

Novas perspectivas sobre
os caminhos do Brasil para
o crescimento industrial
e a descarbonização:

**Cenários, políticas e
estratégias conjuntas
impulsionadas pelo
estímulo à demanda.**



Moldando o futuro da tecnologia da energia, juntos.

Prefácio

Com a COP30 em solo brasileiro, nossa nação tem a oportunidade de mostrar e demonstrar nossa própria transformação. Este documento abrangente representa a concretização de uma parceria estratégica entre o Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric (SRI) e a Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioeconomia (SEV) do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) do Brasil. Formalizada por meio de um Memorando de Entendimento assinado em setembro de 2025, essa colaboração surgiu da convicção compartilhada de que o Brasil pode liderar o mundo pelo exemplo, transformando sua base industrial em uma força competitiva, sustentável e descarbonizada, ao mesmo tempo em que promove a prosperidade inclusiva.

Este documento contém a coleção completa de três estudos de pesquisa integrados, cada um projetado para abordar dimensões distintas, porém interconectadas, da descarbonização industrial no Brasil. Esses relatórios formam uma resposta estratégica unificada a um dos desafios definidores de nossa era: como as economias emergentes podem alcançar a ambição climática sem comprometer a competitividade ou o emprego. **Os três estudos são brevemente descritos na próxima página e estão incluídos, na íntegra, neste único documento.**

Esta base fornece o embasamento empírico para a tomada de decisões estratégicas. Esta pesquisa foi desenvolvida em estreita colaboração com a Câmara Americana de Comércio do Brasil (AmCham Brasil) e a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), garantindo o alinhamento com as partes interessadas dos setores governamental, industrial e acadêmico. O trabalho reflete um compromisso com a formulação de políticas baseadas em evidências e com o engajamento inclusivo das partes interessadas.

Os estudos aprimoram o posicionamento do Brasil antes da COP30, apoiando iniciativas nacionais importantes, incluindo o programa Nova Indústria Brasil, a Estratégia Nacional de Desenvolvimento Industrial (ENDI) e o Plano Setorial para a Indústria dentro do Plano Nacional de Mudanças Climáticas. Fundamentalmente, este conjunto de trabalhos demonstra que a descarbonização e a competitividade industrial não são objetivos concorrentes, mas podem ser complementares e uma vantagem competitiva.

À medida que o Brasil transita para uma economia de baixo carbono, essas descobertas de pesquisa irão subsidiar workshops em agrupamentos industriais prioritários, envolvendo líderes do governo, do setor privado, da academia e da sociedade civil. Este documento serve como recurso de referência e catalisador para a ação, permitindo que os tomadores de decisão considerem estratégias e tecnologias fundamentadas em análises rigorosas e nas melhores práticas globais.

Convidamos os leitores a se envolverem com esta obra não apenas como um relatório técnico, mas como uma nova perspectiva sobre o que a demanda futura por energia, bens e serviços significa para o Brasil e como essa demanda pode ser aproveitada em benefício do país e do seu povo.

Karolina Gutiez
Gerente Sênior de Comunicação, Assuntos Corporativos e Sustentabilidade para a América do Sul
Schneider Electric



Potência verde do Brasil: Perspectivas originais sobre o potencial de descarbonização do Brasil por meio da inovação apresenta análises prospectivas até 2050, fundamentadas em experiências internacionais e dados empíricos. Quantifica caminhos para a descarbonização nos setores industrial, de transportes e da construção civil, projetando impactos nas matrizes energéticas, na redução de emissões e na adoção de tecnologias.



Estrutura de políticas de estímulo à demanda para indústrias com alta emissão traduz o aprendizado global em uma estrutura política para criar mercados verdes. Baseando-se nos sucessos e fracassos das políticas de demanda, essa estrutura propõe uma abordagem gradual para políticas que complementam as iniciativas de pressão da oferta, visando a criação de mercados.



Estratégias para transformação sustentável no lado da demanda: Insights da Pesquisa do SRI documenta a pesquisa e a análise sobre a transição energética, compartilha a experiência da Schneider Electric na criação de cenários estratégicos a partir de outros países, análises técnico-econômicas do aço verde e da amônia, e examina as implicações de uma base industrial crescente e descarbonizada.

Aviso legal

O conteúdo desta publicação é apresentado apenas para fins informativos e, embora tenham sido feitos esforços para garantir sua precisão, não deve ser interpretado como garantia de qualquer tipo, expressa ou implícita. Esta publicação não deve ser usada como base para aconselhamento de investimento ou outras decisões estratégicas.

As premissas, modelos e conclusões apresentados nesta publicação representam um cenário possível e dependem inerentemente de muitos fatores fora do controle de qualquer empresa, incluindo, entre outros, ações governamentais, evolução das condições climáticas, considerações geopolíticas e mudanças tecnológicas. Os cenários e modelos não se destinam a ser projeções ou previsões para o futuro e não representam a estratégia ou o plano de negócios da Schneider Electric.

O logotipo da Schneider Electric é uma marca comercial e de serviço da Schneider Electric SE. Quaisquer outras marcas permanecem propriedade de seus respectivos proprietários

Autores

Schneider Electric

Vincent Petit, SVP de Pesquisa sobre Transição Climática e Energética, chefe do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Thomas Kwan, Vice President Global de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Enerdata

Quentin Bchini, Gerente de Projeto, Previsão Global de Energia, Enerdata

Magali Mellon, Especialista de Projeto, Previsão Global de Energia, Enerdata

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às seguintes pessoas por seus valiosos insights, revisão dos primeiros rascunhos e envolvimento ativo no desenvolvimento e melhoria de nosso trabalho e colaboração com o MDIC do Brasil:

Gustavo Saboia Fontenele e Silva, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Luiz Camargo De Miranda, Ministério da Justiça

Leonardo Belvino Pova, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Demetrio Florentino de Toledo Filho, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Jorge Luis Ferreira Boeira, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

Karolina Gutiez, Schneider Electric

Fabrizio Sardelli Panzi, Amcham Brasil

André Luis Ribeiro Barbosa, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Juliana Tamanaha, Ministério dos Transportes

George Yun, Ministério dos Transportes

Isabella Scorzelli, E+

Simone Klein, E+

Rosana dos Santos, E+

Juliana Klas, UFRGS

Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da
Schneider Electric™



Potência verde do Brasil Perspectivas originais sobre o potencial de descarbonização do Brasil por meio de inovação

com o apoio do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços do Brasil

A ação climática e o crescimento econômico inclusivo se reforçam mutuamente



Prefácio

Com a COP30 em solo brasileiro, nossa nação tem a oportunidade de mostrar nossa própria transformação e demonstrar caminhos que o mundo pode seguir. O Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços reconhece que a competitividade futura do Brasil depende de nossa capacidade de aproveitar as sinergias entre a modernização industrial e a gestão ambiental. Por meio de iniciativas como a Nova Indústria Brasil, já estamos lançando as bases para um ecossistema industrial que gera prosperidade justamente por abraçar a sustentabilidade, e não apesar das restrições ambientais. Esta análise abrangente do potencial de transformação energética do Brasil fornece informações essenciais que se alinham com nossa visão estratégica para a trajetória de desenvolvimento do país até 2050. A metodologia de pesquisa, com foco nas transformações do lado da demanda e na evolução dos serviços de energia, oferece um valioso complemento aos estudos tradicionais de sistemas energéticos, examinando como a inovação tecnológica e a mudança nos padrões de consumo podem remodelar nosso cenário energético.

As descobertas aqui apresentadas reforçam nossa convicção de que a matriz de energia renovável do Brasil nos posiciona de forma única para capturar as oportunidades econômicas inerentes à transição global para economias com emissões líquidas zero. A análise de possíveis caminhos para a eletrificação, o desenvolvimento industrial verde e os cenários de otimização do uso da terra fornece orientações para estruturas políticas que podem, simultaneamente, impulsionar nossos compromissos climáticos e fortalecer nossa competitividade industrial.

A perspectiva sistêmica do relatório está alinhada com nossa abordagem integrada para o desenvolvimento de políticas, reconhecendo que uma ação climática eficaz requer coordenação entre múltiplos setores e níveis de governo.

A estrutura colaborativa subjacente a esta pesquisa exemplifica o tipo de cooperação técnica que fortalece nossa capacidade de desenvolvimento de políticas, mantendo, ao mesmo tempo, uma rigorosa independência analítica. Essas colaborações permitem a tomada de decisões baseadas em evidências, que atendem aos nossos objetivos de desenvolvimento nacional e contribuem para o conhecimento global sobre transformação industrial sustentável.

O Brasil permanece comprometido em demonstrar que ações climáticas ambiciosas e crescimento econômico inclusivo não são objetivos concorrentes, mas estratégias que se reforçam mutuamente. As informações contidas neste relatório contribuem para nossos esforços contínuos no desenvolvimento de políticas que posicionem o Brasil como líder global em sustentabilidade, garantindo que essa transformação traga benefícios tangíveis para famílias, comunidades e empresas brasileiras em todas as regiões do país. O caminho para um futuro sustentável e próspero exige colaboração contínua entre instituições públicas, parceiros do setor privado e organizações de pesquisa comprometidas com análises rigorosas e soluções baseadas em evidências. Esta parceria representa o nosso compromisso compartilhado em construir a base de conhecimento necessária para uma governação eficaz numa era de rápidas mudanças tecnológicas e ambientais.

Julia Cortez da Cunha Cruz
Secretária de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria
Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC)
Brasília, Brasil



Apresentação do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric

A conscientização global por um mundo mais inclusivo e com impacto climático positivo atingiu seu ápice. Isso inclui emissões de carbono, bem como a prevenção de danos ambientais e da perda de biodiversidade. Estados-nação e corporações estão cada vez mais assumindo compromissos climáticos e incluindo temas de sustentabilidade em sua governança. Entretanto, o progresso está longe do ideal.

Como podemos transformar esse momentum em realidade? Alinhando as ações aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. Aproveitando a pesquisa científica e a tecnologia. Obtendo uma melhor compreensão do futuro da energia e da indústria, e das mudanças sociais, ambientais, tecnológicas e geopolíticas que estão acontecendo ao nosso redor. Reforçando os mecanismos legislativos e financeiros que podem impulsionar mais ações. E deixando claro o que os setores público e privado podem fazer para que tudo isso aconteça.

A missão do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ é examinar os fatos, as questões e as possibilidades, analisar os contextos locais e entender o que as empresas, as sociedades e os governos podem e devem fazer mais. Nosso objetivo é compreender as tendências atuais e futuras que afetam o cenário energético, empresarial e comportamental para antecipar desafios e oportunidades. Por meio dessa perspectiva, contribuimos com insights diferenciados e práticos.

Criamos nosso trabalho com base em intercâmbios regulares com especialistas institucionais, acadêmicos e de pesquisa, colaborando com estes em projetos de pesquisa, quando relevantes. Nossas descobertas estão disponíveis publicamente **online** e nossos especialistas participam regularmente de fóruns para compartilhar seus insights.

