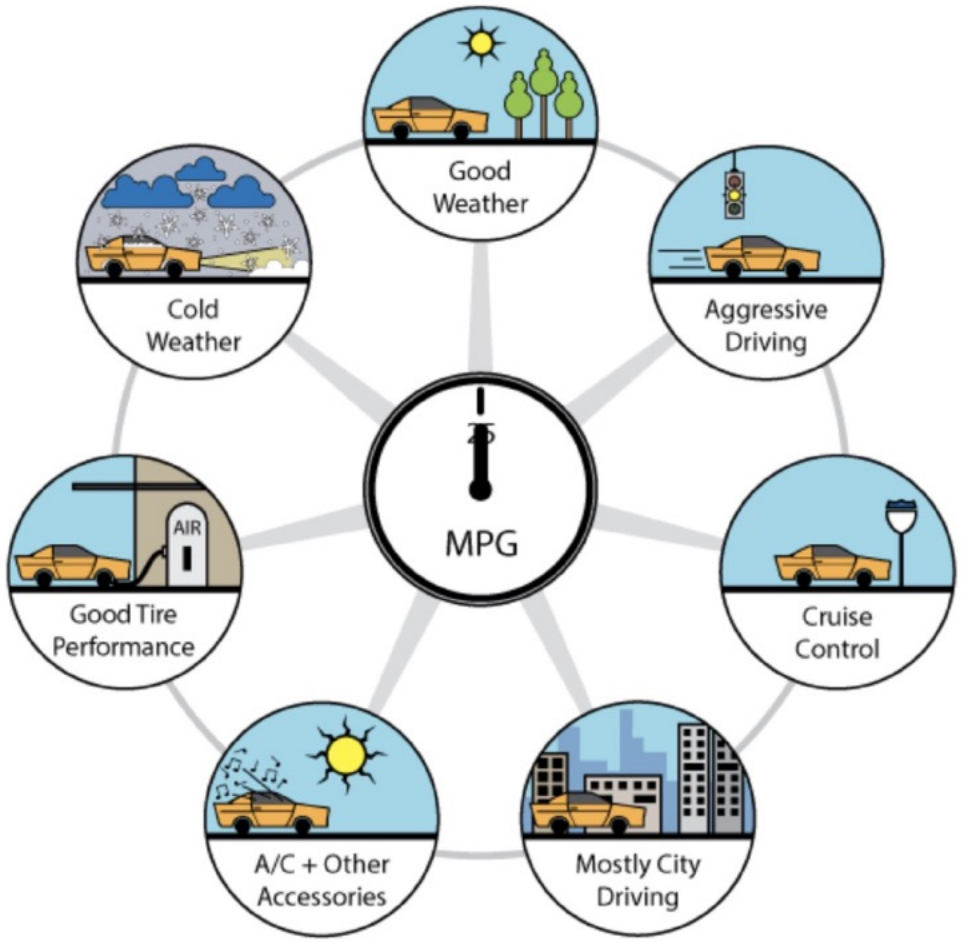
- Avaliação sistemática das capacidades e do desempenho dos LLMs
- Ir além do comportamento observado para o alinhamento de valores

Escalabilidade

- Reduzir custo computacional, consumo de energia e latência em aplicações de larga escala

Aprofundamento: Melhorar IA para a eficiência dos transportes

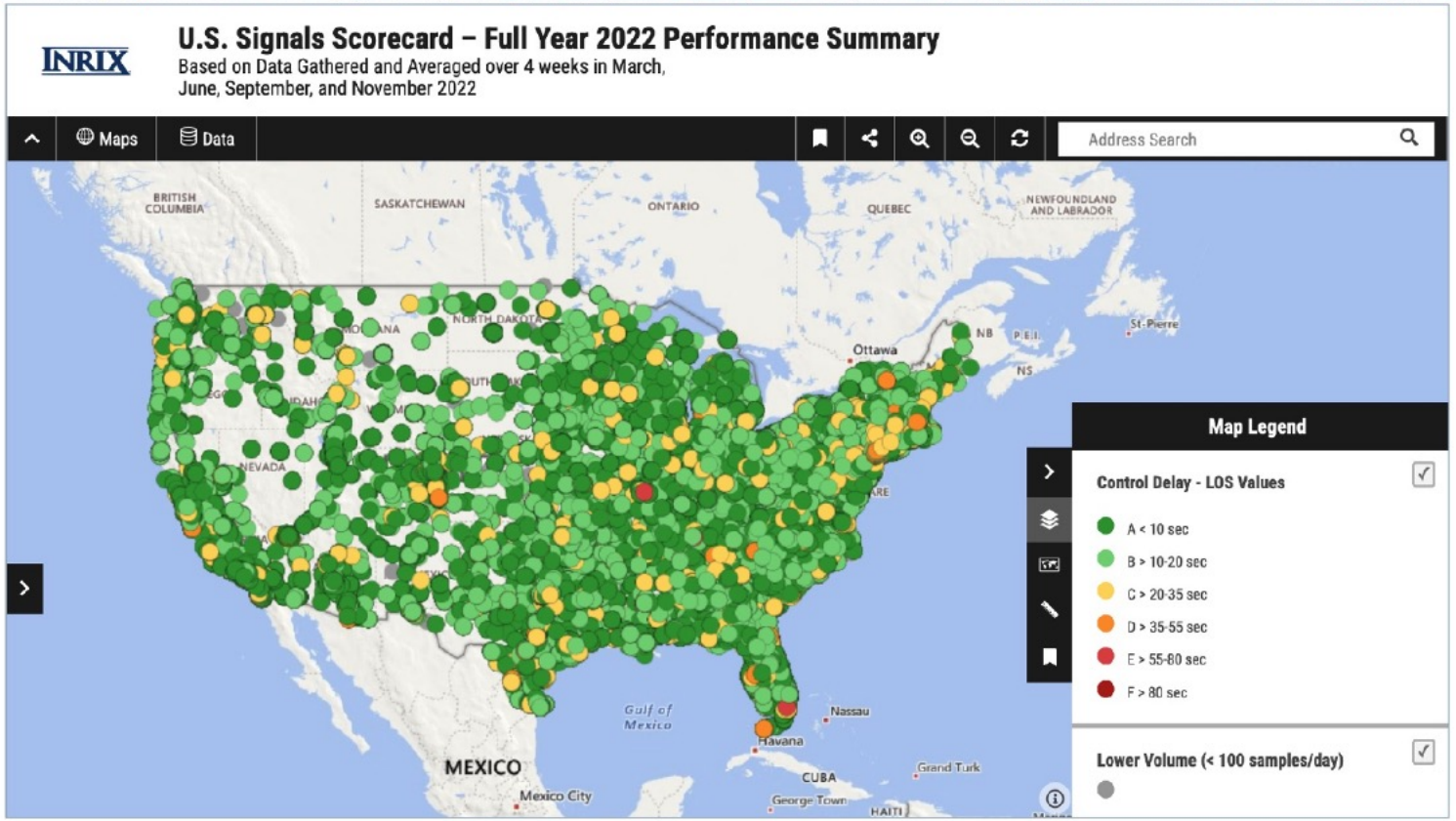
Fatores que afetam o consumo de combustível



Fonte: US EPA, “Your Mileage May Vary,” 2026.

INRIX U.S. Signals Scorecard

2022 Annual Summary



Inputs

~5 Billion
Total Number of Observed Crossings Used to Generate Results

~10 Million
Number of Connected Vehicles Providing Location and Movement Data



242,757
Signalized Intersections Analyzed

All 50 States
(Plus District of Columbia)

400+ Regions

1,150+ Counties

Results

23,308
Intersection Avg Daily Traffic

18.1
Seconds of Delay Per Vehicle

63.5%
Arrival on Green

117.4
Total Hours of Daily Delay

2.53 Days
Days to Generate 1 Metric Tonne of Carbon Emissions From Delay

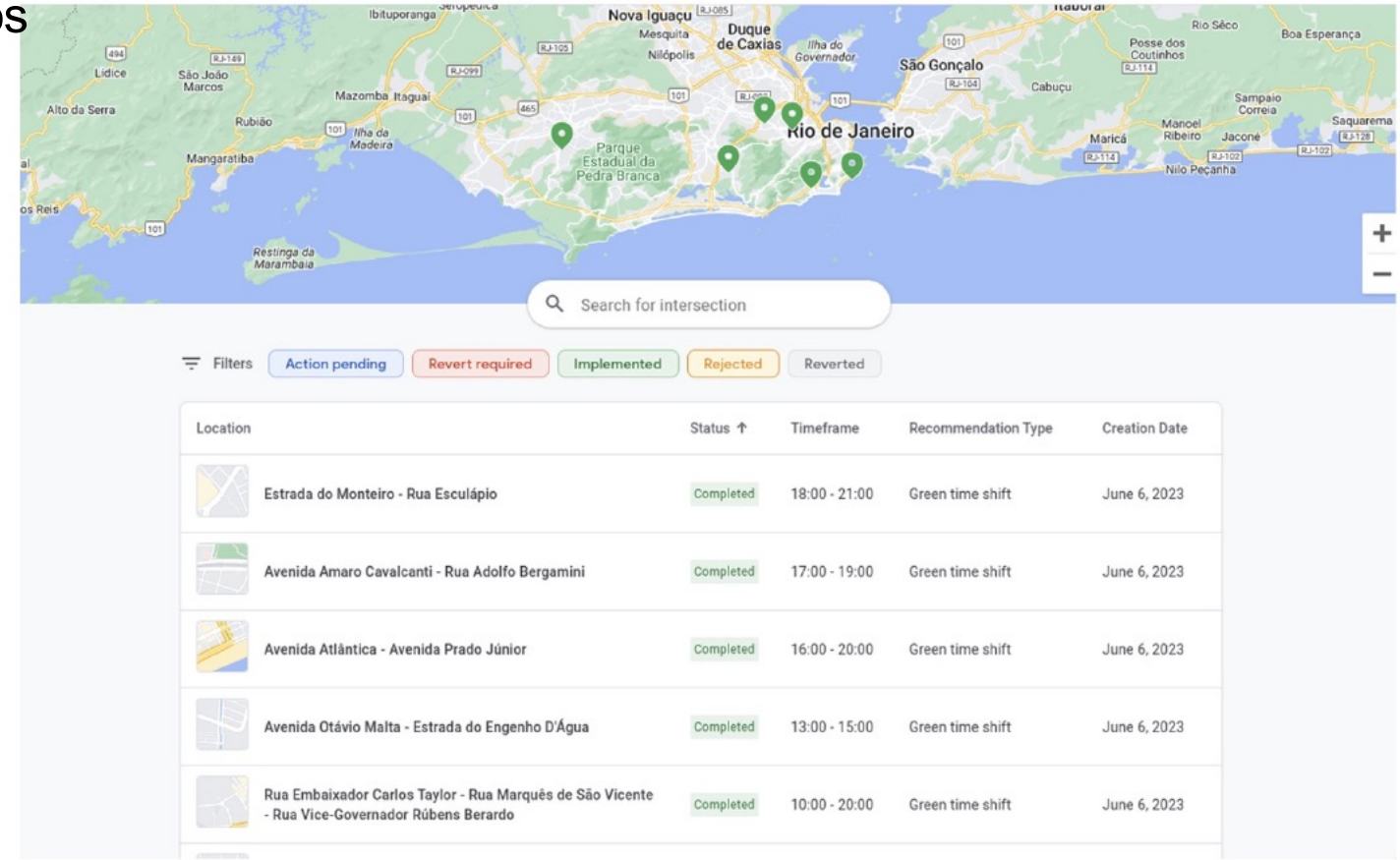
0.97 Days
Days to Consume 1 Barrel of Oil From Delay

Average Traffic Signal

INRIX U.S. Signals Scorecard: 2022 Annual Summary. INRIX. https://inrix.com/signals-scorecard/.

Project Green Light (Google AI)

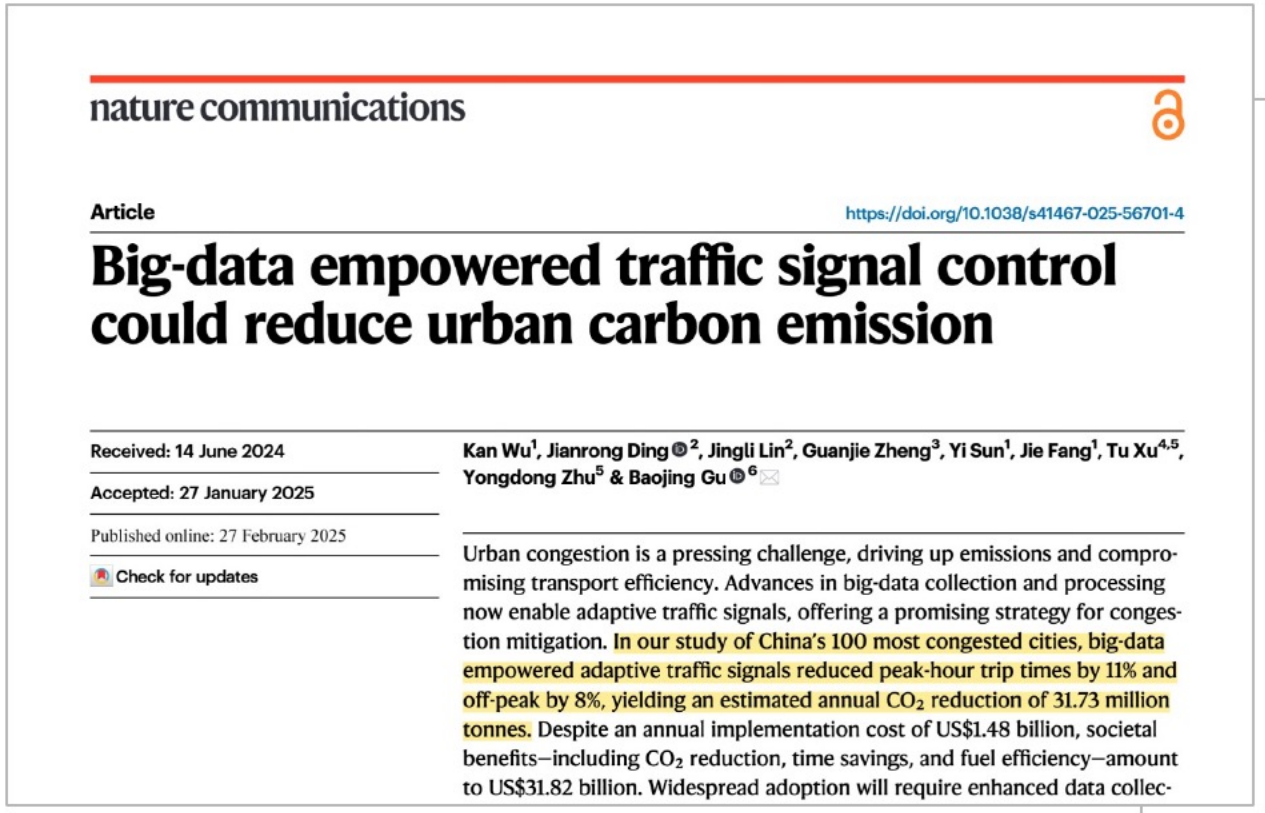
- Big data para a temporização de semáforos
  - Lançado em 2023; ativo em 20 cidades
  - Até 30% menos paradas e 10% menos emissões de GEE*
- Usa IA para inferir os parâmetros atuais de semáforos de tempo fixo
  - Duração do ciclo
  - Tempo de transição
  - Divisão do verde (tempo e ordem de passagem)
  - Coordenação
  - Funcionamento dos sensores (atuação)
- Faz recomendações aos engenheiros de tráfego das cidades sobre ajustes nos parâmetros dos semáforos



* Nenhuma auditoria independente disponível

Google AI's Green Light. sites.research.google/gr/greenlight.