Criada em 2020, nossa equipe faz parte da Schneider Electric, líder na transformação digital da gestão de energia e automação, cujo propósito é conectar progresso e sustentabilidade para todos.

Neste relatório, exploramos dois cenários para a descarbonização no Brasil até 2050. O que diferencia este relatório de outros é o seu foco em serviços de energia (ou demanda de energia), uma dimensão frequentemente negligenciada em cenários contemporâneos. Uma descoberta fundamental deste trabalho é que o Brasil, dadas as suas notáveis reservas de energias renováveis, está numa posição única para modernizar a sua economia rumo a uma maior abundância e liderança nas indústrias verdes. E, à medida que a sua economia se moderniza, descarboniza-se.

Consideramos muitas destas mudanças inevitáveis, mas uma questão fundamental é a extensão e o ritmo em que estas transformações se materializarão. Para viabilizar esta modernização, será essencial o desenvolvimento de uma infraestrutura elétrica robusta e moderna. Exploramos estas dinâmicas através de dois cenários. No cenário **Terra Firme**, um atraso persistente na infraestrutura elétrica impede uma transformação radical da economia, levando a uma estabilização das emissões residuais até 2050 nos níveis atuais. Em **Salto Verde**, por outro lado, a descarbonização é possibilitada por uma rápida implantação da infraestrutura de eletricidade, reduzindo as emissões em 60% até 2050 e oferecendo oportunidades de baixo custo para reduzir as emissões líquidas a zero até aquela data.

Rafael Segrera – Presidente da zona da América do Sul, Schneider Electric

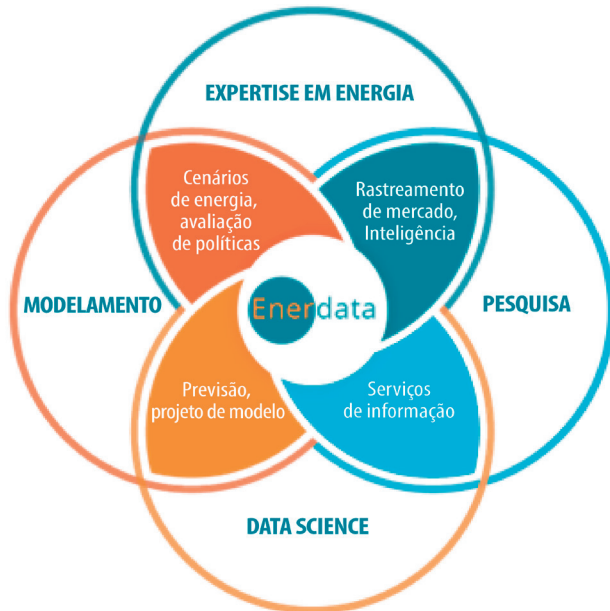
Vincent Petit, Vice-Presidente Sênior de Pesquisa em Transição Climática e Energética, chefe do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Thomas Kwan, Vice-Presidente Global de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais, Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Apresentação da Enerdata

A Enerdata é uma empresa de pesquisa independente, fundada em 1991, com sede em Grenoble, França, com uma subsidiária em Singapura. A empresa é especializada na análise e previsão de questões energéticas e climáticas, em nível mundial e nacional. Utilizando seus bancos de dados, sistemas de inteligência e modelos reconhecidos globalmente, a Enerdata auxilia empresas, investidores e órgãos governamentais em todo o mundo no desenvolvimento de suas políticas, estratégias e planos de negócios.

Principais competências e expertise da Enerdata



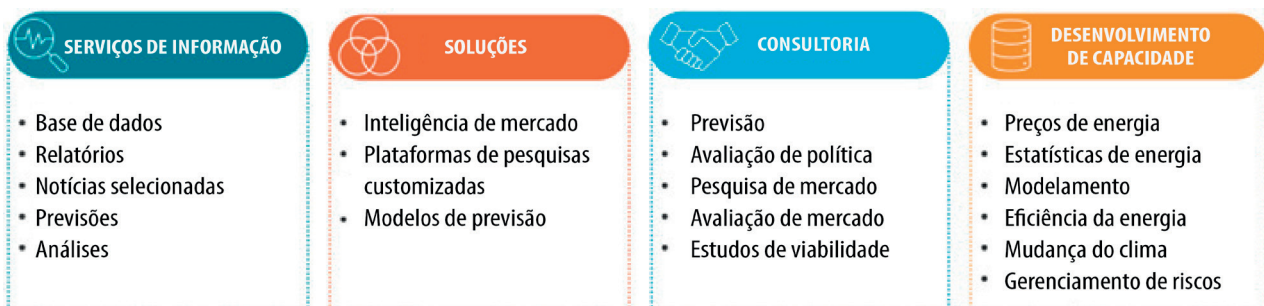
Apoiamos as empresas na análise dos mercados de energia, na avaliação de suas opções e na tomada de decisões corretas, considerando também o impacto dessas decisões no clima.

Nosso expertise abrange:

Demanda e preços:

- todos os tipos de energia, bem como emissões de gases do efeito estufa (GEE)
- em cerca de 186 países
- desde o nível industrial, passando pelo setorial, até o nível de uso final
- todo o espectro dos fundamentos do mercado de energia e seus direcionadores:
 - Regulamentação e políticas
 - Suprimento, importações e exportações
 - Demanda e preços
 - Participantes, ativos e projetos

Ampla oferta da Enerdata



Expertise prospectiva da Enerdata e seu papel neste estudo

A Enerdata possui longa experiência em análises prospectivas de energia e emissões, tanto em escala nacional quanto global, auxiliando clientes na definição de estratégias ou na tomada de decisões que exigem a exploração de possíveis futuros do sistema energético. Clientes dos setores público e privado confiam nas análises de alta qualidade realizadas com modelos e ferramentas proprietárias, como POLES-Enerdata, EnerNEO (escopos nacional e/ou internacional para demanda e oferta de energia) e EnerMED (análise detalhada, de baixo para cima, da demanda e políticas de energia, anteriormente conhecida como MedPro). Neste estudo, o papel da Enerdata concentrou-se nas premissas e metodologia, nos dados e na modelagem utilizando o modelo POLES-Enerdata, bem como no apoio à coordenação do projeto.

**JUNTOS, VAMOS ACELERAR A DESCARBONIZAÇÃO DA NOSSA SOCIEDADE
E CONSTRUIR UM MUNDO MAIS SUSTENTÁVEL.**

www.enerdata.net
research@enerdata.net

¹ O modelo POLES foi inicialmente desenvolvido pelo IEPE (Instituto de Economia e Política Energética), agora GAEL lab (Laboratório de Economia Aplicada de Grenoble). A versão do modelo utilizada neste relatório é a versão do modelo POLES pertencente e operada pela Enerdata, denominada POLES-Enerdata.



Resumo executivo



Resumo executivo

Nova abordagem para modelar o futuro da energia

Nos últimos anos, as emissões de gases do efeito estufa continuaram a aumentar de forma constante, impulsionadas em grande parte [1] pelas emissões de carbono de combustíveis fósseis.[2]

As emissões mundiais ainda não atingiram o pico e a perspectiva de manter o aquecimento global sob controle rigoroso permanece ilusória.

De fato, os últimos anos estão entre os mais quentes já registrados [3, 4] e os cientistas alertam que as transformações climáticas já começaram, de maneiras ainda difíceis de compreender, e que podem agravar ainda mais a situação.

A jornada de descarbonização do Brasil é, portanto, de crucial importância. Contudo, para que a descarbonização seja bem-sucedida, ela precisa vir acompanhada de desenvolvimento econômico contínuo. Deve ser uma transição que também contribua para a melhoria dos padrões de vida e que leve em consideração as especificidades regionais. Acreditamos firmemente que a mudança climática só pode ser solucionada se estiver fundamentada no progresso humano, e não às suas custas. Neste relatório, buscamos explorar se essas diferentes dinâmicas podem ser conciliadas.

Nosso trabalho se diferencia de outras análises semelhantes.

A história das transições energéticas revela que, em sua maior parte, elas foram impulsionadas por evoluções nos padrões de consumo, ou seja, na oferta de serviços econômicos ou energéticos.

A maioria dos modelos tende a adotar uma abordagem simplificada para essas mudanças e a perpetuar as estruturas econômicas existentes (e, portanto, os serviços), como se pouca coisa fosse evoluir nas próximas décadas.

Entretanto, a evolução da demanda por energia não é linear.

Afinal, não enviávamos e-mails há 30 anos, e poucos de nós tínhamos acesso a recursos de comunicação modernos, muito menos a um telefone celular.

Por mais óbvio que isso possa parecer, é improvável que o futuro de nossas economias se assemelhe ao de hoje, e o futuro sistema energético, consequentemente, será diferente.

E se nossa compreensão da demanda futura por energia estiver incorreta, nossa previsão sobre o que precisa ser feito no sistema resultante provavelmente será enganosa.

Nosso trabalho, portanto, enfatiza as interações sistêmicas entre as transformações da demanda de energia e as adaptações do lado da oferta, reconhecendo que os resultados reais dependerão de processos socioeconômicos e políticos complexos que não são totalmente capturados em estruturas de modelagem quantitativa.

Neste relatório, exploramos inicialmente 12 transformações chave da economia que consideramos mais promissoras (dado o seu progresso relativo até o momento) (Figura i).

Em seguida, desenvolvemos dois cenários para o futuro energético e as trajetórias de emissões do Brasil, nos quais avaliamos diversas dinâmicas que afetam o desenvolvimento dessas transformações, incluindo incertezas quanto aos níveis de prontidão tecnológica, à eficácia da implementação de políticas e à capacidade de coordenação entre as partes interessadas, bem como as condições econômicas globais, os desenvolvimentos geopolíticos e os impactos climáticos nos sistemas energéticos.

O primeiro cenário, **Terra Firme**, faz um balanço das principais barreiras econômicas e geográficas e pressupõe pouca mudança na direção do trabalho institucional. Uma consequência fundamental disso é um relativo status quo no desenvolvimento da infraestrutura, materializado por meio de uma defasagem no desenvolvimento de uma infraestrutura elétrica robusta (em relação ao crescimento da demanda por eletricidade), entre outras questões. Esses padrões de desenvolvimento influenciam ativamente a forma e o ritmo da mudança. O segundo cenário, **Salto Verde**, pressupõe, ao contrário, uma transformação abrangente da economia brasileira, moldada pela rápida adoção dessas transformações pelos consumidores e poucos gargalos de infraestrutura.

Os cenários não são previsões do que acontecerá no futuro, mas sim um exercício para compreender a extensão do impacto de mudanças imprevisíveis. Nossos dois cenários demonstram que o futuro permanece amplamente aberto e que as trajetórias podem divergir significativamente ao longo do tempo, dependendo das escolhas que serão feitas.

12 transformações

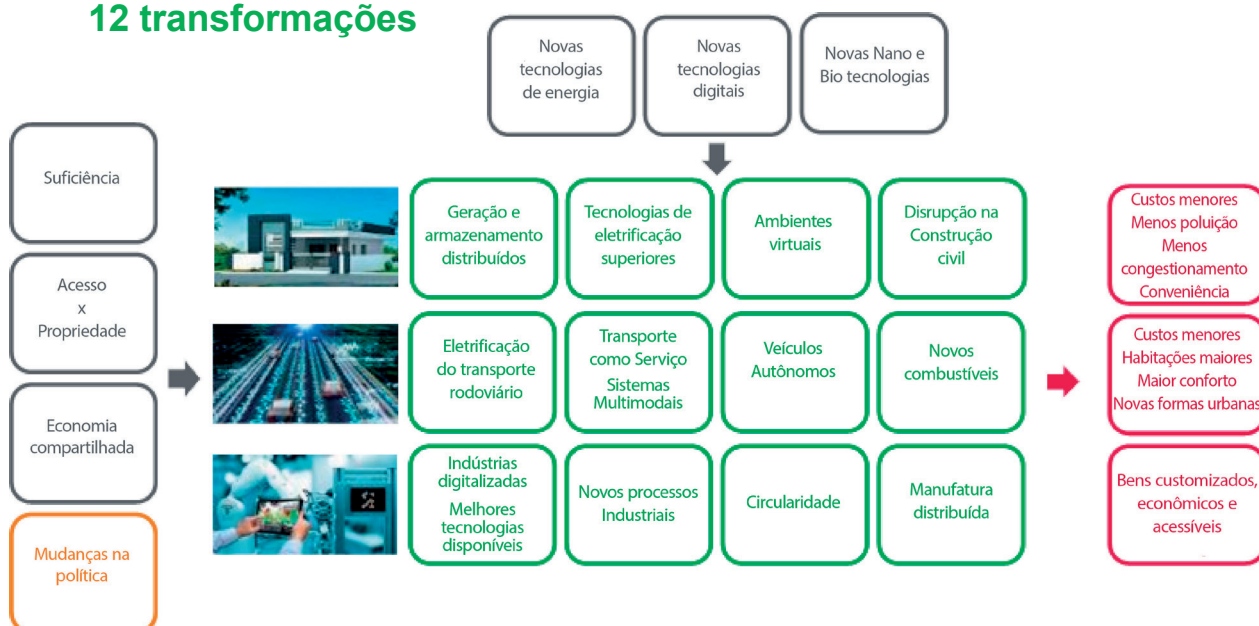


Figura i – 12 transformações dos serviços de energia

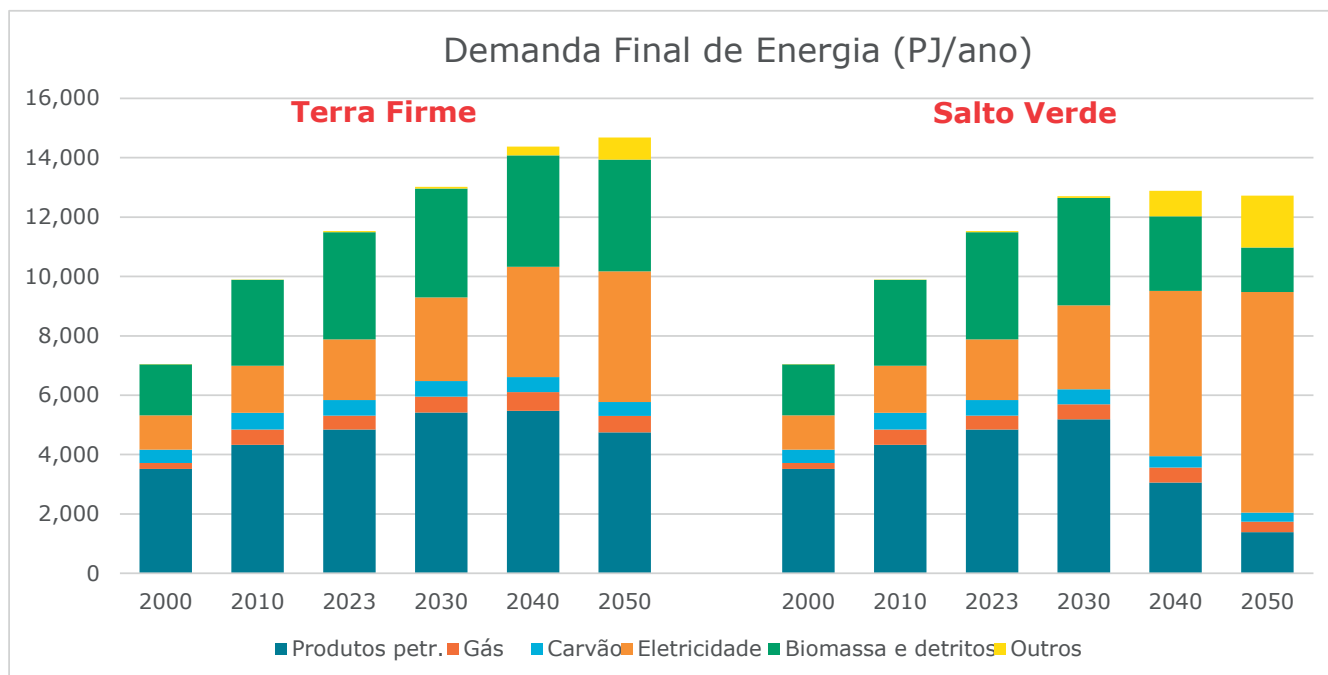


Figura ii – Demanda final de energia, por fonte

Tabela – Energia e emissões no Brasil em dois cenários

Pontos de dados importantes	Terra Firme						Salto Verde					
	2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Demanda Final (PJ)	7,039	9,897	11,533	13,021	14,377	14,681	7,039	9,897	11,533	12,703	12,881	12,724
- fração de combustíveis fósseis	59%	55%	51%	50%	46%	39%	59%	55%	51%	49%	31%	16%
- fração de biomassa	24%	29%	31%	28%	26%	26%	24%	29%	31%	28%	20%	12%
- fração de eletricidade	16%	16%	18%	22%	26%	30%	16%	16%	18%	22%	43%	58%
Indústria (PJ)	2,739	3,980	4,159	4,458	4,950	5,330	2,739	3,980	4,159	4,487	5,113	5,768
- fração de combustíveis fósseis	42%	36%	29%	30%	27%	21%	42%	36%	29%	29%	23%	15%
- fração de biomassa	39%	46%	51%	48%	44%	41%	39%	46%	51%	47%	29%	12%
- fração de eletricidade	19%	18%	19%	22%	25%	27%	19%	18%	19%	23%	34%	46%
Edifícios (PJ)	1,267	1,505	1,858	2,071	1,979	1,913	1,267	1,505	1,858	1,897	1,861	1,892
- fração de combustíveis fósseis	26%	21%	18%	15%	13%	12%	26%	21%	18%	13%	5%	2%
- fração de biomassa	28%	26%	19%	17%	13%	7%	28%	26%	19%	20%	9%	1%
- fração de eletricidade	46%	52%	60%	66%	72%	80%	46%	52%	60%	65%	84%	95%
Mobilidade (PJ)	2,176	3,298	4,419	5,090	5,546	5,430	2,176	3,298	4,419	4,958	3,842	3,139
- fração de combustíveis fósseis	89%	83%	78%	79%	76%	68%	89%	83%	78%	78%	57%	31%
- fração de biomassa	11%	17%	21%	19%	20%	21%	11%	17%	21%	19%	16%	14%
- fração de eletricidade	0%	0%	0%	1%	4%	9%	0%	0%	0%	3%	24%	49%
Geração de eletricidade (TWh)	445	592	718	949	1,205	1,422	445	592	718	954	1,788	2,386
- fração de energia Eólica e Solar	0%	0%	20%	36%	43%	54%	0%	0%	20%	35%	58%	74%
Emissões de CO2 – Residual (MtCO2)	359	480	511	558	551	465	359	480	511	530	351	197
Emissões de CO2 depois de restauração do solo da produção de biomassa	359	480	511	558	551	465	359	480	511	529	168	0
Emissões de CO2 – depois de CCS/DAC/NBS	359	480	511	558	312	0	359	480	511	529	168	0

Ambos os cenários prevêem uma modernização radical da economia brasileira até 2050, resultando, em primeiro lugar, em melhorias significativas nos padrões de vida e, em segundo lugar, em uma importante expansão do setor industrial. A área residencial per capita aumenta de 50% a 100% em ambos os cenários, o acesso a eletrodomésticos modernos, como ar condicionado (taxa de penetração de 70% a 100% até 2050) ou fogões mais limpos (de 20% a 100% dos preparos de alimentos serão elétricos até 2050), a mobilidade mais limpa se desenvolve (de 50% a 100% das vendas de carros novos serão de veículos elétricos em 2050) e a economia se digitaliza ainda mais, levando a uma expansão crucial de data centers.

O setor industrial também se desenvolve. O país amplia sua presença nas indústrias de aço verde (produção de 2,7 a 4 vezes maior até 2050) e química (produção 40% a 50% maior). Além disso, expande significativamente seus setores de mineração (aumento de 50%) e manufatura.