IA para a otimização de semáforos



nature communications

Article

https://doi.org/10.1038/s41467-025-56701-4

Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission

Received: 14 June 2024

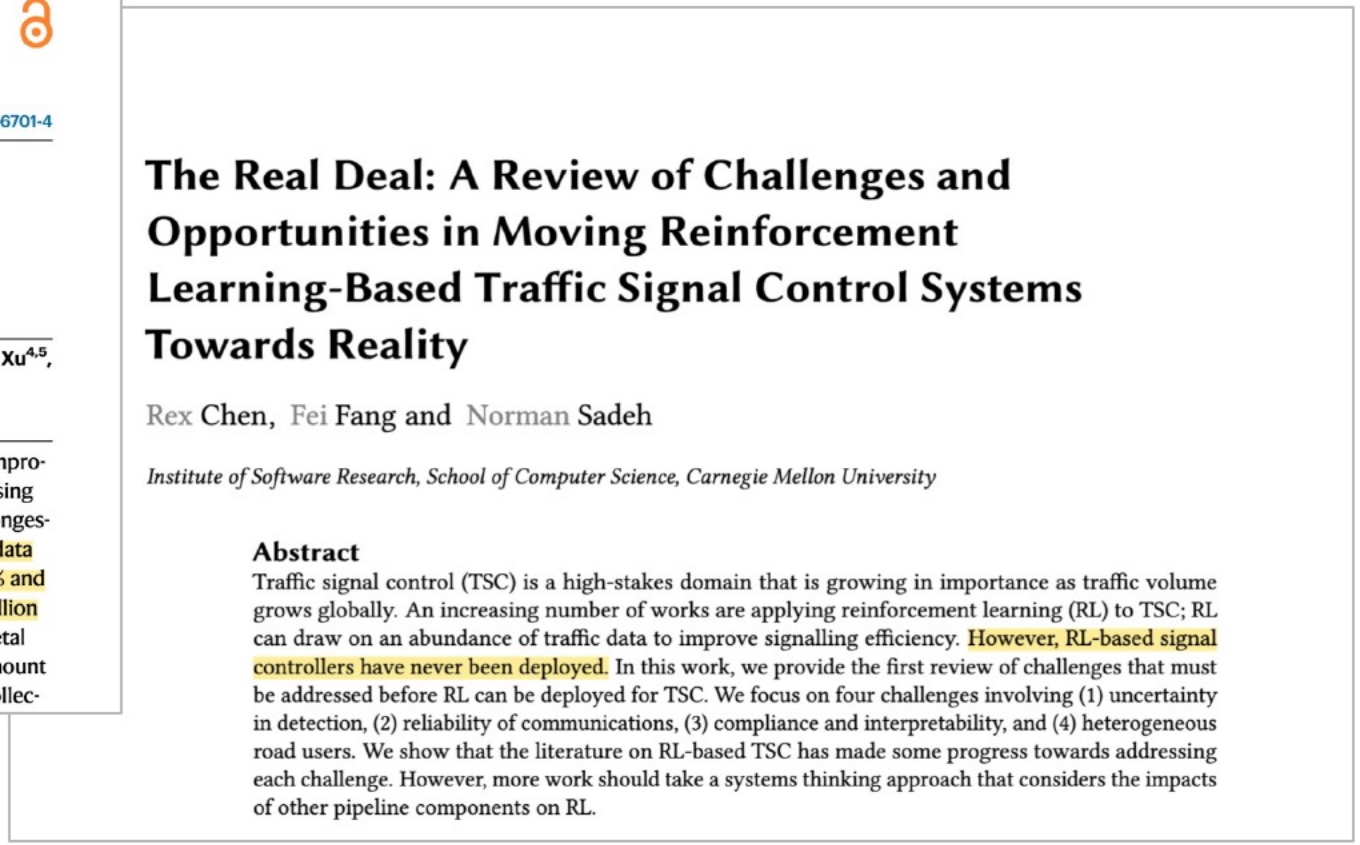
Accepted: 27 January 2025

Published online: 27 February 2025

Check for updates

Kan Wu[1], Jianrong Ding[2], Jingli Lin[2], Guanjie Zheng[3], Yi Sun[1], Jie Fang[1], Tu Xu[4,5], Yongdong Zhu[5] & Baojing Gu[6]

Urban congestion is a pressing challenge, driving up emissions and compromising transport efficiency. Advances in big-data collection and processing now enable adaptive traffic signals, offering a promising strategy for congestion mitigation. In our study of China's 100 most congested cities, big-data empowered adaptive traffic signals reduced peak-hour trip times by 11% and off-peak by 8%, yielding an estimated annual CO_2 reduction of 31.73 million tonnes. Despite an annual implementation cost of US$1.48 billion, societal benefits—including CO_2 reduction, time savings, and fuel efficiency—amount to US$31.82 billion. Widespread adoption will require enhanced data collec-



The Real Deal: A Review of Challenges and Opportunities in Moving Reinforcement Learning-Based Traffic Signal Control Systems Towards Reality

Rex Chen, Fei Fang and Norman Sadeh

Institute of Software Research, School of Computer Science, Carnegie Mellon University

Abstract

Traffic signal control (TSC) is a high-stakes domain that is growing in importance as traffic volume grows globally. An increasing number of works are applying reinforcement learning (RL) to TSC; RL can draw on an abundance of traffic data to improve signalling efficiency. However, RL-based signal controllers have never been deployed. In this work, we provide the first review of challenges that must be addressed before RL can be deployed for TSC. We focus on four challenges involving (1) uncertainty in detection, (2) reliability of communications, (3) compliance and interpretability, and (4) heterogeneous road users. We show that the literature on RL-based TSC has made some progress towards addressing each challenge. However, more work should take a systems thinking approach that considers the impacts of other pipeline components on RL.

[1] K. Wu et al., "Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission," Nat Commun, 2025, doi: 10.1038/s41467-025-56701-4.
[2] R. Chen, F. Fang, and N. Sadeh, "The real deal: A review of challenges and opportunities in moving reinforcement learning-based traffic signal control systems towards reality," arXiv preprint arXiv:2206.11996, 2022.

Energy Policy 38 (2010) 762–769

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Policy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enpol

Eco-driving: An overlooked climate change initiative

Jack N. Barkenbus

Climate Change Research Network, Vanderbilt University, 131 21st Avenue South, Nashville, TN 37203, United States

ARTICLE INFO

Article history:
Received 11 June 2009
Accepted 2 October 2009
Available online 28 October 2009

Keywords:
Climate change
Transportation
Mitigation

ABSTRACT

The actions individuals can take to mitigate climate change are, in the aggregate, significant. Mobilizing individuals to respond personally to climate change, therefore, must be a complementary approach to a nation's climate change strategy. One action item overlooked in the United States has been changing driver behavior or style such that eco-driving becomes the norm rather than the exception. Evidence to date indicates that eco-driving can reduce fuel consumption by 10%, on average and over time, thereby reducing CO_2 emissions from driving by an equivalent percentage. A sophisticated, multi-dimensional campaign, going well beyond what has been attempted thus far, will be required to achieve such savings on a large scale, however, involving education (especially involving the use of feedback devices), regulation, fiscal incentives, and social norm reinforcement.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

[1] J. N. Barkenbus, "Eco-driving: An overlooked climate change initiative," Energy Policy, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.021.

Condução econômica pelo planeta (com IA)

Mitigating Metropolitan Carbon Emissions with Dynamic Eco-driving at Scale

Transportation Research Part C: Emerging Technologies 2025


Vindula Jayawardana


Baptiste Freydt


Ao Qu


Cameron Hickert


Edgar Sanchez


Catherine Tang


Mark Taylor

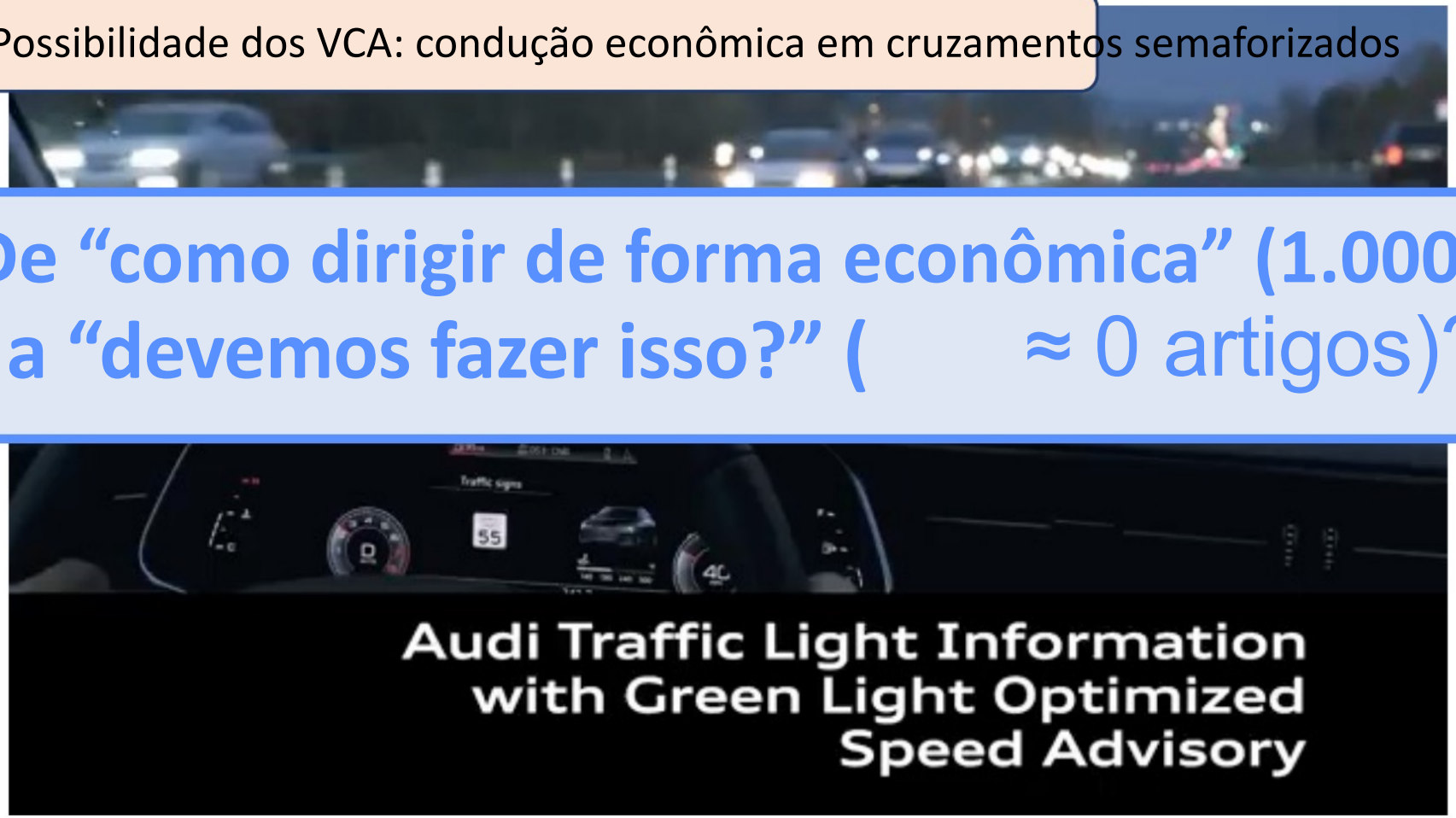

Blaine Leonard


Cathy Wu

Implicações para políticas dos veículos conectados e automatizados?

Possibilidade dos VCA: condução econômica em cruzamentos semaforizados

Vídeo: Audi



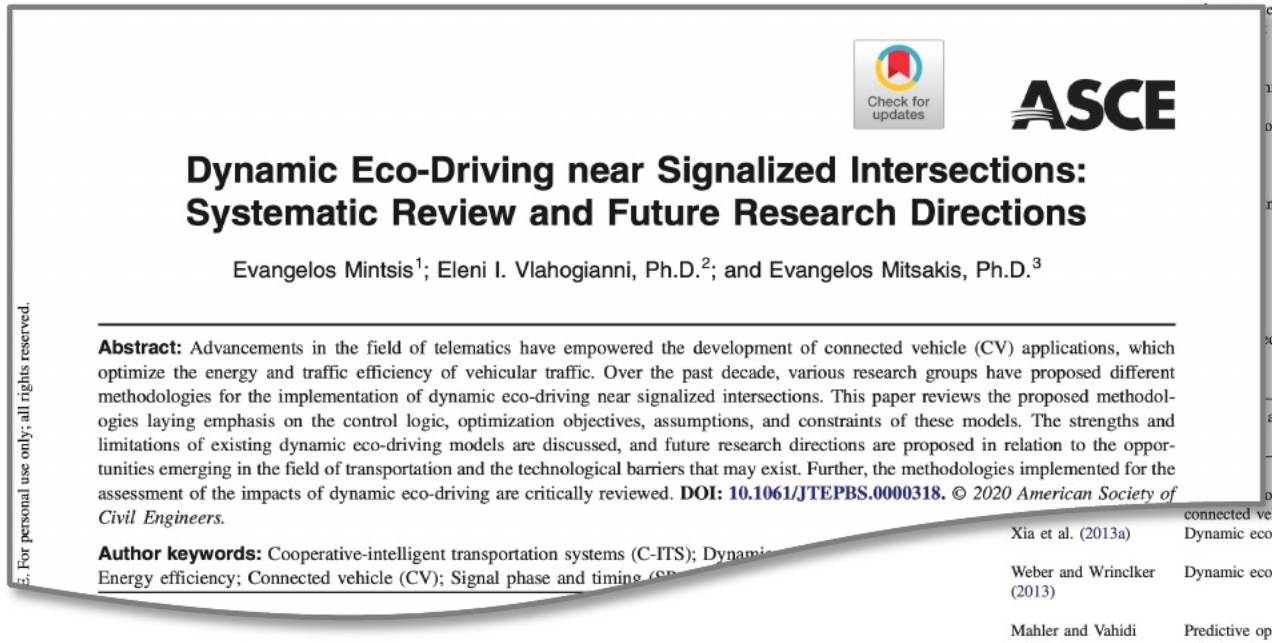
De “como dirigir de forma econômica” (1.000+ artigos)
a “devemos fazer isso?” (≈ 0 artigos)?

Pergunta de pesquisa: o controle inteligente de veículos para reduzir CO_2 nos cruzamentos, em escala urbana, faria diferença nas metas de mitigação climática?

* Estimated using Google Scholar

[1] Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part

Economia da condução econômica



Check for updates

ASCE

Dynamic Eco-Driving near Signalized Intersections: Systematic Review and Future Research Directions

Evangelos Mintsis[1]; Eleni I. Vlahogianni, Ph.D.[2]; and Evangelos Mitsakis, Ph.D.[3]

Abstract: Advancements in the field of telematics have empowered the development of connected vehicle (CV) applications, which optimize the energy and traffic efficiency of vehicular traffic. Over the past decade, various research groups have proposed different methodologies for the implementation of dynamic eco-driving near signalized intersections. This paper reviews the proposed methodologies laying emphasis on the control logic, optimization objectives, assumptions, and constraints of these models. The strengths and limitations of existing dynamic eco-driving models are discussed, and future research directions are proposed in relation to the opportunities emerging in the field of transportation and the technological barriers that may exist. Further, the methodologies implemented for the assessment of the impacts of dynamic eco-driving are critically reviewed. **DOI: 10.1061/JTEPBS.0000318.** © *2020 American Society of Civil Engineers.*

Author keywords: Cooperative-intelligent transportation systems (C-ITS); Dynami
Energy efficiency; Connected vehicle (CV); Signal phase and timing (SP

. For personal use only; all rights reserved.

Table 3. Evaluation methodologies of existing dynamic eco-driving models and corresponding impacts

Author(s)	Speed advisory model type	Evaluation methodology	Test network configuration	Vehicle type	Energy savings (%)	Emissions savings (%)	Travel time savings (%)	Real-time ready
Ha et al. (2018)	CAD	Field experiment (real-world traffic)	El Camino Real test site	Single-vehicle (2.5L 4-cylinder)	2 (all trips)	7 (CO) 18 (HC) 13 (NO_x)	—	—
Jiang et al. (2017)	Dynamic eco-driving under partially connected ed vehicles	Simulation (Excel VBA, MATLAB, and VISSIM)	Hypothetical intersection	—	2.02	1.97	10.80	Yes
		Field experiment (real-world traffic)	DRIVE C2X test site (Gothenburg, Sweden)	10 retrofitted prototype vehicles	—	—	—	Yes
	mendation	Field experiment	Virginia Smart Road Test facility	2014 Cadillac SRX	19	—	10	Yes
	o-driving	Field experiment (real-world traffic)	Signalized arterial corridor (Thessaloniki, Greece)	340 taxis	—	9 (compliant versus noncompliant)	—	Yes
		MATLAB	—	30 top sold vehicles in the US	—	—	—	Yes
	nce model	Simulation (EstiNet)	3.7 km urban arterial road in Beijing	—	—	2.13	8.15	—
		Numerical evaluation	Hypothetical intersection	—	3–12	5–20 (CO) 3–14 (HC) 6–21 (NO_x)	—	Yes
		Controlled experiment	Palmyrita Avenue, Riverside, California	2008 Nissan Altima	5–27	—	—	Yes
	d dynamic	Simulation (INTEGRATION)	Cross intersection (Blacksburg, Virginia)	—	13	13 (CO, HC, CO_2, and NO_x)	38	—
	—	Simulation MATLAB (GPOPS)	—	—	—	—	—	—
	assistant	Field experiment (real-world traffic)	Urban network	5 different vehicles (series-production)	29 4.9	—	–9 —	Yes Yes
	—	MATLAB (sensitivity analysis)	—	—	—	50 (NO_x)	14	—
	o-driving for connected vehicles	Simulation (PARAMICS)	Hypothetical intersection	Single and multivehicle	31	—	—	Yes
Xia et al. (2013a)	Dynamic eco-driving	Simulation (PARAMICS)	11-signalized arterial corridor	Single and multivehicle	12.5	13 (CO_2)	0.7	Yes
Weber and Wrinclker (2013)	Dynamic eco-driving	Field experiment	Richmond Field Station test track El Camino Real test site	BMW mid-sized sedan	14	—	—	Yes
Mahler and Vahidi (2012)	Predictive optimal velocity planning algorithm	MATLAB Field experiment	— (Greenville, South Carolina)	— —	— —	— —	— —	Yes
Rakha et al. (2012)	—	MATLAB	—	—	30	—	—	—
Schuricht et al. (2011)	Predictive driver assistance	Simulation (IDM)	—	—	8.7	—	—	—
Ru[illegible] et al. (2011)	Predictive driving strategy	MATLAB Field experiment	— BMW test track (Aschheim, Munich, Germany)	—	10	—	—	Yes
Barth et al. (2011)	Dynamic eco-driving	Simulation (PARAMICS)	Hypothetical 10-signalized arterial	Mid-sized Sedan	12	12 (CO_2)	2	Yes
Asadi and Vahidi (2011)	PCC	SIMULINK (MATLAB)	Urban road Suburban road	—	47	56 (CO_2)	—	—
Tielert et al. (2010)	Speed adaptation model	Simulation (VISSIM)	Single-lane road segment Karlsruhe's inner city, Germany	EURO4 Otto and diesel engines	22 8	80 (CO); 35 (NO_x); 18 (PM) —	—	—
Vreeswijk et al. (2010)	—	Simulation (VISSIM)	Four-leg intersection (Rotterdam, Netherlands)	—	—	5 (CO_2 and NO_x)	—	Yes
Saust et al. (2010)	—	Field experiment	Ring road of Braunschweig, Germany (two-lane arterial road)	—	35	—	—	Yes
Mandava et al. (2009)	Arterial velocity planning algorithm	Stochastic simulation	Hypothetical 10-signalized arterial	LDV24 and LDV17	12–14	12–14 (CO_2)	—	—
Li et al. (2009)	ADAS	Parametric analysis Simulation	—	—	14 8	—	—	—

§ Economia estimada de energia / emissões entre 2 e 56% (25 estudos)

Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part A, 2020

Cálculo de impacto (estimativa rápida*)

Impacto na condução

51.9%
x [6, 28]%
[3.1, 14.5]%

Km rodados (VMT) perto de cruzamentos semaforizados [1]

Emissões evitáveis com condução econômica (± 1 desvio-padrão segundo [2])

das emissões de CO_2 da condução são simplesmente "desperdiçadas" nos cruzamentos

Impacto nacional

x 29%
x 81%
[0.7, 3.41]%

GEE do setor de transportes [3]

↳ GEE dos veículos rodoviários [4]

das emissões de CO_2 dos EUA são simplesmente "desperdiçadas" nos cruzamentos

Gold standard:
–1% global GHG
Breakthrough Energy Ventures
Led by Bill Gates

[1] U.S. Federal Highway Administration (FHWA). Highway Statistics 2021. 2023.
[2] Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part A, 2020.
[3] U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks . 2023.
[4] U.S. Environmental Protection Agency, Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions . 2023.

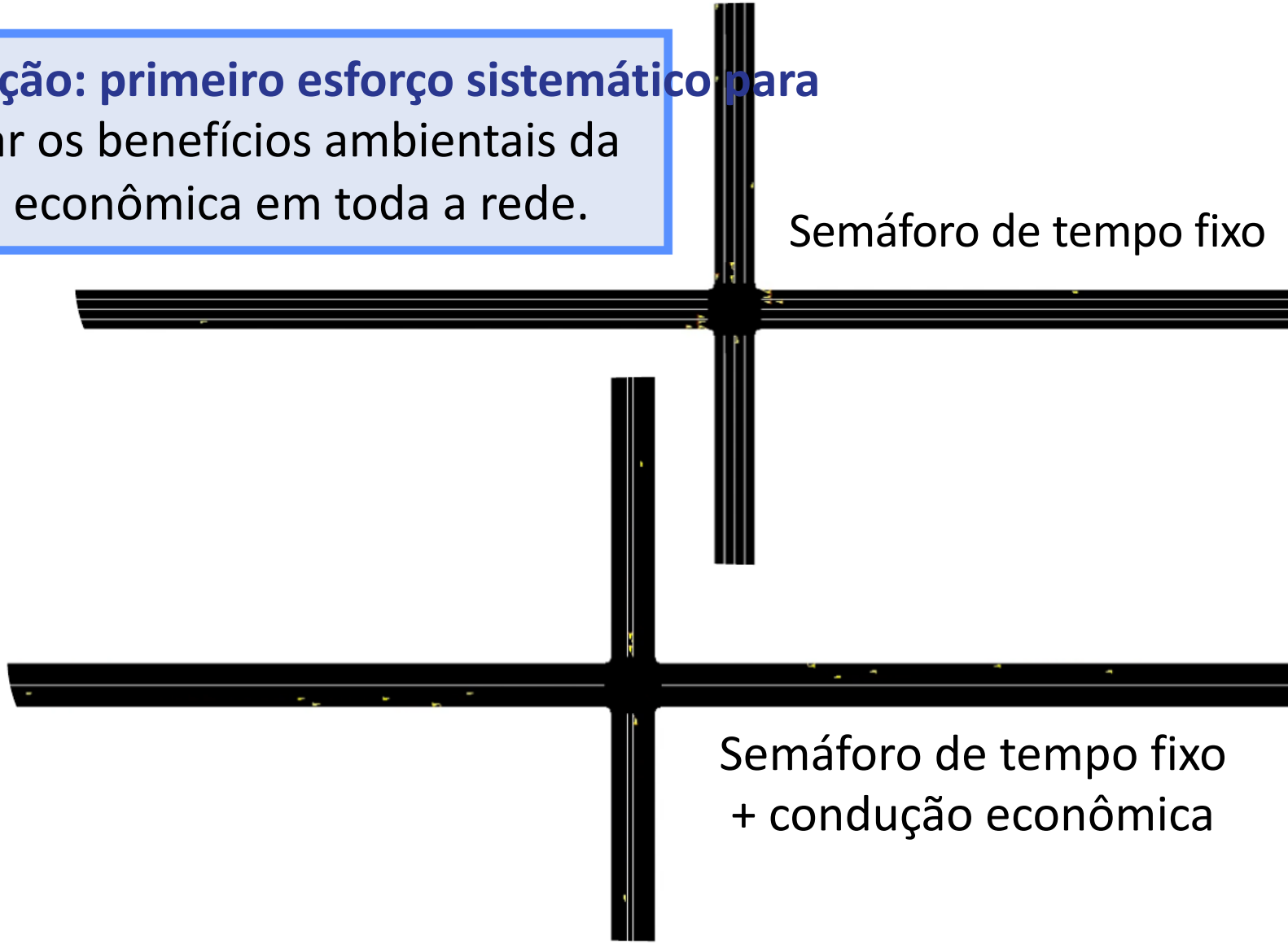
* Cálculos baseados em estatísticas dos EUA.

Condução econômica em escala regional



São Francisco

Contribuição: primeiro esforço sistemático para quantificar os benefícios ambientais da condução econômica em toda a rede.



Objetivo: redução esperada das emissões da frota sem impacto relevante no tempo de viagem nem na vazão do cruzamento

Sujeito a: requisitos de segurança, limites dos atuadores do veículo e regras de trânsito

Wu

Todos os cenários são modelados em simuladores de nível industrial

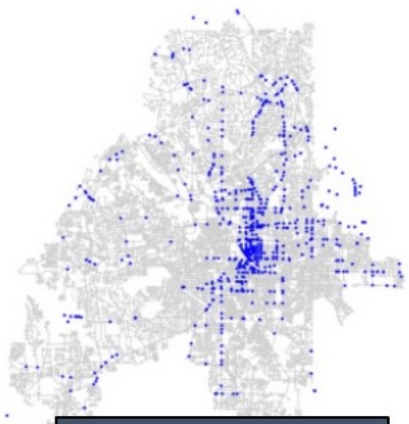
6.011 cruzamentos baseados em dados, modelados no simulador microscópico SUMO de nível industrial



São Francisco

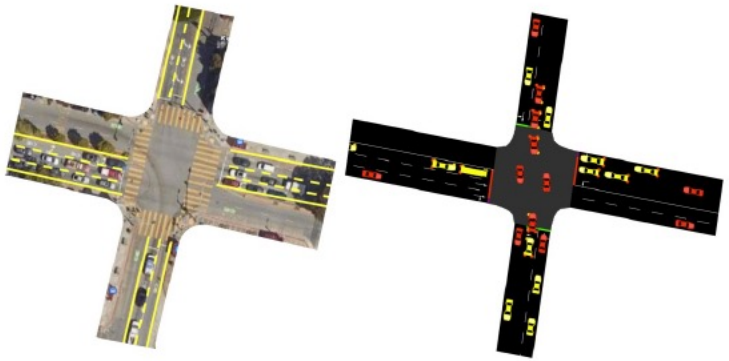


Los Angeles

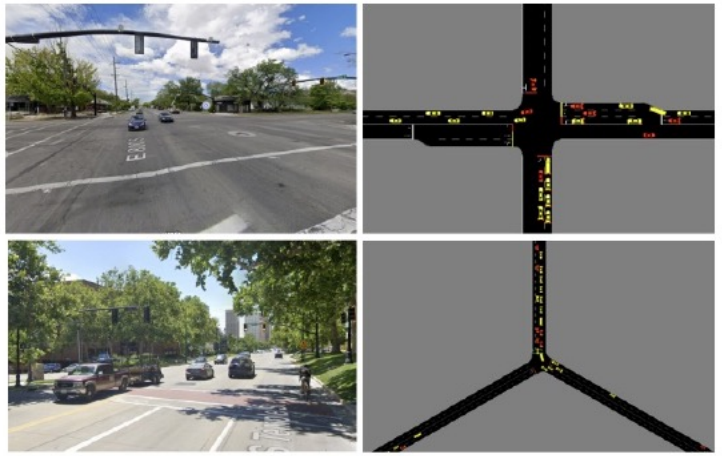


Atlanta

Mais de 1 milhão de cenários de tráfego







Cruzamento real vs. simulação

Qu, Valiveru, Tang, Jayawardana, Freydt, Wu, What is a typical signalized intersection in a city? A pipeline for intersection data imputation from OpenStreetMap , Transportation Research Board, 2023.
Jayawardana et al. IntersectionZoo: Eco-driving for benchmarking contextual reinforcement learning . International Conference on Learning Representations (ICLR), 2025.

Todos os cenários são modelados com dados e ferramentas abertos

OpenStreetMap

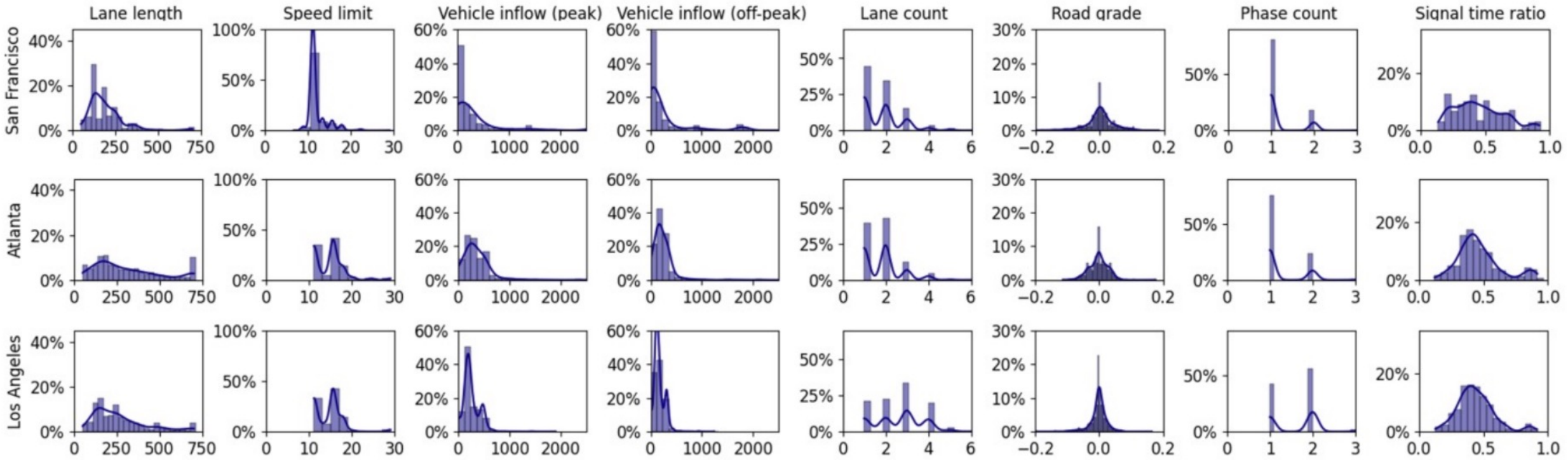
SFMTA

GDOT Georgia Department of Transportation

Serviço Geológico dos EUA (USGS)

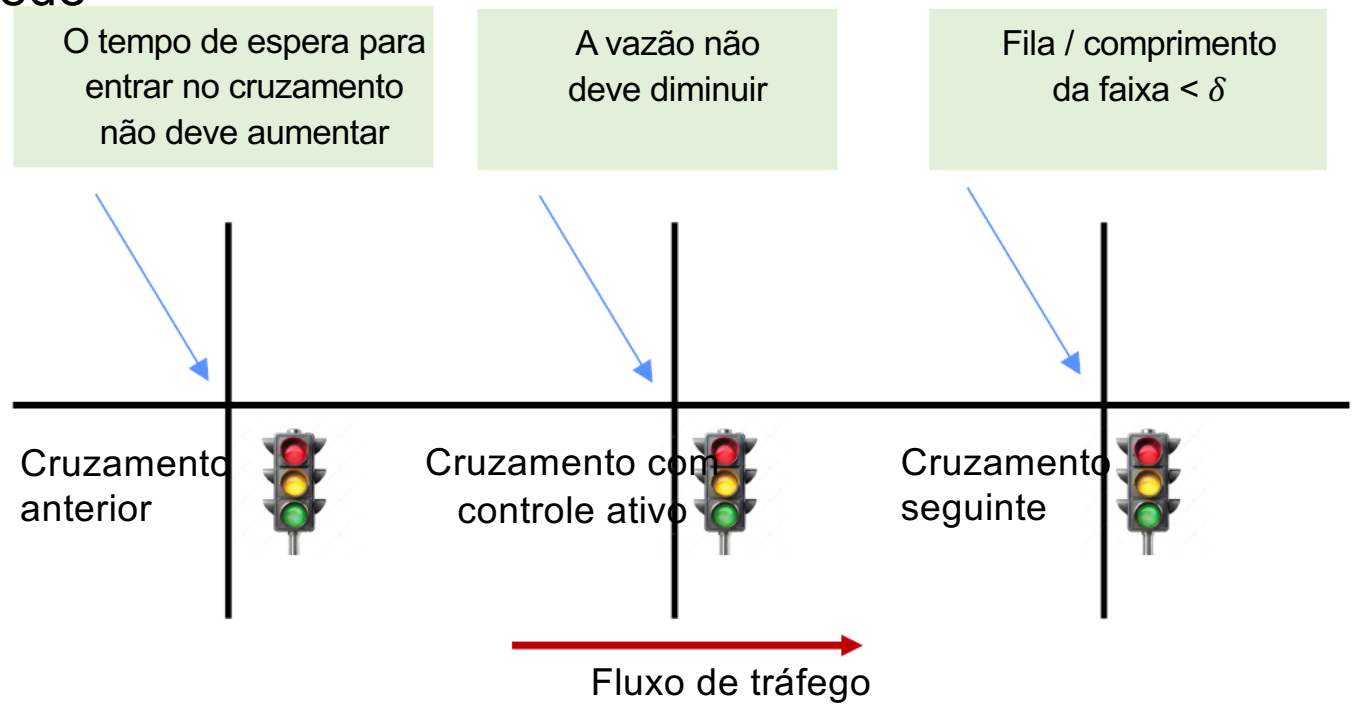
CA.GOV CALIFORNIA OPEN DATA PORTAL

MOVES Motor Vehicle Emission Simulator



Decomposição da rede

Requisitos para a decomposição da rede



Se a condução econômica violar algum desses requisitos, os benefícios são zerados