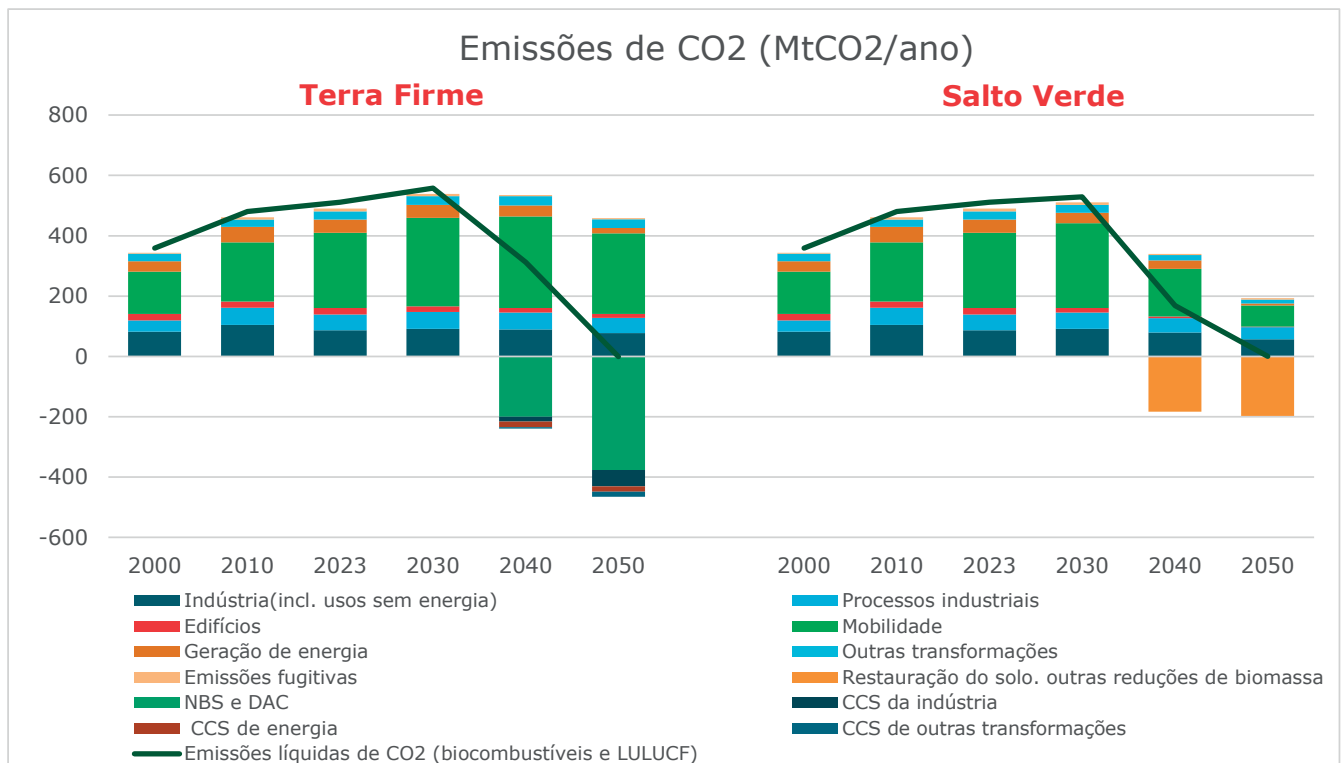


Figura iii – Jornada para Emissão Líquida Zero

Um mundo de crescente abundância. Uma potência industrial verde. Um gigante das energias renováveis.

Embora essas tendências se materializem em ambos os cenários, a extensão e a forma de seu desenvolvimento variam entre eles. Em **Terra Firme**, a competição pelo acesso à eletricidade permanece um desafio fundamental nas próximas décadas, e o trabalho institucional e político se concentra na diversificação das fontes de fornecimento de energia, notadamente com foco na indústria brasileira de biomassa, com implicações importantes na forma da mudança e da inovação. Por outro lado, em uma série de barreiras e, notadamente, uma defasagem crítica no desenvolvimento da infraestrutura elétrica, a adoção e as transformações de setores chave são limitadas e, em última instância, ficam comprometidas. A energia continua sendo um recurso escasso, com interesses concorrentes para acessá-la. Em **Salto Verde**, um grande esforço para aproveitar os 300.000 pentajoules de recursos renováveis do Brasil (ou seja, 30 vezes a demanda atual de energia) leva a uma expansão crítica da infraestrutura elétrica em paralelo com outros setores de energia, criando oportunidades para transformações econômicas aceleradas.

A Figura ii fornece uma perspectiva sobre a evolução da demanda final de energia em ambos os cenários. A Tabela i complementa essa visão com um panorama dos principais indicadores de energia. Em **Terra Firme**, a participação da eletricidade aumenta modestamente (de 18% em 2023 para 30% em 2050), em função da modernização da economia, enquanto o volume de combustíveis fósseis e biomassa permanece estável ao longo do período. A competição por energia que se materializa no início da década de 2030 leva a preços elevados e sustentados da eletricidade e a problemas de conexão à rede.

Em contraste, **Salto Verde** apresenta uma transformação diferente após 2030. A disponibilidade de uma infraestrutura elétrica robusta, juntamente com políticas de apoio focadas na remoção dos obstáculos discutidos acima, leva a uma transformação abrangente da economia brasileira.

A expansão de novos usos e serviços movidos a eletricidade é mais rápida e a eletricidade também substitui recursos energéticos alternativos. A quota da eletricidade aumenta significativamente (de 18% em 2023 para 58% em 2050), atingindo níveis semelhantes às projeções na Europa [5] ou na China [6]. A participação dos combustíveis fósseis cai de 51% em 2023 para 16% em 2050. A biomassa também é substituída em diversos setores pela eletricidade, e sua participação na demanda final de energia cai de 31% para 12%. Essas mudanças ocorrem na mobilidade (veículos elétricos), em edifícios (aquecimento e cozinha) e na indústria (principalmente nos setores de manufatura, mineração e alimentos).

A demanda final de energia se estabiliza em **Salto Verde**, devido ao aumento da eficiência proveniente da eletrificação, o que modera o crescimento geral da demanda de energia, um fator menos visível em **Terra Firme**.

A descarbonização do Brasil é mais factível do que pensávamos?

Esses diferentes futuros possíveis têm implicações para a jornada de descarbonização do Brasil. Em **Terra Firme**, as emissões reduzem-se de 510 MtCO2 por ano em 2023 para cerca de 460 MtCO2 por ano em 2050 apesar da expansão econômica. Em contraste, as emissões em **Salto Verde** caem para cerca de 200 MtCO2 por ano nessa altura, porque a substituição dos combustíveis fósseis na procura de energia pela eletricidade gerada por fontes renováveis acelera o declínio das emissões (Figura iii).

Cerca de metade das emissões do Brasil hoje provém do setor de mobilidade. Mantendo-se tudo o mais constante, a ascensão da mobilidade elétrica representa, portanto, uma grande mudança nas trajetórias de emissões no Brasil. Em **Salto Verde**, essa transformação se acelera, seguindo as tendências globais e impulsionada por uma infraestrutura elétrica robusta, como já mencionado. A mudança é muito mais lenta em **Terra Firme**.

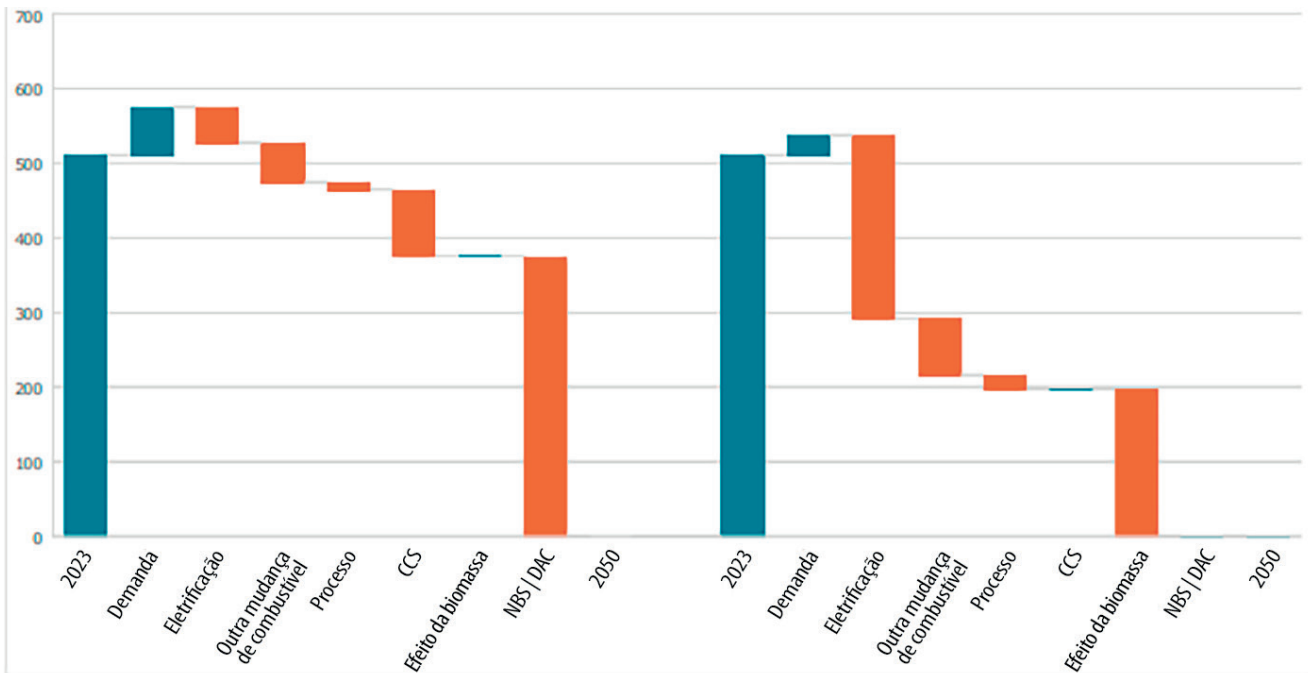
Cascata de CO₂ (MtCO₂/ano)

Figura iv – Cascata Global

A transição da mobilidade em **Salto Verde** também apresenta efeitos em cascata. A transição afeta tanto a demanda por combustíveis fósseis quanto a de biocombustíveis. A redução desta última implica que uma parcela significativa de terra fica livre da prática agrícola. O que acontecerá com ela vai além dos limites deste relatório. Certamente representa uma oportunidade para mais exportações agrícolas, para a produção de novos produtos químicos verdes e combustíveis sintéticos, que consideramos até certo ponto, principalmente em nossas projeções de atividade para produtos químicos. No entanto, se metade dessa terra fosse devolvida à natureza, estimamos que as emissões negativas associadas corresponderiam às 200 MtCO₂ por ano de emissões residuais. Nesse cenário, não haveria necessidade de desenvolver mecanismos alternativos de emissão negativa, como Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), Captura Direta do Ar (DAC) ou Soluções Baseadas na Natureza (NBS).

Por outro lado, em **Terra Firme**, as restantes 460 MtCO₂ por ano exigirão a implementação de soluções de emissão negativa, incluindo CCS (estimado em cerca de 90 MtCO₂ por ano), DAC e, mais importante ainda, NBS (Figura iv).

Felizmente, o potencial para Soluções Baseadas na Natureza (SbN) é grande no Brasil. Nosso relatório não explora como esse potencial poderia ser melhor aproveitado para a descarbonização. No entanto, ele supera em muito os volumes de emissões de carbono discutidos neste relatório. Portanto, poderia ser utilizado tanto para contribuir com a descarbonização da economia brasileira quanto para apoiar um esforço global de mitigação das mudanças climáticas.

Descarbonização por meio de inovação

Em suma, esses dois cenários apresentam resultados contrastantes. No entanto, eles se baseiam em um padrão comum: a significativa disponibilidade de energias renováveis no Brasil, que posiciona o país como uma **gigante em energias renováveis**. Aproveitar esse potencial, porém, é uma questão crucial que distingue os dois cenários.

Em **Terra Firme**, a defasagem na infraestrutura impede sua plena realização. A infraestrutura elétrica em desenvolvimento, porém limitada, essencialmente apóia a adoção de novos usos e serviços, sustentando a **crescente abundância**. Em **Salto Verde**, esse potencial é maximizado. O acesso a grandes volumes de eletricidade a preços acessíveis possibilita o desenvolvimento de uma indústria exportadora vibrante (notadamente de aço e produtos químicos), posicionando o país como uma **potência industrial verde**. Além desses novos usos e serviços, também transforma os usos e serviços existentes, substituindo combustíveis fósseis (eletificação da mobilidade) e biomassa (eletificação da mobilidade, modernização de equipamentos prediais e da pegada industrial) até certo ponto.

A substituição de combustíveis fósseis e biocombustíveis na mobilidade é particularmente importante para o formato da descarbonização no Brasil. As emissões relacionadas à mobilidade representam metade do total. Elas se estabilizam em **Terra Firme**, mas são divididas por três em **Salto Verde**. Além disso, a redução na demanda por biocombustíveis neste último libera terras cultivadas para outros usos. Modelamos que, se metade delas fosse devolvida à natureza, as emissões negativas associadas compensariam as emissões residuais do país, sem a necessidade de recorrer a outras medidas, como CCS, DAC ou outras Soluções Baseadas na Natureza (SBN).

Para concluir, ambos os cenários mostram que a descarbonização do Brasil é possível sem comprometer os padrões de vida. Esses cenários, como quaisquer outros, não são previsões. Esperamos, no entanto, que eles possam oferecer perspectivas originais e inovadoras sobre os futuros caminhos da energia e da descarbonização do Brasil.



Índice

Prefácio	2		
Apresentação da Enerdata	4		
Resumo Executivo	6		
Índice	12		
Lista de Tabelas e Figuras	14		
1. Porque esse relatório?			
Uma nova abordagem é necessária	16		
O ritmo das mudanças necessárias requer uma nova abordagem para a Transição da Energia	17		
2. Preparando-se para o futuro: em 2050 viveremos em um mundo diferente	20		
Transformações no Brasil nos últimos 20 anos	21		
Futuro dos serviços de energia do Brasil	21		
Dois cenários até 2050	25		
Premissas importantes	26		
		3. Maior abundância para todos	28
		A modernização dos ambientes residenciais	29
		Populações brasileiras com mais mobilidade	29
		Brasil Digital	29
		Implicações para a energia	29
		4. Potência Industrial Verde	34
		Crescimento do gigante de exportação de aço verde	35
		Crescimento significativo da indústria química verde	35
		Desenvolvimento de uma manufatura verde	37
		Implicações para a energia	37
		5. Gigante da Energia Renovável	40
		Voltado para uma economia elétrica moderna	41
		Um sistema de energia renovável moderno	42
		Necessidade de uma infraestrutura de hidrogênio verde	43



6. Força global para a descarbonização	44	Referências	70
Emissões residuais da economia brasileira	45	Livro fonte	59
Biomassa e restauração da terra	45	Aviso Legal	76
Atingir Emissão Líquida Zero pode ser mais viável do que pensamos	46	Autores	77
Brasil - sumidouro de carbono líquido para o mundo	47	Agradecimentos	77
7. Principais conclusões	48		
Cascata Global	49		
Descobertas importantes	49		
Limites e pesquisa adicional	51		
Anexo	54		
Modelo POLES e "módulo de demanda	55		
Níveis de atividade	60		
Resultados detalhados da simulação	63		

Lista de Figuras e Tabelas

Resumo executivo

Figura i – 12 Transformações nos serviços de energia	7
Figura ii – Demanda de energia final, por fonte	8
Figura iii – Jornada para Emissão Líquida Zero	9
Figura iv – Cascata Global	10
Tabela i – Energia e emissões no Brasil, dois cenários	8

Texto principal

Figura 1 – O sistema de energia dos EUA 1800 – 2019	18
Figura 2 – Transições em andamento, nos EUA	19
Figura 3 – 12 transformações nos serviços de energia	21
Figura 4 – Uma nova narrativa	25
Figura 5 – Atividade residencial	30
Figura 6 – Atividades em edifícios de serviço	30
Figura 7 – Atividades de mobilidade rodoviária (passageiros)	31
Figura 8 – Demanda de energia final para edifícios	31
Figura 9 – Demanda de energia para mobilidade por fonte	32
Figura 10 – Atividades siderúrgica	35
Figura 11 – Atividade de indústria química	36
Figura 12 – Atividade de outras indústrias	36
Figura 13 – Demanda de energia para a indústria	37
Figura 14 – Demanda de energia setorial (para a indústria de aço, químicas e outras indústrias)	38
Figura 15 – Demanda de energia final, por fonte	41
Figura 16 – Demanda de energia final, por setor	41
Figura 17 – Geração de Eletricidade	42
Figura 18 – Demanda por hidrogênio	43
Figura 19 – Emissões de CO2 (excluído AFOLU)	45
Figura 20 – Suprimento de Biomassa	46



Figura 21 – Jornada à Emissão Líquida Zero

47

Figura 22 – Cascata Global

49

Tabela 1 – Principais premissas

27

Tabela 2 – Resumo dos cenários

50

Anexo

Figura A1 – Visão geral do modelo POLES 55

Figura A2 – Modelo POLES, descrição estilizada do módulo de demanda estilizado 55

Figura A3 – Módulo de demanda, edifícios 56

Figura A4 – Módulo de demanda, mobilidade 57

Figura A5 – Módulo de demanda, indústria 59

Tabela A1 – Premissas diretas e indiretas no módulo de demanda 60

Tabela A2 – Evolução de atividade 61

Tabela A3 – Geração distribuída 62

Tabela A4 – Demanda de energia primária e final 64

Tabela A5 – Demanda de energia da indústria 64

Tabela A6 – Demanda de energia de edifícios, total 65

Tabela A7 – Demanda de energia, residencial 65

Tabela A8 – Demanda de energia de edifícios, serviços 66

Tabela A9 – Demanda de energia para a mobilidade 67

Tabela A10 – Demanda de energia de outros setores 68

Tabela A11 – Geração de energia 68

Tabela A12 – Emissões 69



Por que esse relatório?
Uma nova abordagem é
necessária

1

Por que esse relatório? Uma nova abordagem é necessária

O ritmo de mudança necessário exige uma nova abordagem para a Transição Energética.

Em 2021 e 2022, o IPCC publicou o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) completo[7], este relatório foi publicado oito anos após o anterior e integra as contribuições mais recentes para a ciência climática, mitigação das mudanças climáticas, caminhos de adaptação e questões relacionadas. E começa com uma afirmação clara, cuja franqueza é incomum em publicações científicas:

É inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra. Mudanças generalizadas e rápidas ocorreram na atmosfera, no oceano, na criosfera e na biosfera.

Após décadas de pesquisa sobre o impacto das atividades humanas nas mudanças climáticas e uma compreensão crescente dos efeitos naturais e dos ciclos de retroalimentação, a comunidade científica global agora considera inequivocamente que o aquecimento global atualmente observado é causado pelo homem. O ritmo da mudança também é sem precedentes e seu impacto provavelmente se materializará rapidamente. A janela de oportunidade está, portanto, se fechando. Resta pouco tempo para transformar nossa economia e nos prepararmos para uma adaptação inevitável, cuja extensão precisamos limitar ao máximo.

O IPCC avaliou que as emissões líquidas de dióxido de carbono devem ser zeradas até meados do século (com redução significativa de outros gases do efeito estufa). Esta é a meta a ser alcançada. Entretanto, existem vários impedimentos à rápida transição descrita pelo IPCC. Primeiro, muitas economias ao redor do mundo ainda não atingiram os níveis de riqueza e desenvolvimento de suas contrapartes industrializadas.

A demanda de energia per capita nos países de menor renda do mundo é dez vezes menor do que a das economias ricas, e o mundo ainda tem quase um bilhão de pessoas sem acesso a uma fonte moderna de energia, como a eletricidade. À medida que essas economias se desenvolvem e se integram ainda mais à rede global de trocas, sua demanda por energia aumentará. Além disso, a população global continuará a aumentar, em mais de dois bilhões de pessoas até 2050, impulsionando ainda mais o crescimento da demanda por energia, e isso ocorrerá em grande parte nessas economias [8].

Em segundo lugar, se transições ocorreram no passado, elas levaram de 60 a 70 anos para se materializarem completamente e se concentraram apenas em partes do sistema energético[9]. O que o IPCC descreve aqui é uma transição duas vezes mais curta e simultânea, uma empreitada que claramente não tem precedentes. Os efeitos de uma transição tão rápida na economia [9] são, portanto, uma preocupação importante e legítima. A questão de tornar essa transição “inclusiva” tem, portanto, ganhado destaque nos últimos anos, e a dificuldade em encontrar um caminho claro a seguir levou a muita hesitação pública.

Finalmente, as transformações climáticas já estão acontecendo. Ondas de calor extremo e incêndios florestais, inundações e secas são mais frequentes do que nunca e, com elas, surgem muitos novos problemas de adaptação que o mundo mal antecipou.

¹ Em comparação com os EUA, a Europa tem uma demanda energética per capita muito menor, mas a diferença continua significativa, em torno de 5 a 6 vezes.

Esta pesquisa é mais uma contribuição para esse esforço. Sua abordagem se diferencia e complementa outros estudos, pois se concentra na contribuição no “lado da demanda” do sistema energético para a descarbonização geral da economia, o que também é conhecido como serviços energéticos.

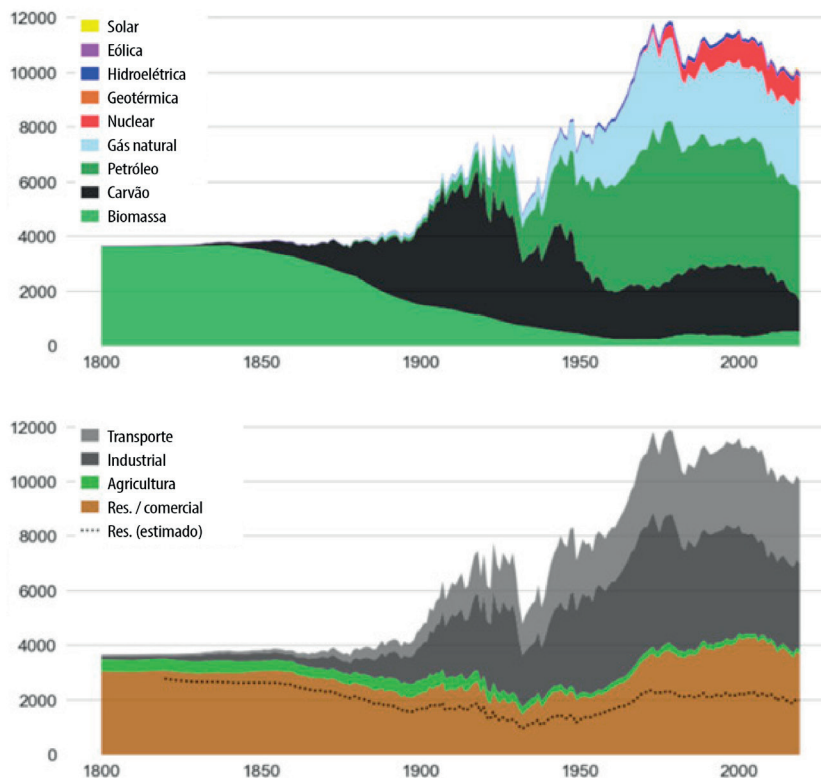
Essa nova abordagem exige maior foco nos serviços energéticos.