Assim, os benefícios são um limite inferior dos benefícios possíveis

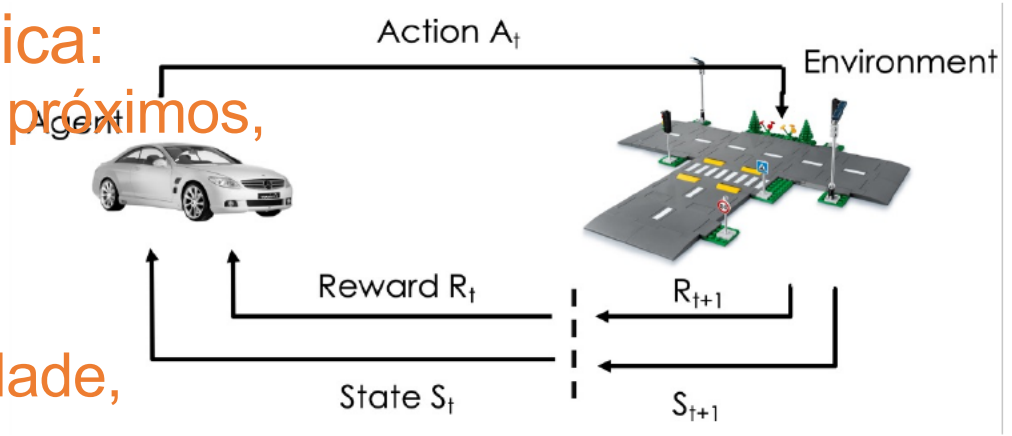
Modelando a condução econômica como um MDP

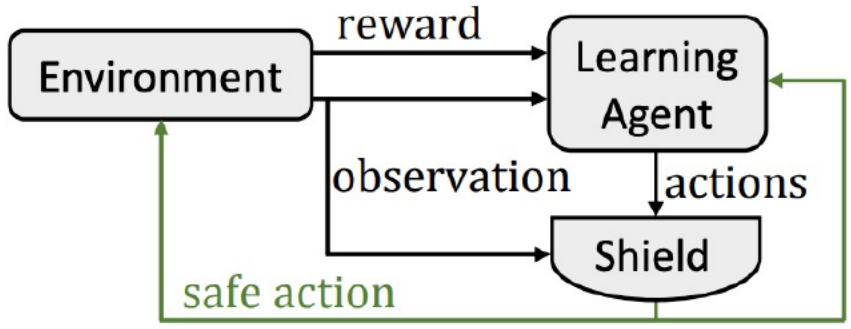
§ Protocolo de treinamento: RL multiagente com parâmetros compartilhados, com treinamento centralizado e execução descentralizada.

- Processo de decisão de Markov descentralizado parcialmente observável (Dec-POMDP)

§ Para cada veículo em condução econômica:

- Observação: sensores do veículo, veículos próximos, informações dos semáforos e contexto do cruzamento
- Ação: aceleração longitudinal do veículo
- Recompensa: combinação linear de velocidade, emissões e marcha lenta
- Função de transição:
  - § Comportamento dos demais usuários, semáforos
  - § Restrições rígidas garantidas por post-shielding
- Horizonte: 12,5 min (1.500 passos de 0,5 s) com fator de desconto $\gamma = 0.99$
  - § Um ciclo semafórico típico dura 1-3 min





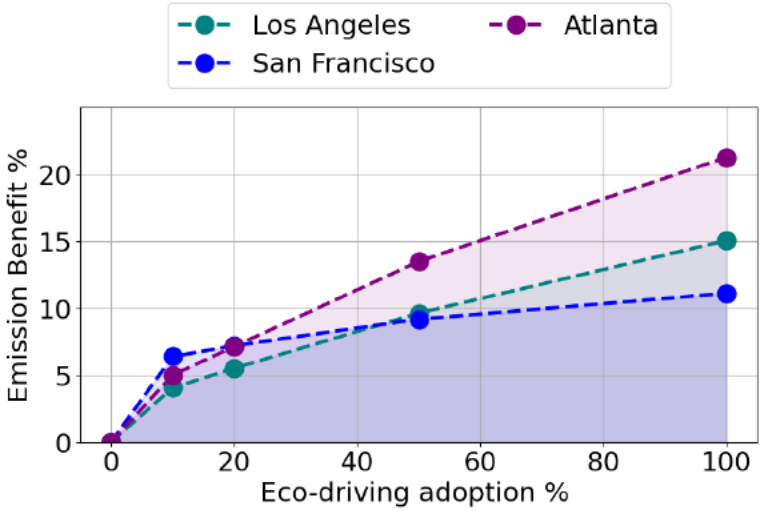
Wu

Resultados: eficácia geral

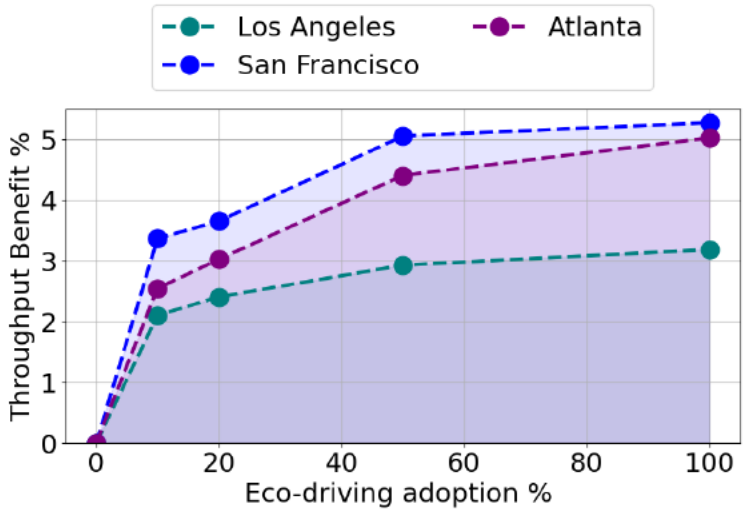
Gold standard:
–1% global GHG
Breakthrough Energy
Led by Bill Gates

A condução econômica pode cortar 11-21% das emissões de CO_2 nos cruzamentos de uma cidade.
Isso equivale a 1,34%-2,68% das emissões de CO_2 dos EUA.

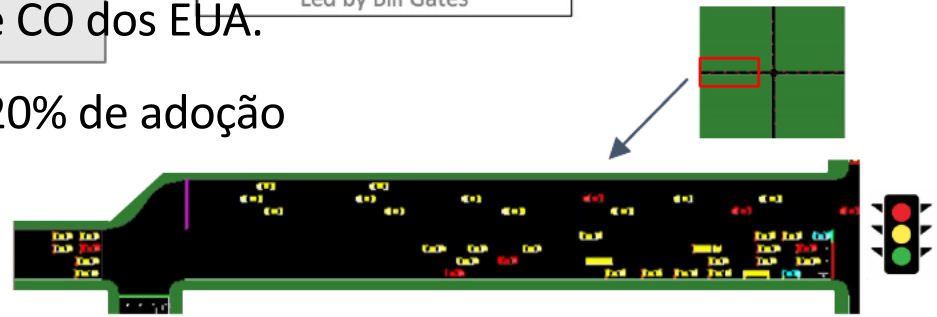
Redução de emissões



Aumento da vazão

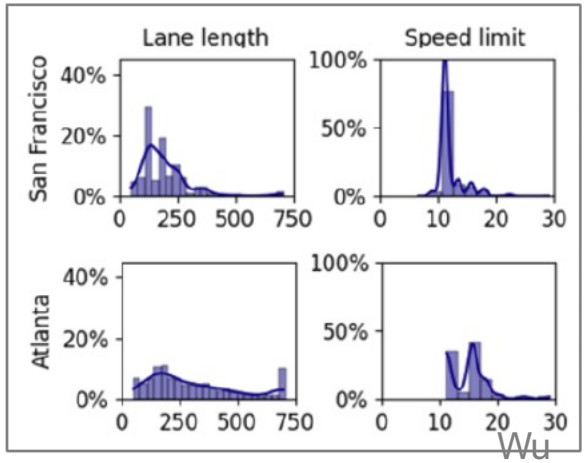


20% de adoção



100% de adoção





§ Escala não linear: 25%-50% dos benefícios com 10% de adoção

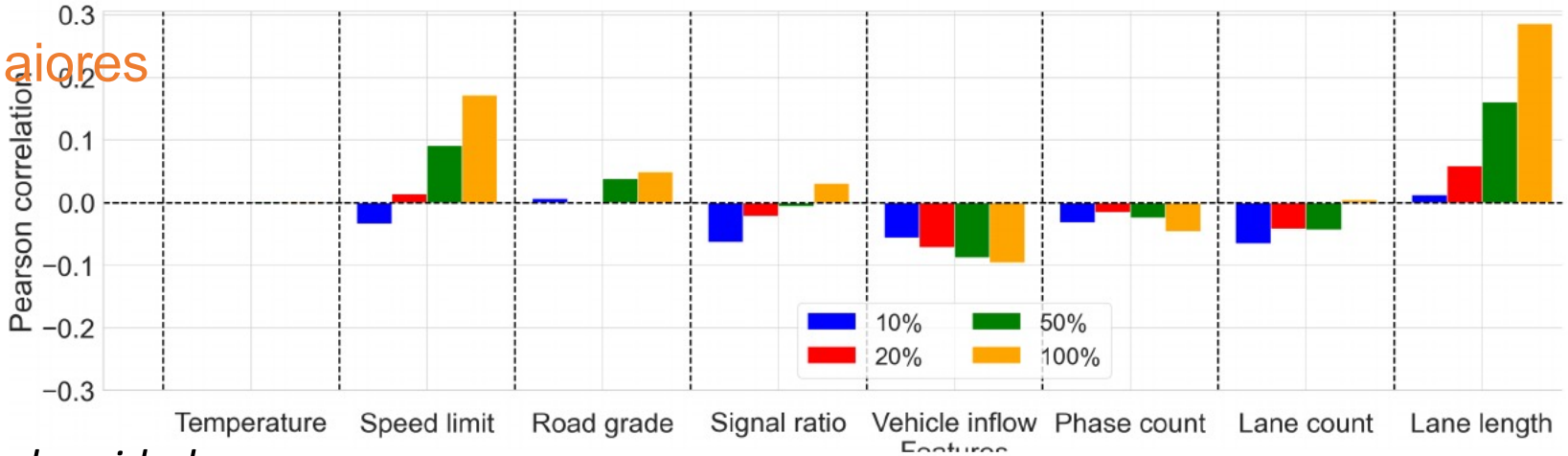
Wu

Por que Atlanta se beneficia mais que São Francisco?

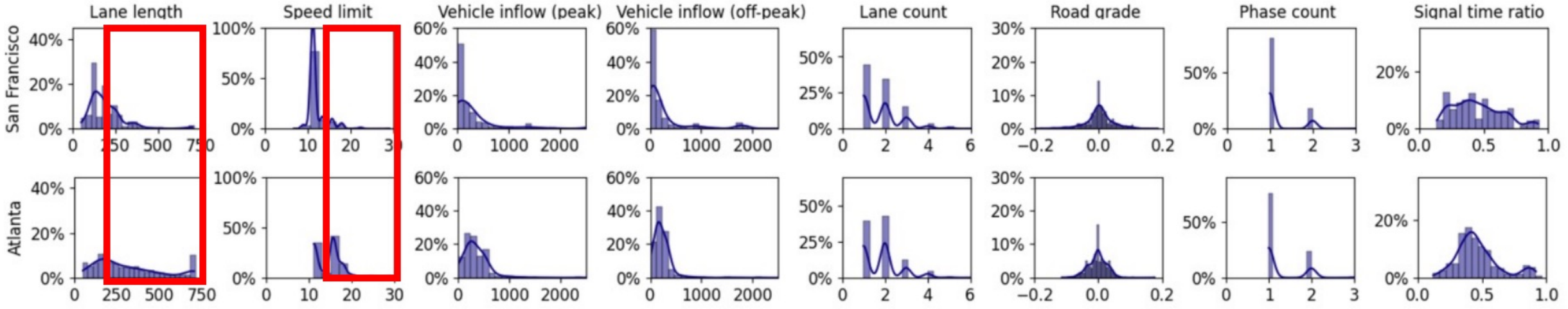
Atlanta vs. São Francisco
§ Faixas mais longas
§ Limites de velocidade maiores

São os dois fatores **mais correlacionados** com os benefícios da **condução econômica**

Correlação de Pearson entre benefícios da condução econômica e fatores



Distribuição das características das cidades



V. Jayawardana, et al., C. Wu , "Mitigating Metropolitan Carbon Emissions with Dynamic Eco-driving at Scale," Transportation Research Part C: Emerging Technologies , 2025.

Cálculo geral do impacto da condução econômica

Site

Impacto na condução

51.9%
x [11, 22]%
[5.7, 11.4]%

Km rodados (VMT) perto de cruzamentos semaforizados [1]

Emissões evitáveis com condução econômica

das emissões de CO_2 da condução são simplesmente "desperdiçadas" nos cruzamentos

Impacto nacional

x 29%
x 81%
[1.3-2.7]%

GEE do setor de transportes [3]

↳ GEE dos veículos rodoviários [4]

das emissões de CO_2 dos EUA são simplesmente "desperdiçadas" nos cruzamentos

Gold standard:
–1% global GHG
Breakthrough Energy Ventures
Led by Bill Gates

[1] U.S. Federal Highway Administration (FHWA). Highway Statistics 2021. 2023.
[2] Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part A, 2020.
[3] U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks . 2023.
[4] U.S. Environmental Protection Agency, Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions . 2023.

* Cálculos baseados em estatísticas dos EUA.

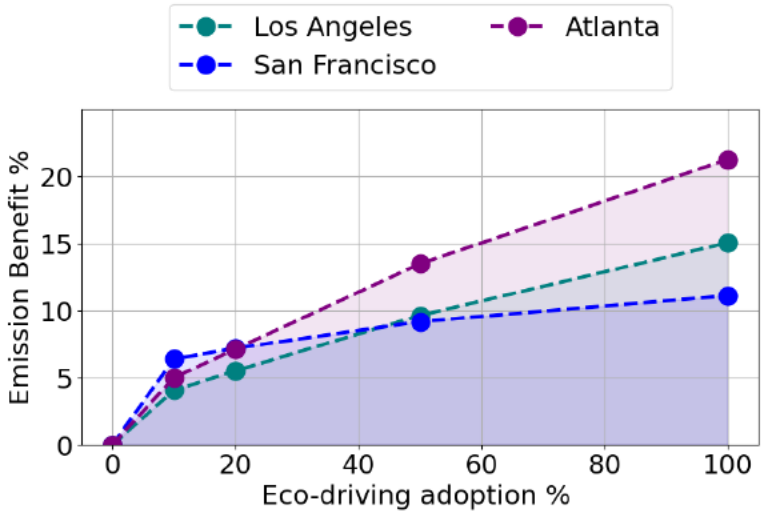
Resultados e implicações para políticas

Impacto nas emissões:
11-22% das
emissões de CO_2
nos cruzamentos

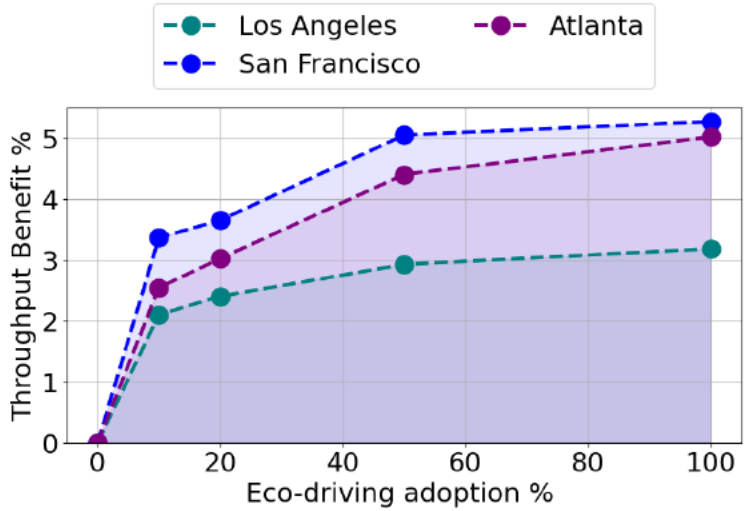
Potencial de curto prazo:
a maior parte do impacto vem de uma
minoria de motoristas e
de cruzamentos

Relevância de longo prazo:
impacto robusto até 2050
por efeitos de frota e
demanda de viagens