O paradigma tradicional na pesquisa energética é estudar a energia como um sistema, composto por estoques e fluxos físicos [10, 12] (recursos) e financeiros. Em grande medida, nosso atual sistema energético baseado em combustíveis fósseis se concentra na movimentação de recursos de um lugar para outro. Entretanto, e como é amplamente abordado no estudo das transições sociotécnicas, ou estudos de energias raras, a compreensão do desenvolvimento dos sistemas energéticos e suas transições subsequentes exige o estudo da energia em relação aos serviços que ela fornece à sociedade. Isso sugere [13, 24] que o sistema energético é mais do que um sistema (de estoques e fluxos), mas a complexa estratificação (ou espinha dorsal) de uma variedade de serviços energéticos em uma multiplicidade de sistemas sociotécnicos, dentro de uma variedade de geografias com diferentes padrões ambientais, econômicos, tecnológicos, institucionais e culturais. A energia alimenta os serviços, e a inovação na prestação desses serviços não é apenas produto de novos recursos e infraestrutura energética, mas também de avanços tecnológicos e de modelos de negócios adjacentes. Afinal, não enviávamos e-mails há 30 anos! Em última análise, essas inovações podem substituir um serviço existente, proporcionando uma experiência aprimorada ou acesso mais fácil a ele (por exemplo, a um custo menor), mas também podem fornecer novos serviços que ainda não existem. Essas inovações também podem ser incrementais ou radicais [25]. E, à medida que se desenvolvem, inevitavelmente impactam a demanda de energia de maneiras difíceis de prever a princípio. Vaclav Smil [26] argumenta que:

“No que diz respeito aos combustíveis, a história teria tomado um rumo diferente se o carvão tivesse sido usado meramente como substituto da madeira emlareiras abertas, ou se o petróleo bruto tivesse permanecido limitado ao querosene para iluminação. Na maioria dos casos, não foi o acesso a recursos energéticos abundantes ou a motores primários específicos que fez a diferença a longo prazo. Os fatores decisivos foram, antes, a busca por inovação e o compromisso com a implantação e o aperfeiçoamento de novos recursos e técnicas e a descoberta de novos usos.”

Isso também é o que o estudo das transições energéticas passadas demonstrou detalhadamente [9, 26-30]. As Figuras 1 e 2 reproduzem, notavelmente, a análise de longo prazo da história das transições energéticas nos EUA desde 1800 [30]. O carvão começou a ser usado em aplicações industriais e ajudou a impulsionar o desenvolvimento industrial do país, antes de chegar aos lares (como substituto da lenha para aquecimento e cozinha) graças ao desenvolvimento das ferrovias (após a Guerra Civil), que possibilitou o acesso em massa a essa nova fonte de energia. O carvão foi então substituído pelo petróleo para transporte com o advento dos automóveis particulares, depois pelo gás para uso doméstico e aquecimento industrial após a Segunda Guerra Mundial, devido às preocupações com a poluição nas cidades, bem como pela eletricidade, que também levou a uma gama totalmente nova de serviços (por exemplo, eletrodomésticos).

Tudo isso fornece evidências inovadoras de que as transições energéticas são impulsionadas principalmente pelo desenvolvimento complexo de como a energia é realmente usada. A oferta de energia acompanha os padrões de consumo existentes ou novos.



As transições levam tempo porque novas fontes de energia geralmente exigem nova infraestrutura e porque novos padrões de uso surgem apenas quando a economia faz sentido, e não em todos os setores ao mesmo tempo. E essas transições tendem a se sobrepôr ao longo do tempo, à medida que mais inovação leva a novas melhorias em uma variedade de serviços.

Existe uma razão óbvia para esse processo de mudança: a humanidade busca riqueza e abundância. Isso pode assumir múltiplas formas, mas, em última análise, novas fontes de energia só são úteis na medida em que proporcionam novos meios para atingir esse objetivo. Então, a adoção se acelera e o sistema energético (a forma como a energia é fornecida ao consumo) se transforma.

Já podemos prever três consequências críticas disso:

Em 2050, viveremos em um mundo diferente. Os padrões de consumo continuarão a evoluir no médio prazo, impulsionados pela inovação e por novos comportamentos. O sistema futuro será diferente do atual, assim como o atual difere do passado. A adoção de novos usos de energia será o principal motor da rápida transformação. No contexto atual, em que uma transição global deve ocorrer na metade do tempo que as transições tradicionais levam para se concretizar, um foco renovado na “demanda” do sistema energético é, portanto, mais importante do que nunca. O desenvolvimento de uma nova infraestrutura de fornecimento para alimentar esses padrões de consumo em evolução será fundamental na corrida para uma economia com emissões líquidas zero até 2050.

Seguindo essa linha de raciocínio, estudar as evoluções do sistema energético apenas do ponto de vista de estoques e fluxos impediria a compreensão dos mecanismos reais em jogo. A evolução dos sistemas energéticos a partir do desenvolvimento de serviços novos ou da melhoria dos serviços existentes é inevitável.

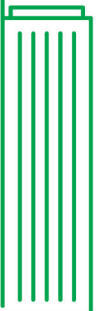
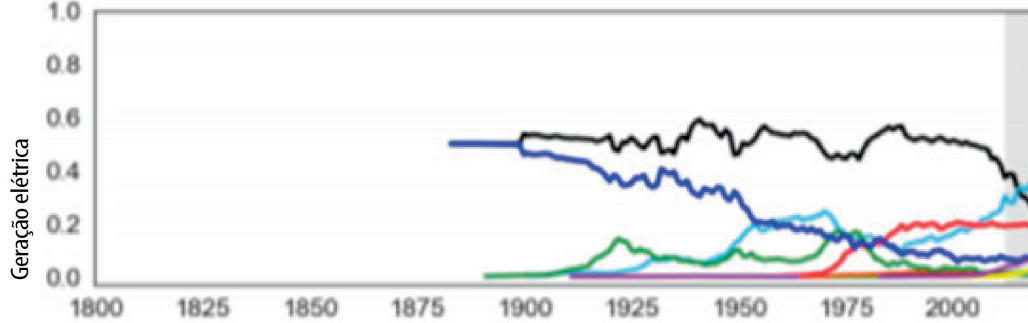
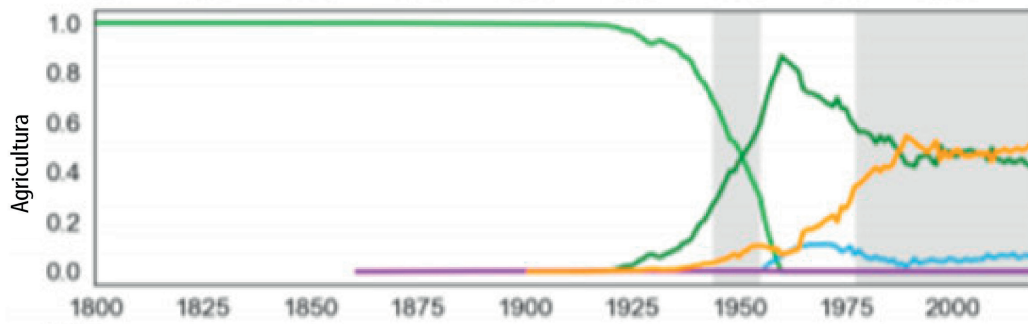
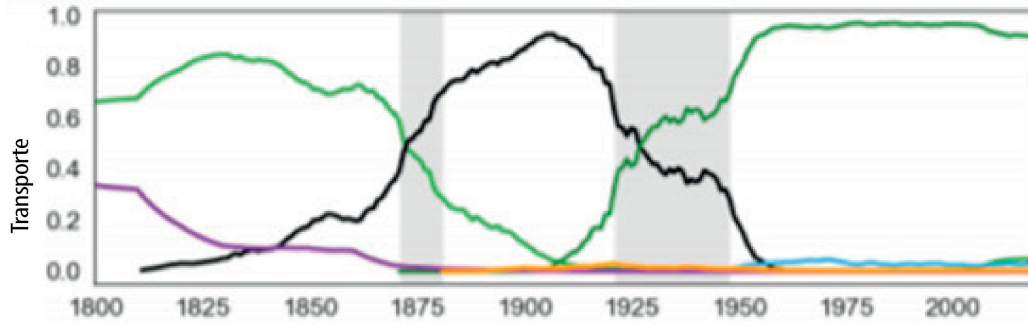
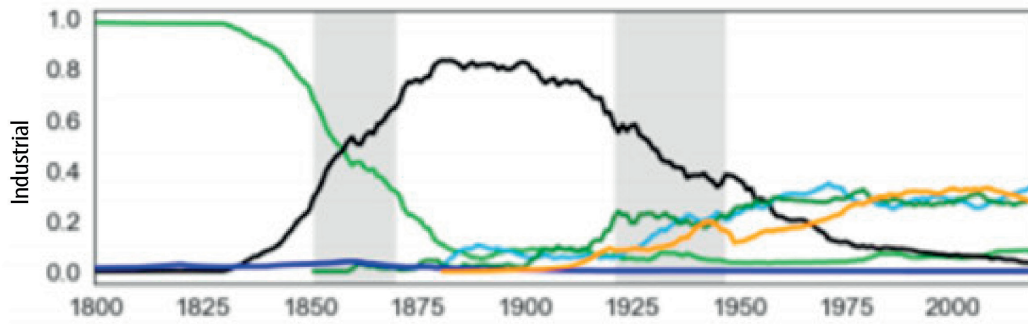
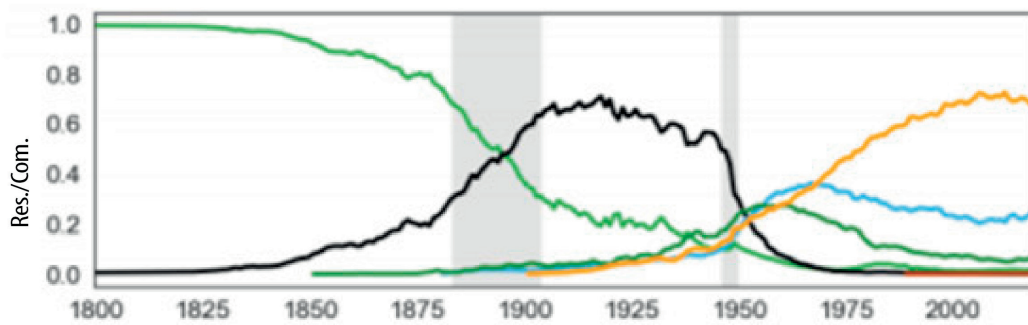
Assim, fomentar uma transição do atual “sistema” energético exige, principalmente, agir sobre esses serviços para transformar a demanda por energia em direção a uma nova forma de fornecimento, um tópico crítico ao se considerar o imperativo moderno de mitigar rapidamente (e, em última instância, zerar) as emissões relacionadas à energia.

Indo um passo além, estudar os futuros serviços energéticos implica em desafios importantes a serem resolvidos. Um deles é a dos limites temporais que entram em conflito entre os atores, uma questão particularmente importante quando se trata de infraestrutura energética e de como as escolhas passadas podem “consolidar” mudanças sociais, o que é frequentemente chamado de dependência da trajetória [31-34]. Outra questão gira em torno dos aspectos multidimensionais das mudanças no sistema energético. Como as evoluções do sistema energético se aplicam a múltiplos sistemas sociotécnicos, elas são frequentemente associadas a “transições profundas” [35-36]. Finalmente, uma última questão tem a ver com o equilíbrio adequado entre a implementação de um novo sistema e a eliminação gradual do existente, o que muitas vezes se mostra um processo errático.

O relatório a seguir, portanto, explora como uma variedade de inovações e mudanças comportamentais provavelmente transformarão o sistema energético no futuro; como algumas dessas transformações se mostram altamente positivas para a mitigação das mudanças climáticas e devem ser aceleradas, enquanto outras exigem atenção significativa, pois têm o potencial de prejudicar nosso esforço coletivo global para zerar as emissões de GEE até meados do século. Baseia-se e inspira-se no trabalho limitado, porém fascinante, já realizado por outros [9, 17, 37-39].

Esperamos que este esforço, apesar de suas imperfeições, seja uma contribuição perspicaz para os debates em questão.





Preparando-se para o futuro:
em 2050 viveremos em um
mundo diferente

2



Preparando-se para o futuro: em 2050 viveremos em um mundo diferente

Transformação do Brasil nos últimos 20 anos

O desenvolvimento econômico do Brasil nas últimas décadas tem sido significativo, com um aumento de 34% no PIB per capita desde 2000, enquanto a população cresceu 23%.

A produção industrial aumentou e mudou significativamente em sua natureza, com um aumento notável de 50% na produção da indústria de transformação e mineração (ver Tabela A5) e uma participação de indústrias mais tradicionais (por exemplo, aço) em declínio na produção total.

As condições de vida também melhoraram, com a área residencial per capita aumentando de 11 m²/capita em 2000 para 14 m²/cap em 2025, um aumento significativo, resultando em um aumento total do estoque de edifícios de 2,5 bilhões de m² para 3,8 bilhões.

A penetração de sistemas de ar condicionado passou de praticamente zero para um em cada três lares e um em cada dois edifícios comerciais (ver Tabela A5).

A mobilidade, um forte indicador de desenvolvimento econômico e oportunidades, triplicou em termos per capita, de cerca de 2.200 km por ano e per capita para mais de 6.000 km atualmente (ver Tabela A5).

Apesar de um crescimento dos indicadores mais lento na década de 2010 do que na primeira década do século, um fenômeno global, o Brasil está pronto para abraçar e assumir um papel de liderança na nova onda de inovação e crescimento que está sendo implementada globalmente.

Futuro dos serviços de energia do Brasil

Em 2050, viveremos em um mundo diferente

Este relatório se baseia em um exercício anterior – “De volta a 2050, 1,5 é mais viável do que pensamos” – desenvolvido em 2021 [40]. Reproduzimos aqui brevemente a abordagem que adotamos neste exercício inicial, que orienta nosso trabalho atual sobre o Brasil.

Dois tendências contribuirão para a evolução dos serviços de energia existentes em direção a novas formas de serviços semelhantes ou a novos serviços ainda não inventados. A primeira delas decorre do desenvolvimento tecnológico. O início do século XXI pode ser considerado, sem dúvida, uma das eras mais dinâmicas da inovação tecnológica, comparável às revoluções industriais de meados ao final do século 19 (fabricação de aço, fertilizantes nitrogenados, ferrovias, telégrafos, automóveis, etc.). A inovação tecnológica moderna se baseia em três áreas fundamentais de pesquisa: tecnologias digitais, nanotecnologias e biotecnologias, e novas tecnologias energéticas (notadamente a solar, mas também novas formas de armazenamento de energia, etc.). Esses novos desenvolvimentos se complementam, pois também são interdependentes. O surgimento de novas nanotecnologias e biotecnologias teria sido impossível sem o desenvolvimento das tecnologias digitais, e as novas tecnologias energéticas dependerão em grande parte dos avanços em nanotecnologias e biotecnologias, mas também das capacidades dos controles digitais. O que essas tecnologias também têm em comum é que todas são infinitamente escaláveis (fabricação em massa de produtos “simples”), altamente distribuídas (próximas aos centros de consumo e possivelmente canalizadas por meio de redes de distribuição tradicionais) e, mais importante, apresentam taxas de retorno crescentes (quanto mais a tecnologia se desenvolve, menores os preços). O advento desses três domínios tecnológicos com características tão diferentes do sistema existente também sugere uma grande oportunidade para inovação em direção a novas maneiras de fornecer serviços existentes e o surgimento de serviços totalmente novos; em suma, uma transição profunda, ou “radical”, que também poderia ser denominada como o surgimento de um novo “projeto dominante”.

1 Os painéis solares são um bom exemplo, mas o já conhecido efeito plataforma e o efeito multiplicador de custos marginais zero no mundo da internet também são um caso óbvio.

2 Quando um painel solar instalado chega ao fim de sua vida útil, ele é substituído por um novo com propriedades aprimoradas. Em resumo, o potencial de geração de energia é aumentado, em forte contraste com os combustíveis fósseis, cujos campos se esgotam naturalmente a uma taxa anual de 3 a 4%.

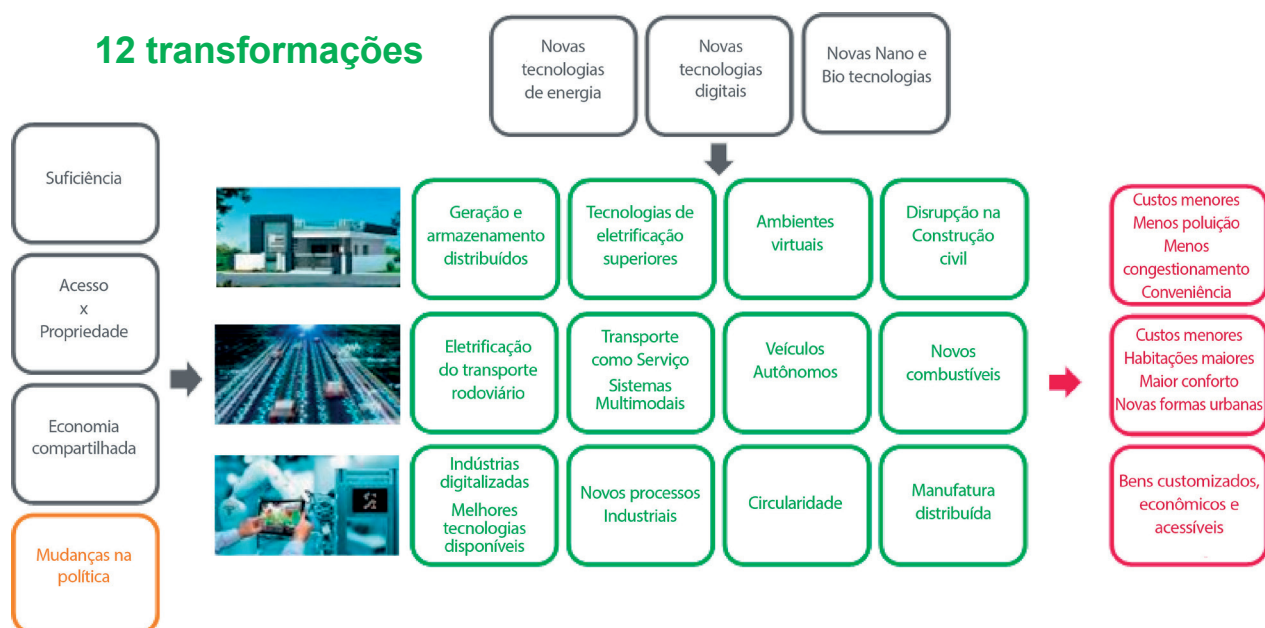


Figura 3 – 12 transformações de serviços de energia

em suma, uma transição profunda, ou “radical”, que também poderia ser denominada como o surgimento de um novo “projeto dominante” [9, 41].

A segunda transformação fundamental é a da mudança geracional natural (mas importante) em curso. À medida que as novas gerações (geração Z, alfa, beta, etc.) assumem responsabilidades, elas também influenciarão e transformarão a formulação de políticas globais e regionais, bem como os fundamentos de nossos cenários socioeconômicos. Embora a pesquisa sobre a geração Z esteja bem documentada, a das gerações seguintes está apenas começando a surgir. O que podemos afirmar, no entanto, é que as gerações futuras podem ser mais empreendedoras e individualistas, bem como mais comprometidas com a resolução de problemas globais do que as que as precederam [40]. E essas características necessariamente influenciarão fortemente a reformulação dos comportamentos do consumidor, da inovação e dos contextos políticos.

A combinação de um novo conjunto de ferramentas de inovação e diferentes apetites geracionais levará à transformação dos serviços de energia. A amplitude dessas mudanças até 2050 (e seus efeitos em rede) é provavelmente impossível de capturar exaustivamente, principalmente ao se levar em conta possíveis fatores exógenos que podem alterar seu curso. De fato, este é um problema não apenas complexo, mas também complicado e possivelmente irreduzível (Andersson et al., 2014).

Portanto, tal exercício deve ser considerado como uma exploração inicial do “possível”. Embora algumas das transformações detalhadas abaixo possam ser óbvias para todos, a extensão e o ritmo de seu desenvolvimento também podem ser questionados,

daí a necessidade de explorar o que é “plausível”. Após uma análise cuidadosa, selecionamos 12 transformações principais para focar (Figura 3).

Em conjunto, essas transformações pintam uma nova narrativa de como o futuro poderá ser, um futuro de maior abundância.

Ambiente urbano - Cidades

Um dos principais desenvolvimentos na construção civil é a inevitável digitalização dos nossos ambientes de vida. Essa tendência desencadeará uma série de novas atividades, algumas das quais já começaram a surgir (home office, compras online, etc.). Tal transformação, dependendo do seu grau de desenvolvimento, poderá também redefinir as expectativas tradicionais sobre a evolução da área construída: mais tempo passado em casa, aumento da necessidade de espaço residencial e diminuição das áreas destinadas a certas atividades comerciais. A digitalização dos nossos ambientes de vida também permitirá maior acesso a serviços e maior flexibilidade no seu consumo.