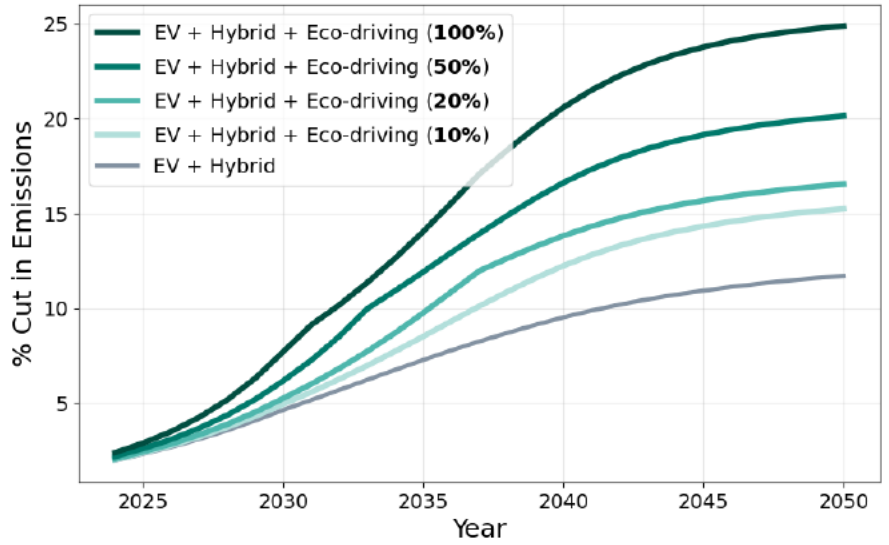
Redução de emissões



Aumento da vazão



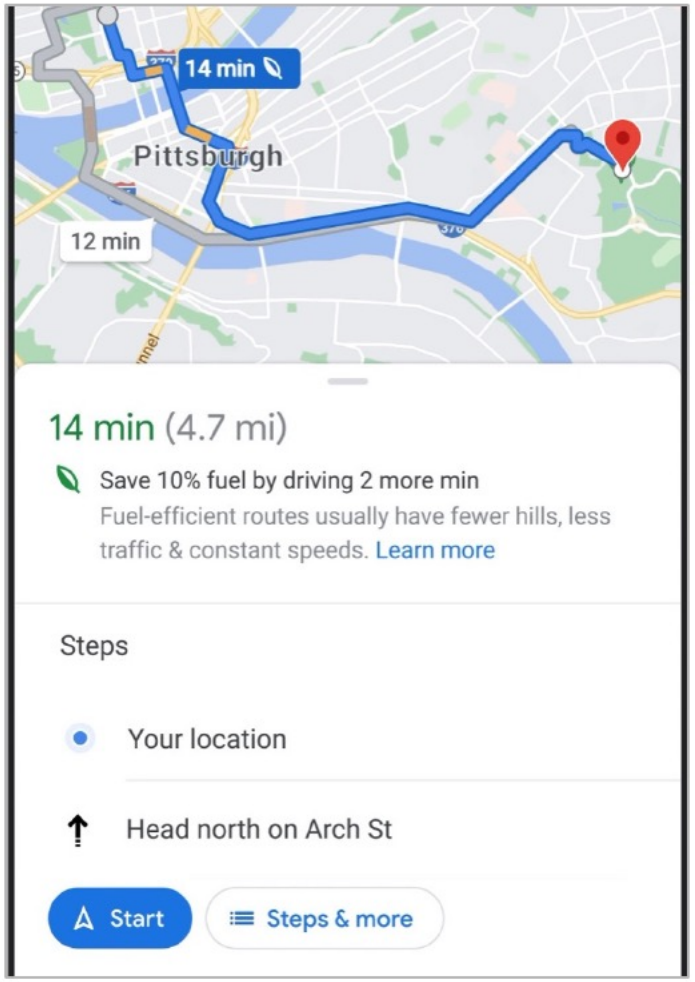
Projeção até 2050 (LA)



Alto impacto, custo relativamente baixo, e complementa as ações climáticas existentes

V. Jayawardana et al. , “Mitigating Metropolitan Carbon Emissions with Dynamic Eco-driving at Scale,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Apr. 2025.

Rotas ecológicas do Google Maps



Step 1

Simulate vehicle fuel efficiency across vehicle powertrains

NREL's **FASTSim** technology simulates fuel efficiency across various vehicle types and powertrains, incorporating second-by-second real-world driving data to calculate real-world fuel consumption over different road types and conditions with high accuracy.

Step 2

Predict fuel consumption across unique routes

NREL's **RouteE** is then trained by the FASTSim-calculated fuel consumption over different driving conditions to predict expected fuel consumption differences among a set of defined routes.

Step 3

Integrate Google's ML Routing Algorithm

Google integrates the insights and modeling from FASTSim and RouteE across all of Google Maps, incorporating Google's predicted traffic speeds with NREL's fuel consumption modeling to predict fuel consumption for all routes in the U.S., enabling a highly accurate model to maximize fuel efficiency.

Step 4

Set parameters to optimize journey time

Finally, we developed a set of parameters and time caps to determine the optimal time vs. fuel usage trade-off within Google Maps to avoid increasing travel time for negligible fuel savings. In this way, the vast majority of our recommended routes continue to be as fast as before.

[1] Google Research, "Google Maps Eco Friendly Routing," 2021.

ORION da UPS: otimização e navegação integradas em rota

- Lançado em 2013
- Escolhe rotas eficientes para os motoristas com informações em tempo real (trânsito, clima, horários de coleta)
- Redução estimada do consumo de combustível de 10 milhões de galões por ano, e da produção de CO_2 de 100 mil toneladas (Informs)
- Uso de IA
  - Prever o desempenho das rotas
  - Recomendar rotas específicas aos motoristas
- A IA é promissora para a eficiência do frete quando melhora *decisões operacionais repetidas: rotas, consolidação, casamento de cargas, redução de km vazios, programação de frota e resposta a interrupções*

IA para enfrentar a cauda longa da otimização dos transportes

Exemplo motivador: problemas de roteamento de veículos (VRP)

Um dos problemas mais estudados em otimização combinatória:

- ≈10.000 trabalhos publicados só em 2025 (Google Scholar), sobretudo heurísticas
- Aplicação direta em sistemas reais que distribuem bens e prestam serviços
- Entrega de última milha, coleta de lixo, serviços de campo, caronas compartilhadas, transporte sob demanda



~10.000

artigos em 2025

US$ 11 tri+

custos logísticos globais, 2023

65 mi+

encomendas entregues / dia nos EUA

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. "The Truck Dispatching Problem." Management Science, 1959.
Estatísticas: Statista/Research & Markets (2024); relatório ShipMatrix de encomendas nos EUA (2024).

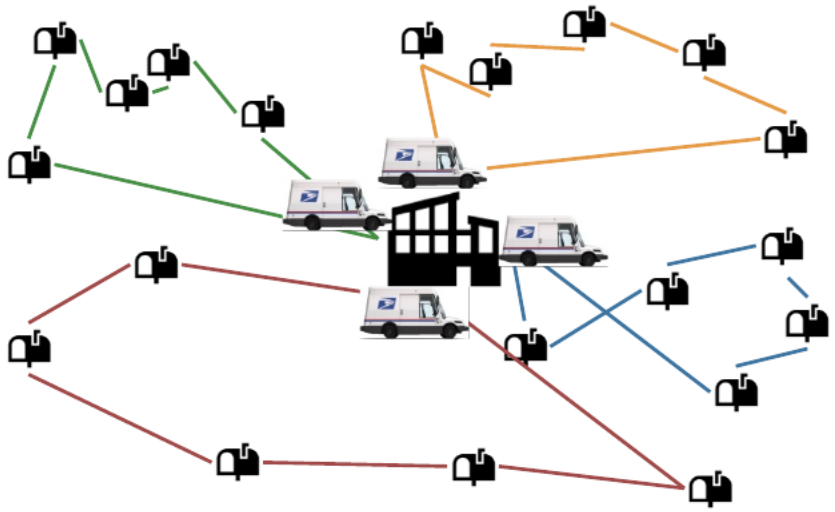
A cauda longa dos problemas de otimização dos transportes

Definição: problemas de roteamento de veículos (VRP)

Dados

- Depósito
- N clientes (local, demanda)
- Frota de veículos (capacidade)
- … Outras restrições …

Encontrar o conjunto de rotas de menor custo que atenda a todos os clientes



Dimensões clássicas

- Capacidade dos veículos
- Janelas de tempo
- Frotas heterogêneas
- Múltiplos depósitos
- Coleta e entrega, carga de retorno
- Entrega fracionada
- Roteamento em arcos (p. ex. coleta de lixo)

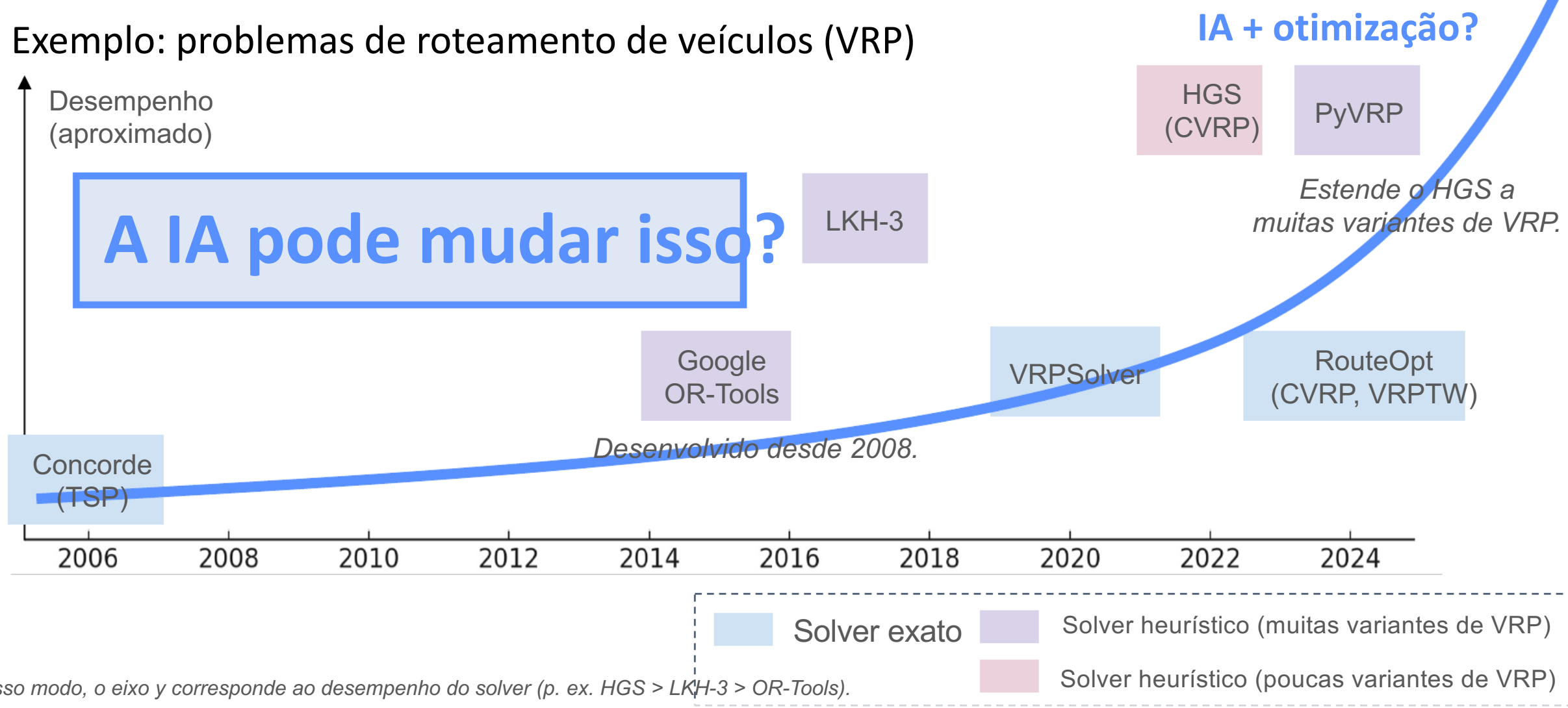
Variantes emergentes

- Roteamento de veículos elétricos (decisões de recarga)
- Roteamento de drones (3D, limites de autonomia)
- Roteamento em armazéns (separadores, triagem)
- Logística multimodal (caminhão + drone, trem + caminhão)

Laporte, G. “Fifty Years of Vehicle Routing.” Transportation Science, 2009.
Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. “The Truck Dispatching Problem.” Management Science, 1959.

Resolver a cauda longa é lento e trabalhoso

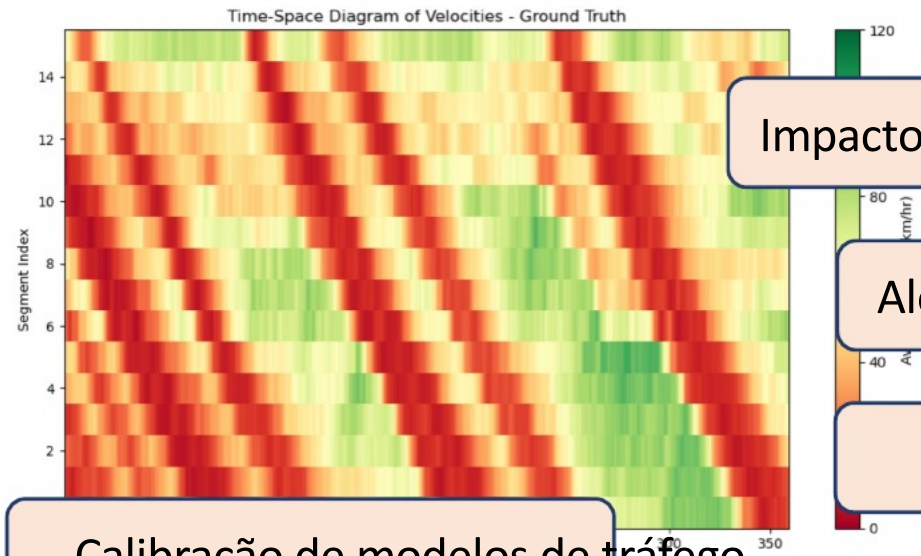
Exemplo: problemas de roteamento de veículos (VRP)



*Grosso modo, o eixo y corresponde ao desempenho do solver (p. ex. HGS > LKH-3 > OR-Tools).

Laporte, G. "Fifty Years of Vehicle Routing." Transportation Science, 2009.
Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. "The Truck Dispatching Problem." Management Science, 1959.

A cauda longa da otimização é transversal

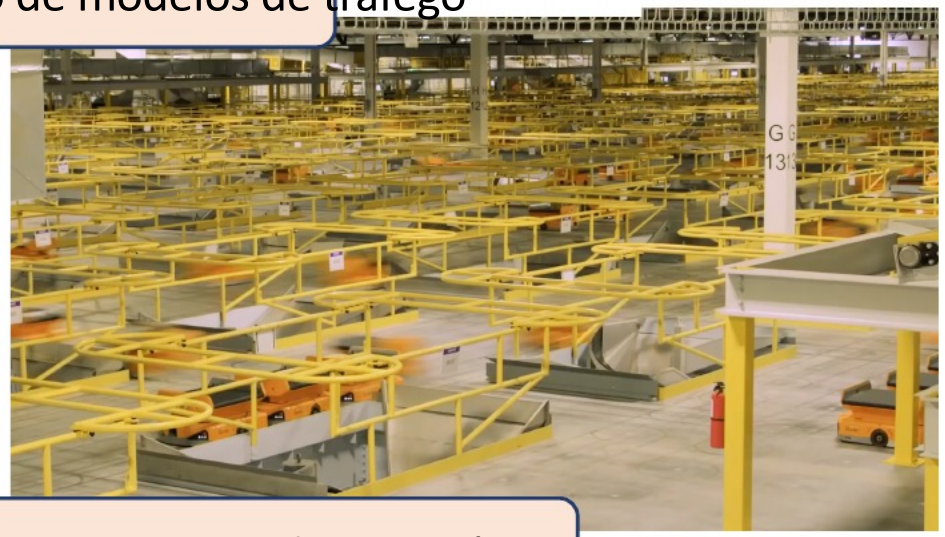


Calibração de modelos de tráfego

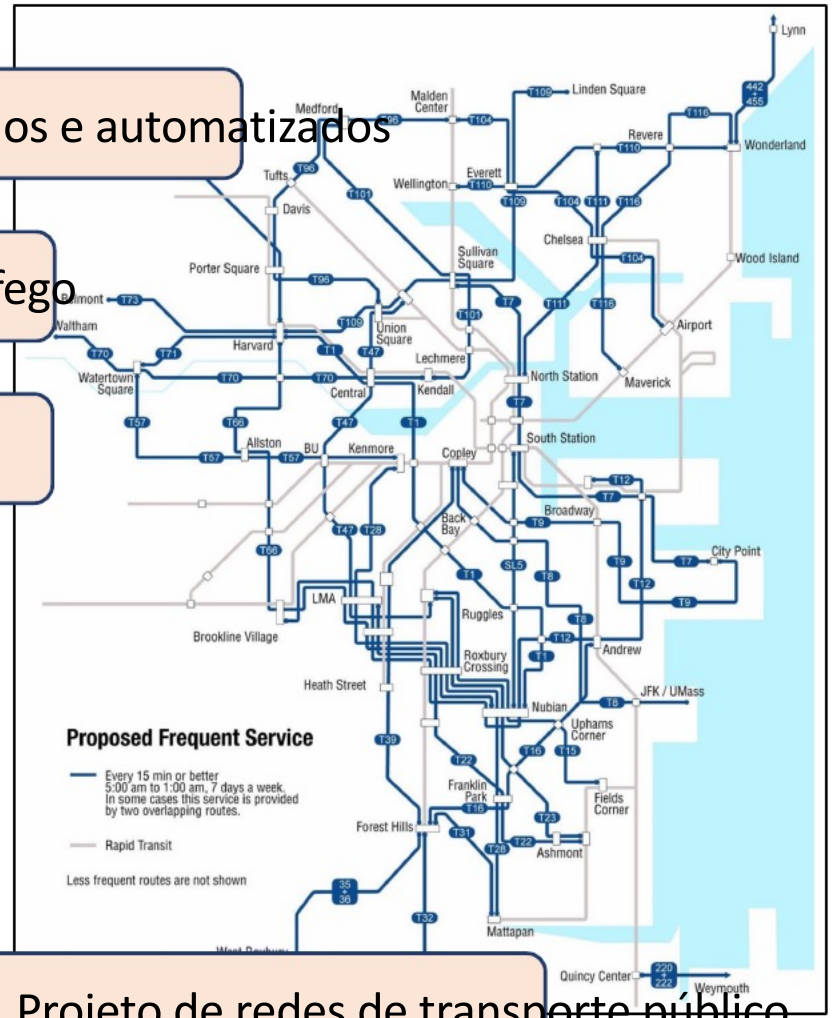
Impactos dos veículos conectados e automatizados

Alocação dinâmica de tráfego

Otimização de redes



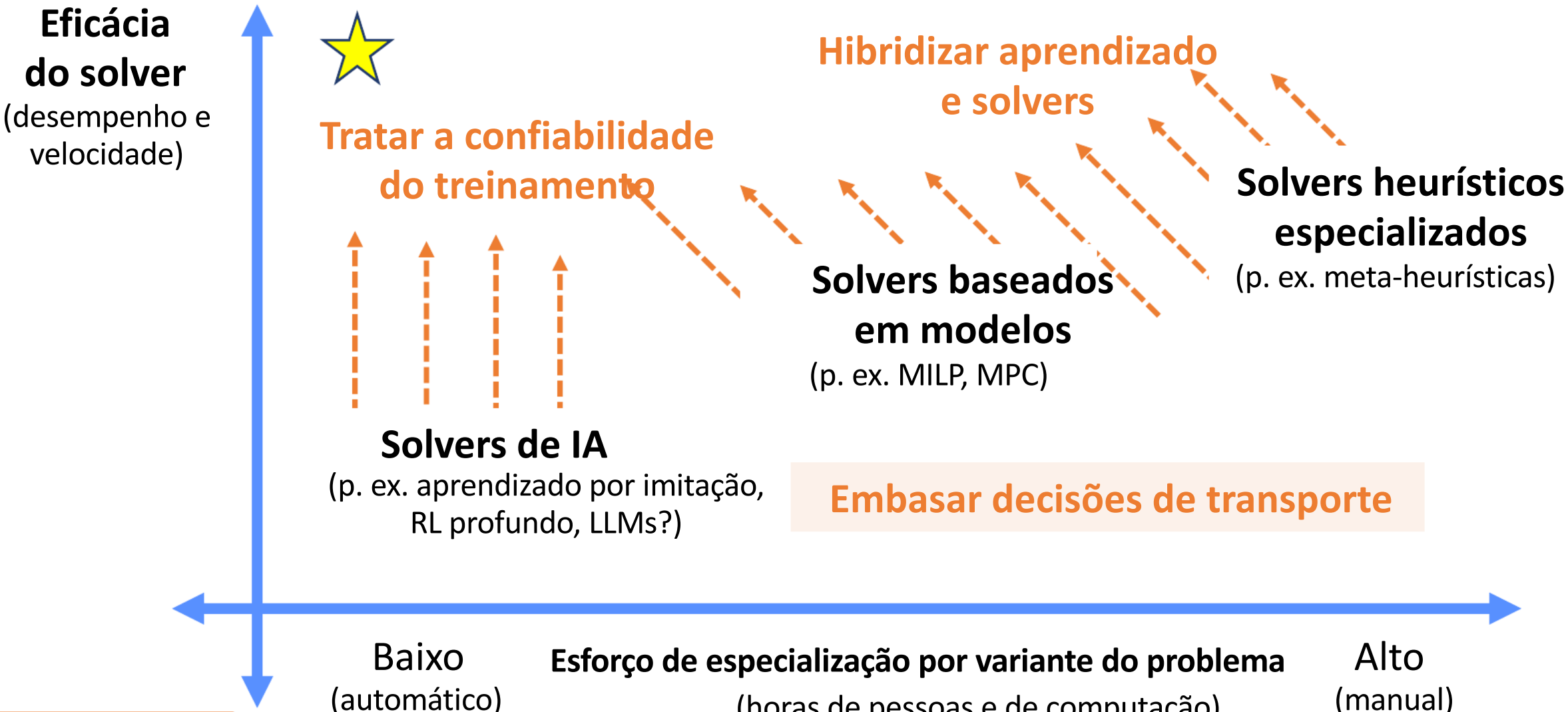
Operações de armazém



Projeto de redes de transporte público

Wu

Panorama dos solvers de otimização

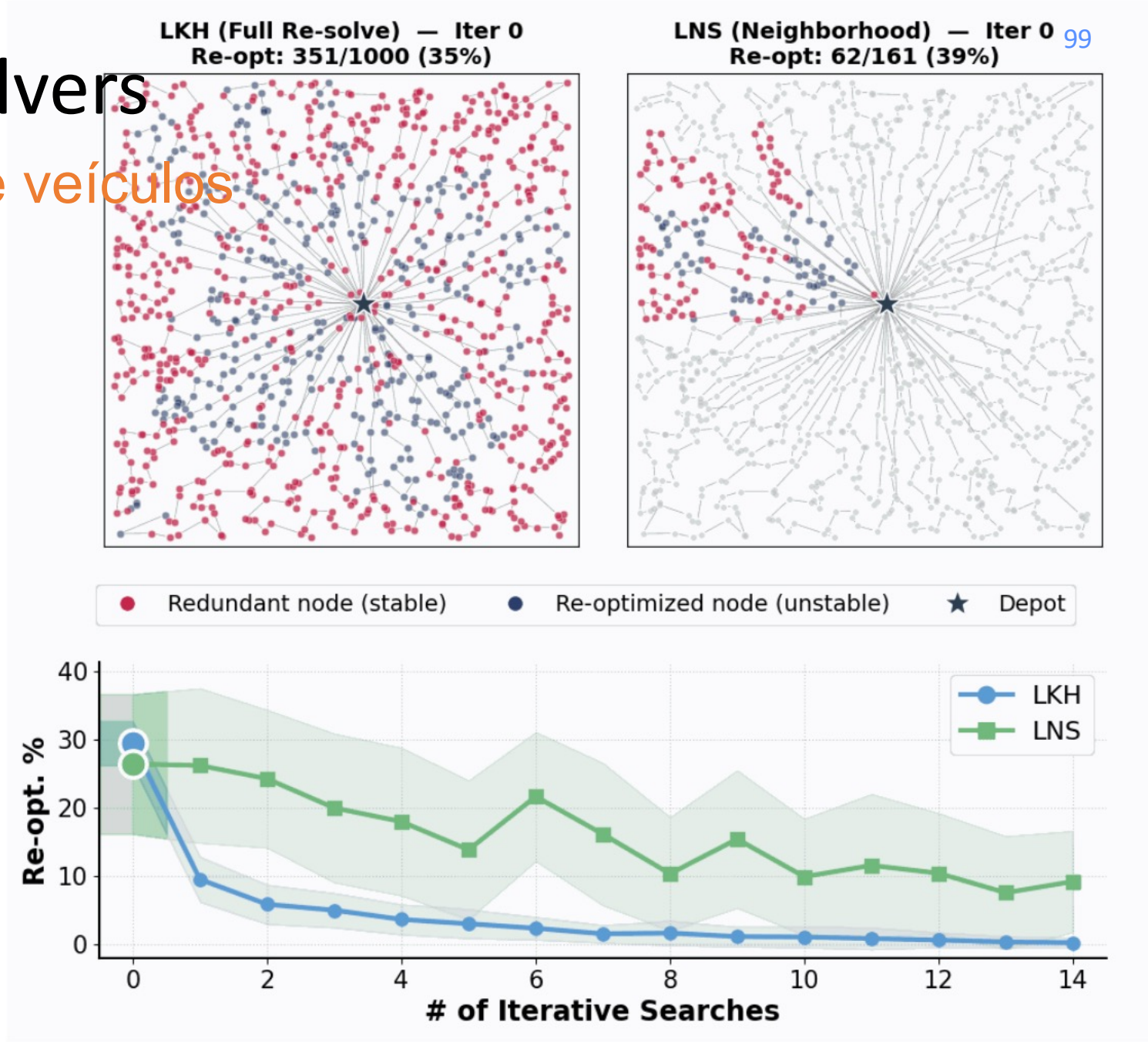


Meu laboratório

Redundância dos solvers

§ Exemplo: roteamento de veículos

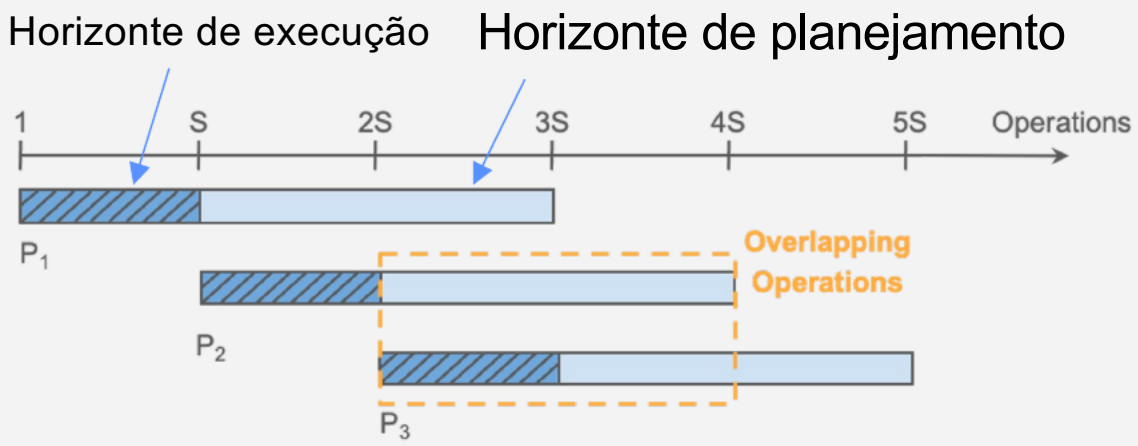
(solvers: LKH, LNS + LKH)



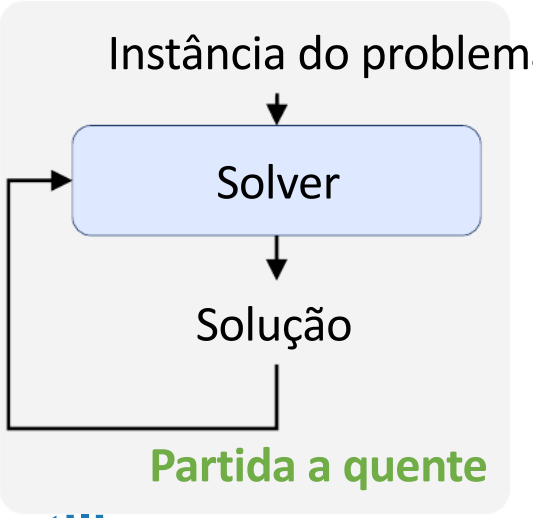
W. Ouyang, S. Li, Y. Ma, and C. Wu, "Learning to Segment for Vehicle Routing Problems," International Conference on Learning Representations (ICLR), 2026. Oral

Aprender a reutilizar: evitar cálculos redundantes

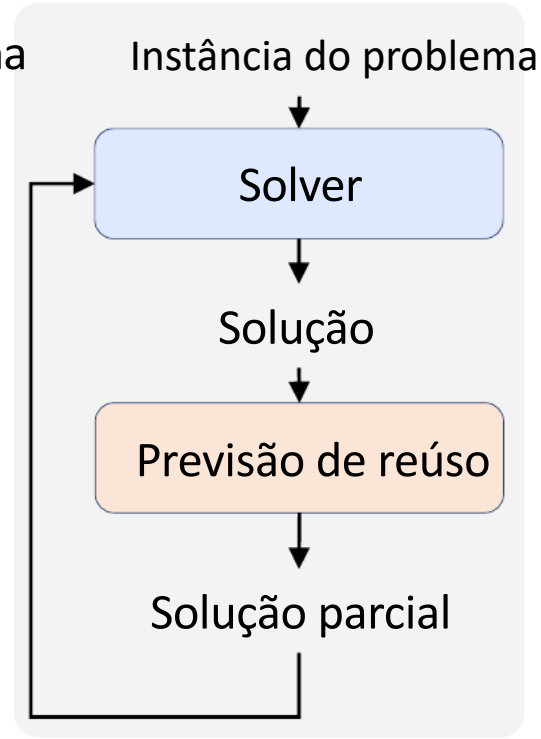
Contexto: otimização com horizonte rolante (RHO)



RHO com partida a quente



L-RHO (nosso)



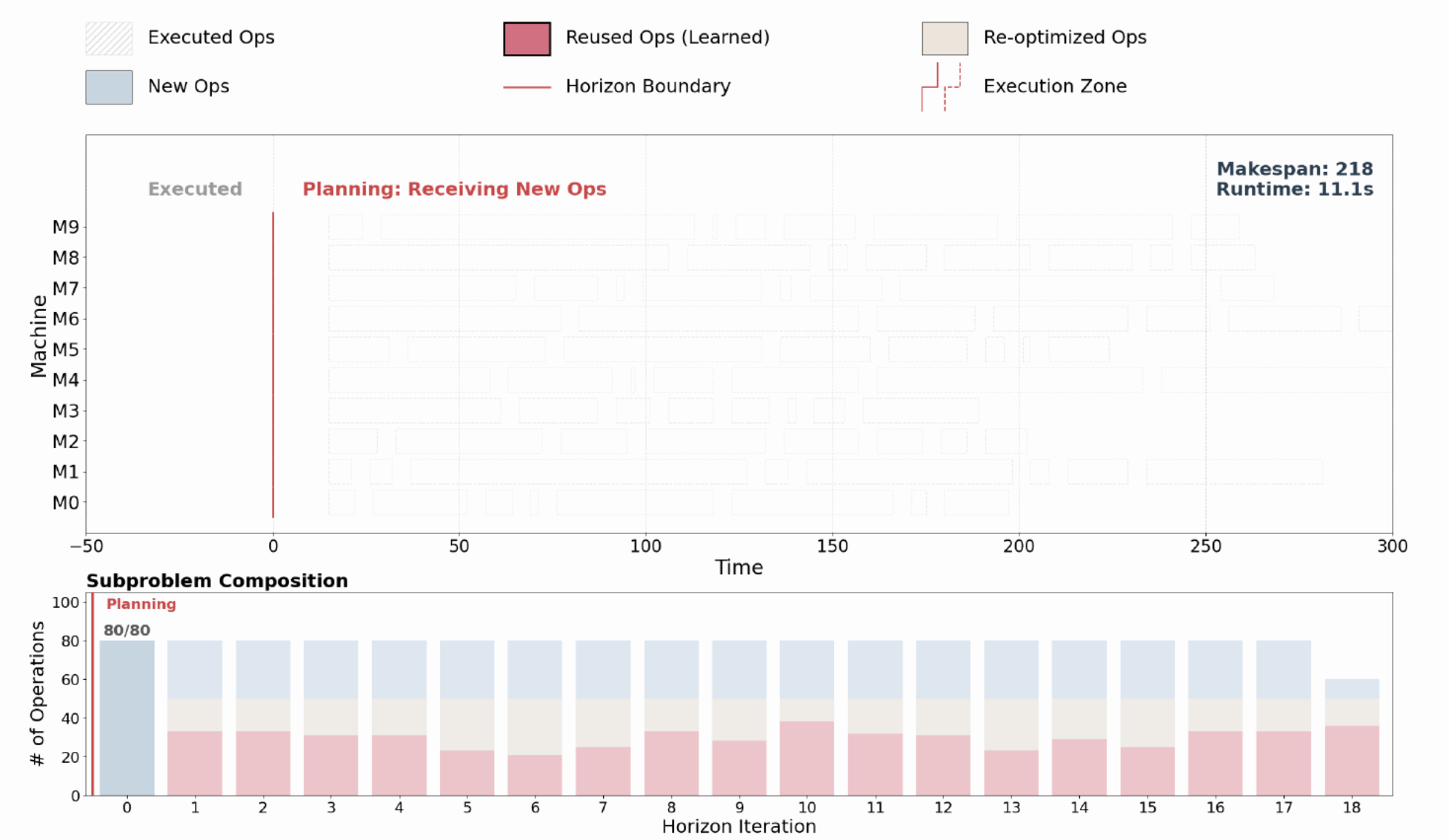
L-RHO: até 50% mais rápido ao aprender a reutilizar soluções em subproblemas RHO consecutivos [1]

§ Método: treinar uma rede neural profunda para prever se uma variável da solução mudará de um subproblema para o seguinte

§ Rótulos de treinamento: oráculo com antecipação

S. Li, W. Ouyang, Y. Ma, and C. Wu , "Learning-Guided Rolling Horizon Optimization for Long-Horizon Flexible Job Shop Scheduling," in ICLR, 2025.

L-RHO para programação flexível de oficinas (job shop)

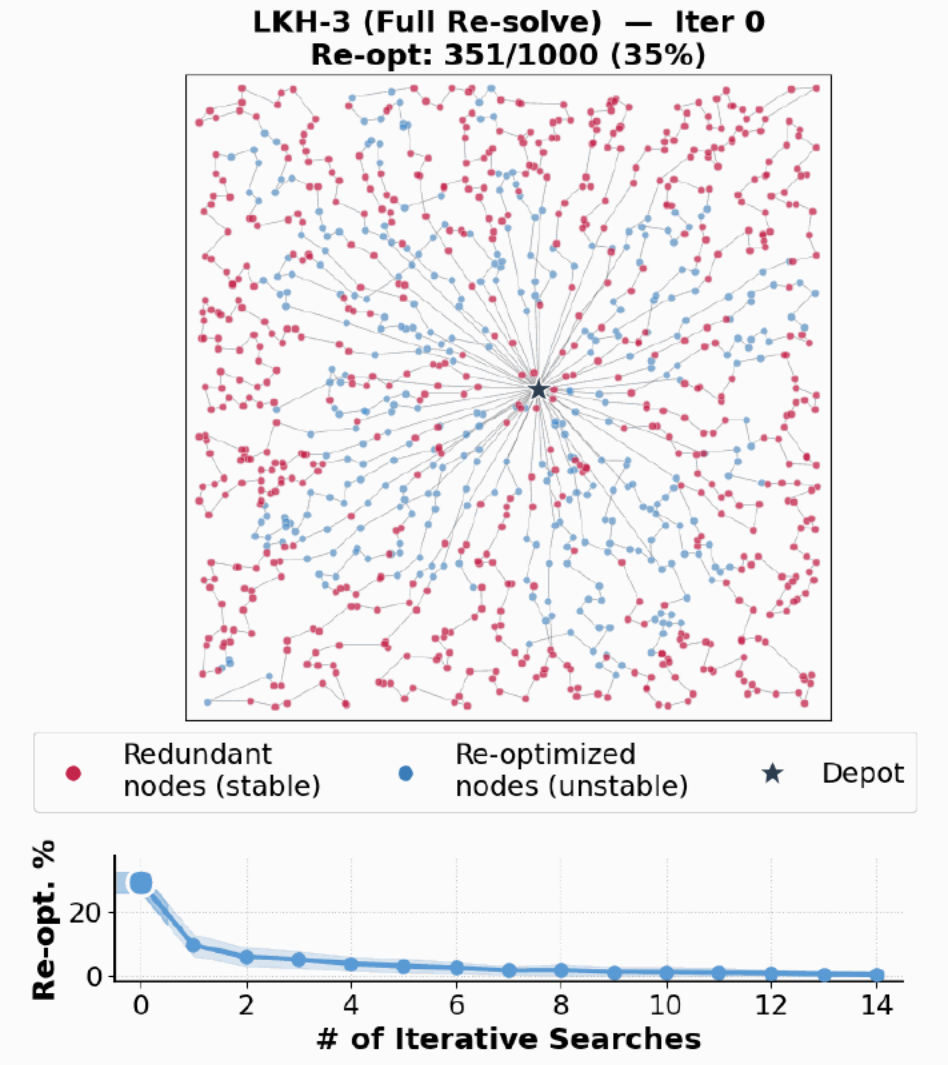


S. Li, W. Ouyang, Y. Ma, and C. Wu , “Learning-Guided Rolling Horizon Optimization for Long-Horizon Flexible Job Shop Scheduling,” in ICLR, 2025.

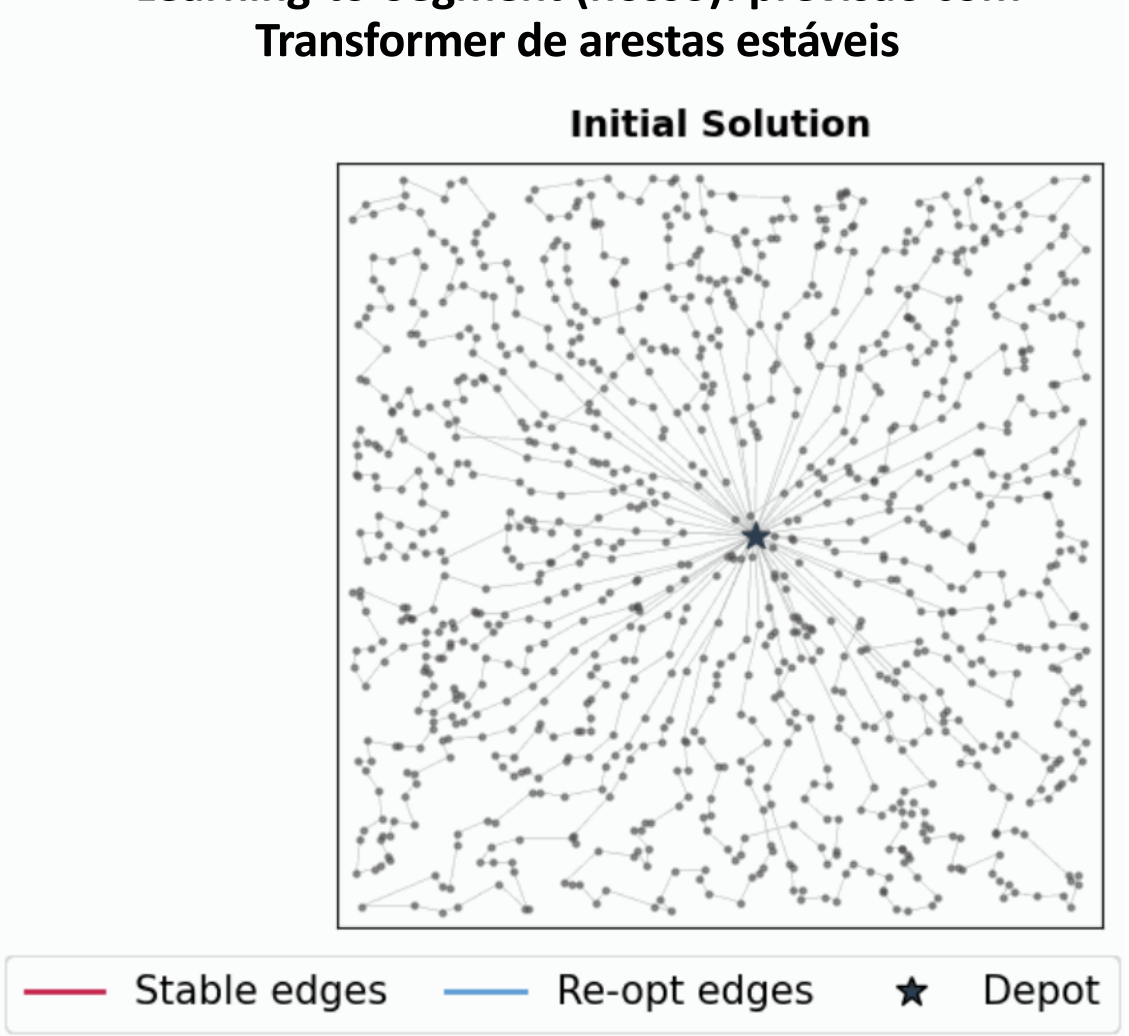
Wu

Aprender a reutilizar em grandes problemas de roteamento

Solver de ponta LKH (meta-heurística)



Learning-to-Segment (nosso): previsão com Transformer de arestas estáveis



Resultados: 7x mais rápido em CVRP com 2.000 clientes

W. Ouyang, S. Li, Y. Ma, and C. Wu , “Learning to Segment for Vehicle Routing Problems,” International Conference on Learning Representations (ICLR), 2026. Oral (1%) .

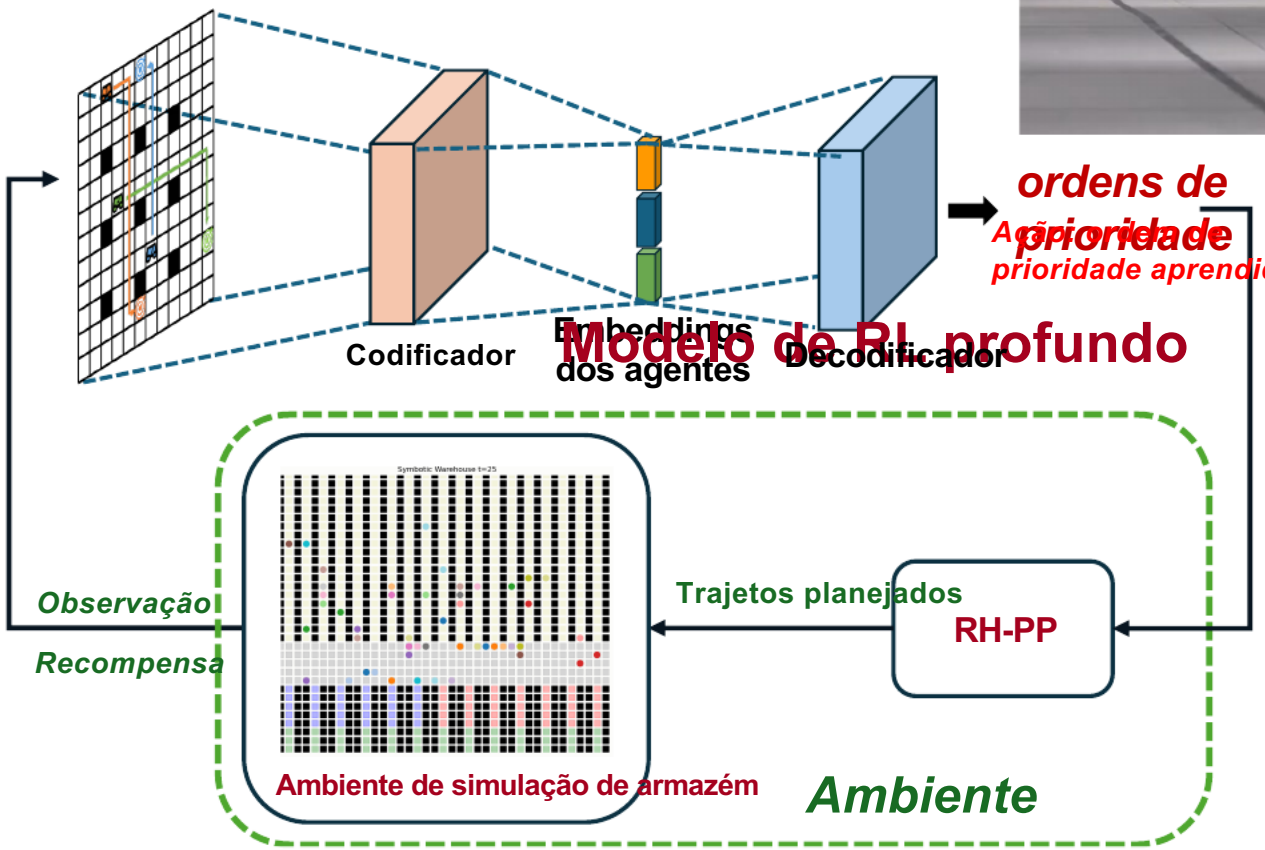
Mitigação de congestionamento em armazéns automatizados

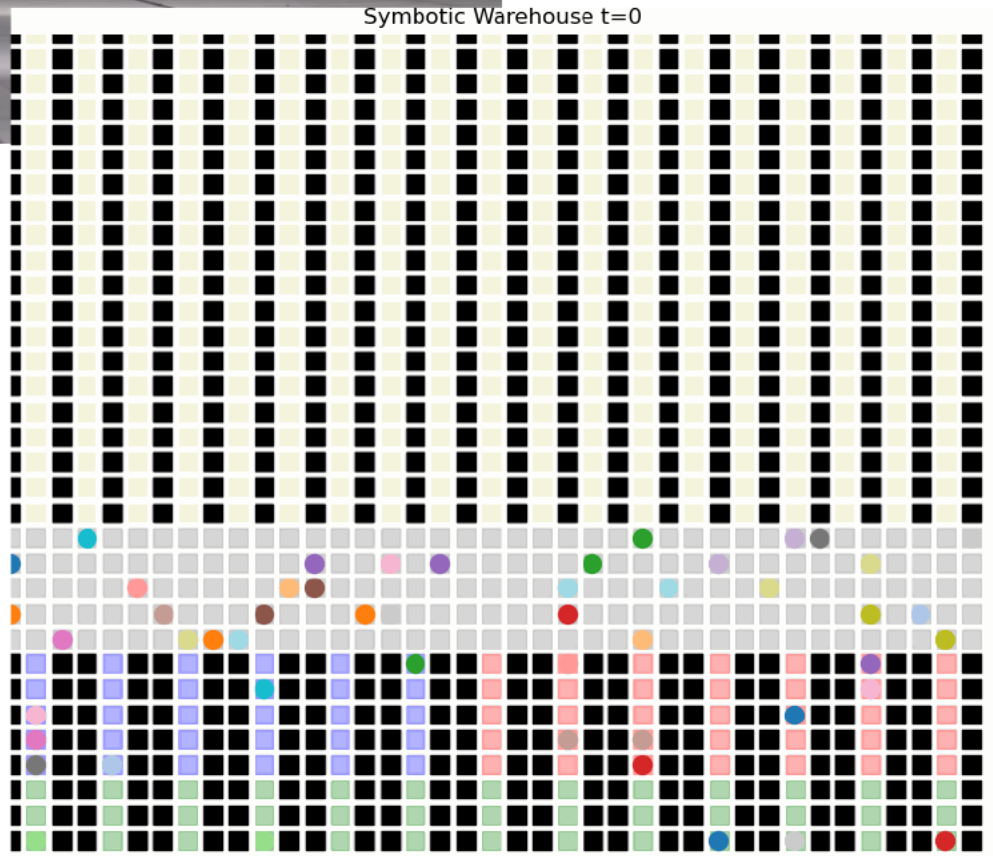
§ Aprender a ordem de prioridade dos agentes

§ Método: planejamento priorizado guiado por RL profundo

§ Resultados: +20% de vazão em **armazéns do tipo Symbotic**





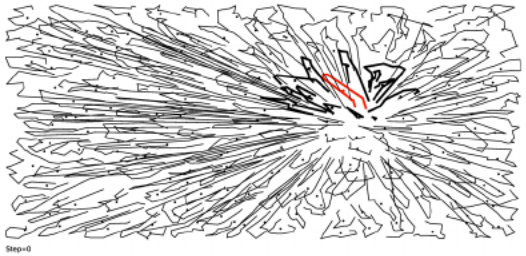


H. Zheng, Y. Ma, B. Araki, J. Chen, and C. Wu , "Learning-guided Prioritized Planning for Lifelong Multi-Agent Path Finding in Warehouse Automation," Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR) , 2026.

Otimização combinatória guiada por aprendizado

Contribuição: o aprendizado profundo pode acelerar solvers de otimização combinatória em 2-10x.

Aprender a focar e priorizar a busca



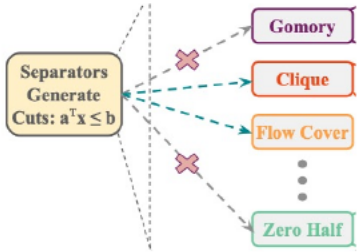
NeurIPS21 Spotlight (<3%)



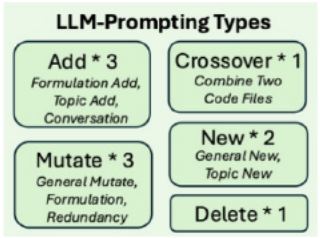
ICLR24

JAIR26

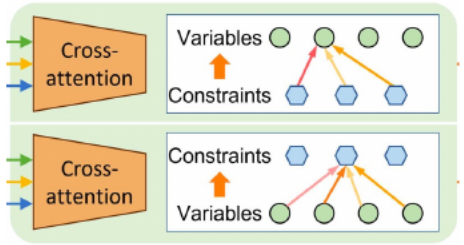
Aprendizado para programação linear inteira mista



NeurIPS23

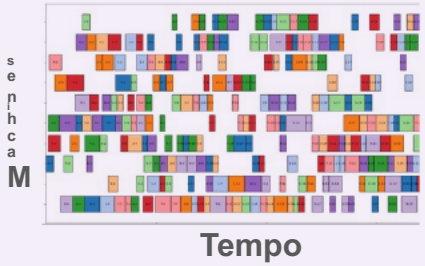


ICLR25

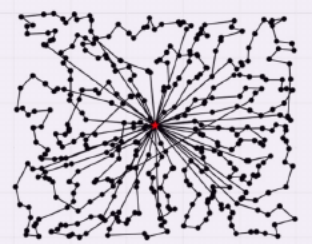


ICML26

Aprender a reutilizar entre iterações

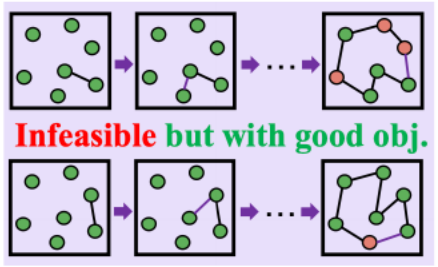


ICLR25



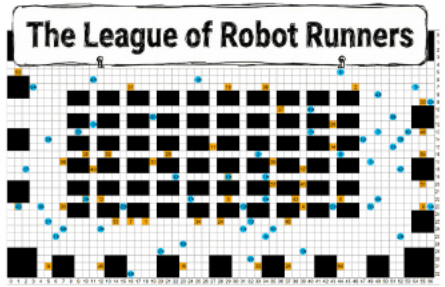
ICLR26 Oral (1%)

Aprender a reparar soluções

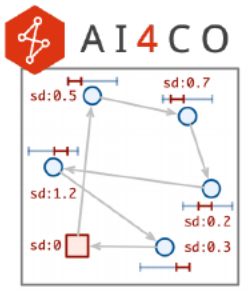


ICLR26

Benchmarks e competições



ICAPS24



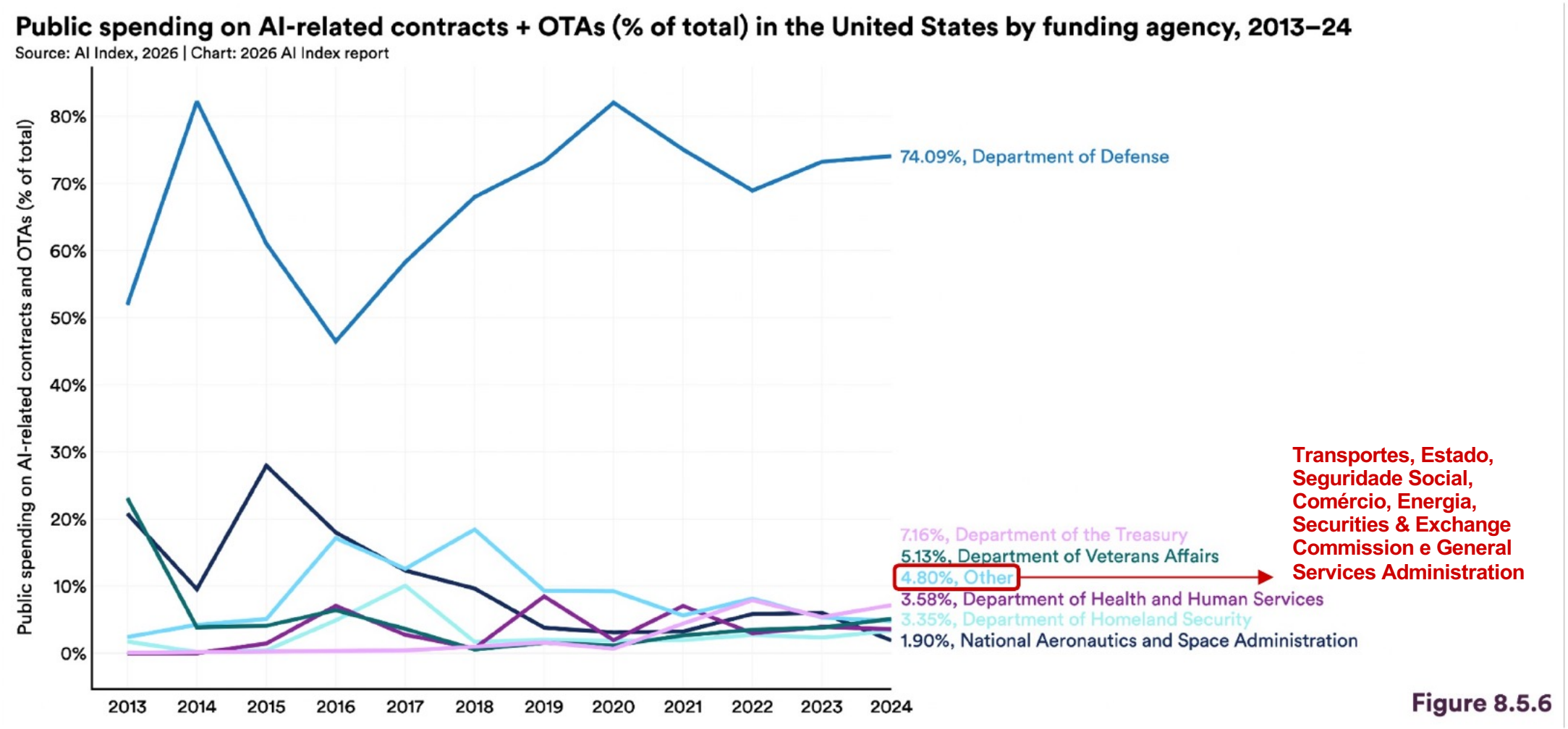
KDD25 Oral (9%)

Dados e computação modestos (1.000 instâncias, 1 dia em V100) ; razoavelmente generalizável.

Wu

Considerações finais

A IA nos transportes ainda está no começo



[1] S. Sha et al., “The AI index 2026 annual report,” in The AI index 2026 annual report, 2026. [Online]. Available: https://hai.stanford.edu/ai-index/2026-ai-index-report

Síntese das principais considerações

- Teoria da mudança para descarbonizar os transportes
  - A descarbonização dos transportes não tem um defensor econômico central para impulsioná-la
  - O sucesso exige uma ampla coalizão de atores com prioridades alinhadas ao clima
    - China → política industrial → segurança energética → eletrificação
    - Classes trabalhadora e média → votos → custo e conveniência → mudança modal
    - Empresas → operações → custo → ganhos de eficiência
  - Reflita: quais ações climáticas coincidem com as muitas prioridades dos transportes?
    - Exemplo pessoal: Utah → regular a condução → qualidade do ar → condução econômica
- Quando a IA é útil?
  - A IA pode 1) construir modelos de processos de transporte orientados por dados, 2) otimizar modelos para encontrar boas soluções, 3) automatizar fluxos digitais, 4) viabilizar a automação robótica
    - O mais difícil costuma ser descobrir quando um deles é um gargalo-chave e como se integra ao restante da solução/sistema

Pontos de entrada e próximos passos

Participe: transporte sustentável

- Bridging Transportation Researchers (BTR)
  - Conferência de pesquisa em transportes carbono zero, custo zero (virtual, 12-13 de agosto!)
- National Association of City Transportation Officials (NACTO)
  - Associação de cidades e órgãos de transporte da América do Norte que promove segurança, sustentabilidade, acesso e equidade nas cidades
  - Conferência Designing Cities (próxima edição: Nashville, maio de 2027)
- Transportation Research Part D: Transport and Environment
  - Principal periódico sobre impactos ambientais dos transportes, respostas de políticas e suas implicações para o projeto, o planejamento e a gestão dos sistemas de transporte
- Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting
  - O TRB faz parte das National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine
  - Ecossistema profissional central na América do Norte (Washington DC, todo janeiro)
  - Standing Committee on Transportation Energy Data and Analysis (AED18) (reunião anterior)
    - Foco: pesquisa e inovação em dados e métodos analíticos para medir uso de energia, consumo de combustível e eficiência dos sistemas de transporte.



Participe: IA + transportes

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies
  - Principal periódico sobre desenvolvimento, aplicações e implicações em sistemas de transporte e tecnologias emergentes
- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems
  - Principal periódico de pesquisa básica e aplicada sobre todos os aspectos científicos e técnicos dos sistemas de transporte modernos
- Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting
  - Ecossistema profissional central na América do Norte (Washington DC, todo janeiro)
- IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (próxima edição: Nápoles, Itália, 15-18 de set.)
  - A principal conferência de IA/ITS da área





Awesome RERITE: Uma lista selecionada de conjuntos de dados e benchmarks abertos para pesquisa em transportes

https://www.rerite.org/awesome-rerite

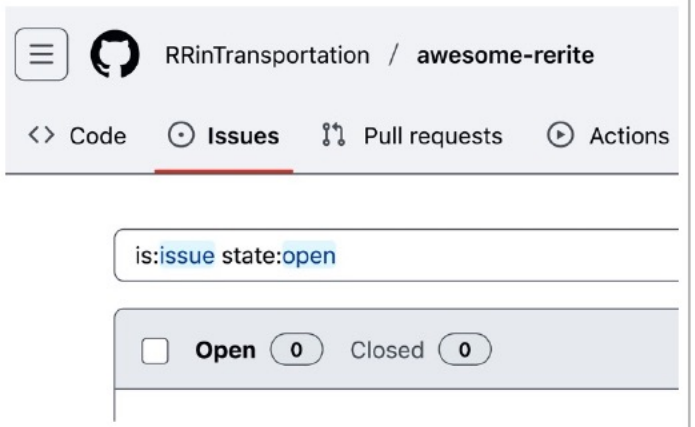
Tooling & Workflows

- **Global Urban Street Networks** — updated and published repository containing street network models for all 10,351 urban areas worldwide (GraphML, GeoPackages, and node/edge lists), plus indicators and metadata. Journal article: https://doi.org/10.1177/23998083261446991. Source code: https://github.com/gboeing/street-network-models.
- **OSMnx** — award-winning toolkit by Geoff Boeing for downloading, modeling, and analyzing street networks.
- **osm2gmns** — converts OpenStreetMap data into GMNS format; developed by Jiawei Lu and Xuesong (Simon) Zhou.
- **DTALite** — ASU Transportation AI Lab's macroscopic/mesoscopic AMS library that natively reads GMNS.
- **DTA** — Dr. Ke Han's open-source dynamic user equilibrium solver (see Networks and Spatial Economics, 2019).
- **OSRM** — C++14 routing engine providing lightning-fast shortest path queries.

Tem mais recursos para compartilhar? É fácil!

Queremos divulgar e compartilhar mais com a comunidade!

Abra uma issue na página do GitHub ou envie-nos um e-mail!



Explorador de ciência aberta para pesquisa em transportes



Chamada de interesse: edição especial sobre avaliações e conjuntos de dados em transportes (TR Part C e T-ITS)

Call for Interest: Transportation Evaluations & Datasets

RERITE is excited to announce a new initiative: In preparation for a Special Issue on "**Evaluations & Datasets for Transportation Research**", please let us know your evaluations & datasets **needs and wish list**. The special issue will be published with Transportation Research: Part C (TRC) and/or IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (T-ITS).

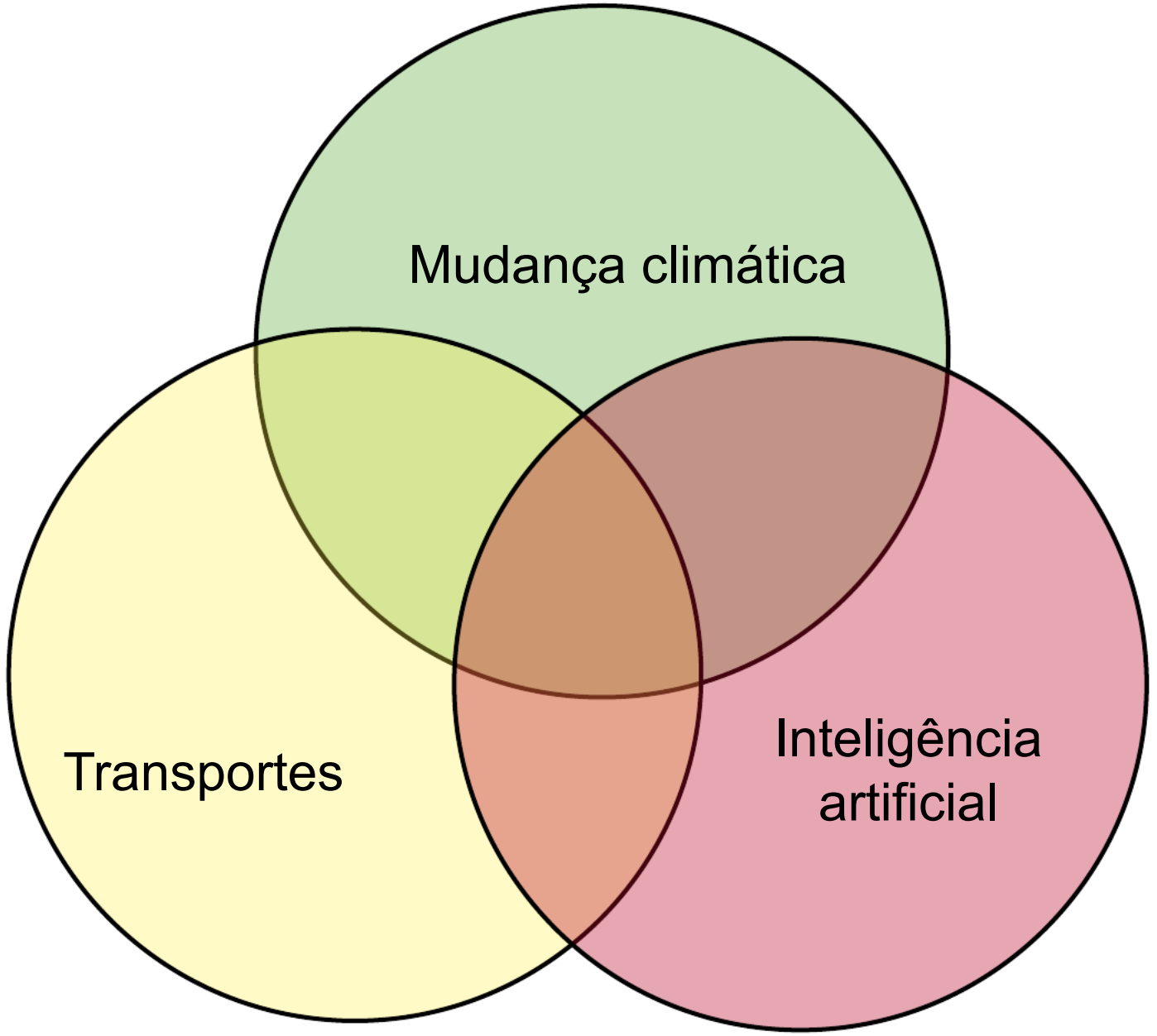
You are welcome to fill out the form as many times as you have wishes. Please include as much context as you can; the more context you provide, the more effectively we will be able to scope and target the special issue.

Do not worry about whether someone else will submit the same topic. The more a topic is expressed as a need, the more we can understand the needs of the community!

This initiative is modeled after the NeurIPS 2026 Evaluations & Datasets Track Call for Papers.

RERITE

rerite.org


Mudança climática
Transportes
Inteligência artificial

Apêndice

Temas adicionais

- IA para mitigação na aviação comercial
  - Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” (Chapter 7: Commercial Aviation), Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61 .
- IA para mitigação no transporte marítimo
  - World Economic Forum, “Intelligent Transport, Greener Future: AI as a Catalyst to Decarbonize Global Logistics.” Jan. 2025. https://seminarleadership.ibo.pe/case-02/ .
- IA para adaptação e resiliência dos transportes
  - Costa, Miguel, et al. “Artificial Intelligence for Climate Adaptation: Reinforcement Learning for Climate Change-Resilient Transport.” arXiv, 2026. https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.06278 .