A digitalização também deverá permear o setor da construção civil, uma indústria que obteve ganhos de produtividade limitados nas últimas décadas, sendo, portanto, suscetível a transformações radicais [42, 43]. Existe um potencial significativo. 15% dos materiais são desperdiçados na construção civil, a superespecificação normalmente leva a um aumento de 20 a 30% no fornecimento de materiais, e projetos construtivos avançados e abordagens modulares poderão oferecer benefícios ainda maiores [44, 45].



Isso poderia ter impactos significativos nas diversas indústrias que fornecem materiais para a construção [44, 45] (aço, cimento, tijolos, vidro, plásticos, etc.). Uma transformação significativa na produtividade da indústria da construção também poderia levar à redução dos custos de habitação, uma nova forma de abundância que poderia contribuir para o aumento dos padrões de vida.

Em seguida, surge o crescimento da geração (e armazenamento) distribuído. Um estudo da BloombergNEF [46] mostrou como essas soluções se tornarão (se já não o são) economicamente atraentes em todas as regiões do mundo na próxima década, tornando sua implantação praticamente inevitável. Embora o armazenamento seja frequentemente uma questão fundamental, é preciso reconhecer que o armazenamento de energia pode assumir múltiplas formas, algumas delas já disponíveis a custos marginais próximos de zero em ativos prediais (por exemplo, reservatórios de água, baterias de veículos elétricos, etc.) e, obviamente, cada vez mais viável por meio da infraestrutura digital emergente (que também pode ajudar a otimizar o consumo de energia em tempo real, Petit [47]).

O fornecimento de energia com custo marginal próximo de zero não só proporcionaria maior abundância, como também poderia desencadear novas transformações na demanda de energia em

edifícios, rumo a uma maior eletrificação (notadamente para climatização e cozimento), cuja extensão ainda precisa ser confirmada.

Ambiente urbano - Mobilidade

A mobilidade das pessoas é um indicador-chave do desenvolvimento global. A acessibilidade continua sendo um critério fundamental. Nesse sentido, a eletrificação da mobilidade parece promissora. BloombergNEF [48] estima que os veículos elétricos alcancem a paridade de custos antes de 2030 globalmente, com algumas regiões chegando lá antes de outras, enquanto os custos continuarão a cair ao longo do tempo. De fato, os veículos elétricos são, por natureza, menos caros, já que possuem 100 vezes menos peças em sistemas de propulsão elétrica, e os motores elétricos têm rendimentos de 3 a 4 vezes maiores que os dos carros a gasolina [49]. Com o tempo, eles serão, portanto, menos caros para comprar, menos caros para operar e menos caros para manter. O progresso tecnológico também sugere que a autonomia dos veículos elétricos poderá até mesmo superar a dos carros tradicionais dentro de alguns anos [50]. A expansão simultânea da infraestrutura elétrica, particularmente fora das cidades, será, no entanto, crucial para viabilizar esse desenvolvimento.

Uma segunda transformação a ser considerada é a da mobilidade como serviço. Ela inclui tanto o desenvolvimento de serviços públicos, muito desiguais entre os locais, quanto novos bem como novos modelos de negócios agora disponíveis graças à digitalização da economia.

¹ Isso sem levar em conta futuras inovações nos próprios materiais.





A mobilidade como serviço tem o potencial de melhorar significativamente o estilo de vida e as experiências das pessoas, principalmente nas cidades onde os problemas de congestionamento e poluição são prevalentes. Entretanto, ela deve depender do desenvolvimento da infraestrutura e, mais importante, de uma espinha dorsal digital eficiente para permitir uma experiência perfeita. Com o tempo, os veículos autônomos também poderão surgir e agregar valor significativo a esse desenvolvimento. Diversas fontes estimam que a mobilidade autônoma como serviço pode reduzir os custos de mobilidade de 5 a 10 vezes [51, 52]. As fontes divergem quanto ao momento, mas devesse acontecer antes de 2040 [53, 56]. Além disso, pode depender menos do desenvolvimento tecnológico do que de regras de trânsito adequadas que minimizem as interações entre a condução humana (altamente imprevisível) e a condução de máquinas (altamente previsível).

Outros vetores de mobilidade (aviação, transporte marítimo) provavelmente seguirão uma trajetória diferente. Menos interações físicas (devido à conectividade remota) e maior flexibilidade no trabalho irão remodelar o apetite e a necessidade de viagens das futuras gerações, sejam elas por motivos pessoais ou profissionais. Os avanços na automação e nas tecnologias digitais podem remodelar a presença industrial global em direção a uma maior localização. É também menos provável que esses modos de transporte dependam da eletrificação nesta fase (ou apenas parcialmente), mas sim do desenvolvimento de novos combustíveis, o que provavelmente resultará de grandes mudanças políticas e inovação.

Indústria

A digitalização da nossa economia também permeará o setor industrial, como já começou. Já está bem estabelecido que essas novas tecnologias oferecem um recurso fundamental para os níveis decrescentes de produtividade [57, 58].

Um estudo quantitativo mostrou que – no caso do setor automotivo, um dos setores já mais automatizados – a implantação de tecnologias digitais pode levar à duplicação do retorno sobre o capital empregado (ROCE) e da rentabilidade, e aumentar a utilização das fábricas em mais de um terço [59]. Elas também serão cruciais para acelerar a adoção das Melhores Tecnologias Disponíveis (MTD). Vários estudos e exemplos práticos demonstraram o potencial para otimizar significativamente a demanda de energia e recursos [60-64]. Os benefícios podem variar entre 10% e 20% em todos os setores e indústrias, com o desenvolvimento de tecnologias de ponta ajudando a elevar essas economias para 35% ou mais, com retornos altamente competitivos. Portanto, as indústrias demonstram um potencial significativo para continuar aprimorando a eficiência de suas operações no futuro, e as tecnologias digitais desempenharão um papel crucial para que isso aconteça.

Além de um melhor desempenho, os processos industriais também provavelmente evoluirão, impulsionados principalmente pela corrida em direção à descarbonização e à inovação associada. A redução direta de ferro, o cimento com baixo teor de clínquer, novas técnicas de mineração ou materiais alternativos e sintéticos ou bioquímicos estão todos na agenda [65]. Essas transformações não envolverão apenas as indústrias pesadas, mas toda a gama de atividades de manufatura. Alguns estudos também mostraram um potencial para a mudança competitiva para a eletrificação, bem acima de 80% na maioria dos setores [66, 67]. Frequentemente, verifica-se que a eletrificação dos processos industriais traz benefícios adicionais em termos de flexibilidade operacional e qualidade do produto final [68-70]. A eletrificação dos processos industriais é, portanto, uma perspectiva promissora, especialmente quando combinada com um recurso de eletricidade cada vez mais acessível e abundante.

A manufatura aditiva também poderá emergir nas próximas décadas como um novo paradigma para a indústria.

É uma tecnologia bem conhecida, utilizada há muito tempo para prototipagem industrial. Nos últimos anos, porém, sua aplicação se expandiu para uma gama completa de novos usos (fabricação de peças de reposição, projetos específicos de máquinas, construção e bens de consumo). Uma limitação fundamental de sua aplicação até o momento tem sido a falta de infraestrutura digital para compartilhar ferramentas e recursos de projetos em larga escala. Isso mudou e continuará a melhorar nas próximas décadas. À medida que se materializa, poderá reorganizar os setores onde faz mais sentido (baixas quantidades, altamente personalizáveis), dar origem a ambientes de produção mais distribuídos e possivelmente levar a efeitos de rebote não antecipados. [71, 80]

Finalmente, o surgimento da circularidade também poderá desempenhar um papel mais significativo do que o frequentemente projetado. Além das mudanças climáticas e da degradação ambiental, a dependência de recursos poderá ser fundamental para reavaliar a melhor forma de usar e reutilizar (ou reciclar) os recursos disponíveis, especialmente em um contexto de rápido crescimento da demanda. Isso poderá ser ainda mais facilitado por novas tecnologias digitais, rastreabilidade das cadeias de suprimentos, melhores projetos de produtos e novos modelos de negócios orientados a serviços. Alguns estudos demonstraram que há valor econômico na adoção de abordagens circulares e que, em última análise, isso aumentará a produtividade e a diferenciação [81, 82]. O sistema industrial também será impactado por efeitos de rede decorrentes da evolução da demanda por edifícios e mobilidade (por exemplo, menos matérias-primas na construção devido a uma indústria mais produtiva). Esses efeitos podem, na verdade, ser cruciais para mitigar os problemas inerentes de disponibilidade associados ao rápido desenvolvimento econômico (oferta insuficiente).

A Figura 4 resume esta perspectiva de futuros possíveis e plausíveis, descrevendo, em linhas gerais, como esta nova narrativa se desenrola em diferentes setores de atividade e como esta variedade de transformações está interconectada.

Dois cenários até 2050

Um conjunto de cenários

Os serviços de energia se transformarão necessariamente até 2050, e seu impacto ainda não foi totalmente compreendido. Seleccionamos 12 dessas transformações, visto que nossa análise sugere que elas são as mais propensas a se desenvolver no médio prazo e, portanto, terão um impacto essencial no sistema energético. O ritmo e a extensão em que elas se desenvolverão efetivamente permanecem, no entanto, uma incerteza fundamental.

Como vimos ao longo da parte anterior, a espinha dorsal de muitas dessas inovações é a disponibilidade de grandes quantidades de eletricidade a preços acessíveis. Consideramos, portanto, neste exercício, dois cenários que diferem fundamentalmente quanto ao estado futuro da infraestrutura elétrica. No primeiro cenário, **Terra Firme**, a expansão da infraestrutura elétrica permanece limitada, devido a restrições econômicas, geográficas e institucionais. Como resultado, as inovações descritas acima penetram lentamente na economia brasileira. No segundo cenário, **Salto Verde**, essas barreiras e restrições são ativamente superadas, levando a uma adoção mais rápida de novos serviços de energia.

Modelagem dos cenários

Utilizamos o modelo POLES da Enerdata para executar esses dois cenários. O POLES é um modelo de equilíbrio parcial, com cobertura global, para projeções de longo prazo de energia e emissões de GEE até 2070.

Como muitos modelos, as hipóteses disponíveis sobre a demanda já oferecem uma ampla gama de possibilidades, mas não são suficientemente detalhadas para integrar as mudanças complexas na estrutura das atividades econômicas que identificamos acima. Assim, foi desenvolvido um “módulo de demanda” específico, que avalia exogenamente a evolução das tendências dos parâmetros-chave e as reinsere no modelo central do POLES.



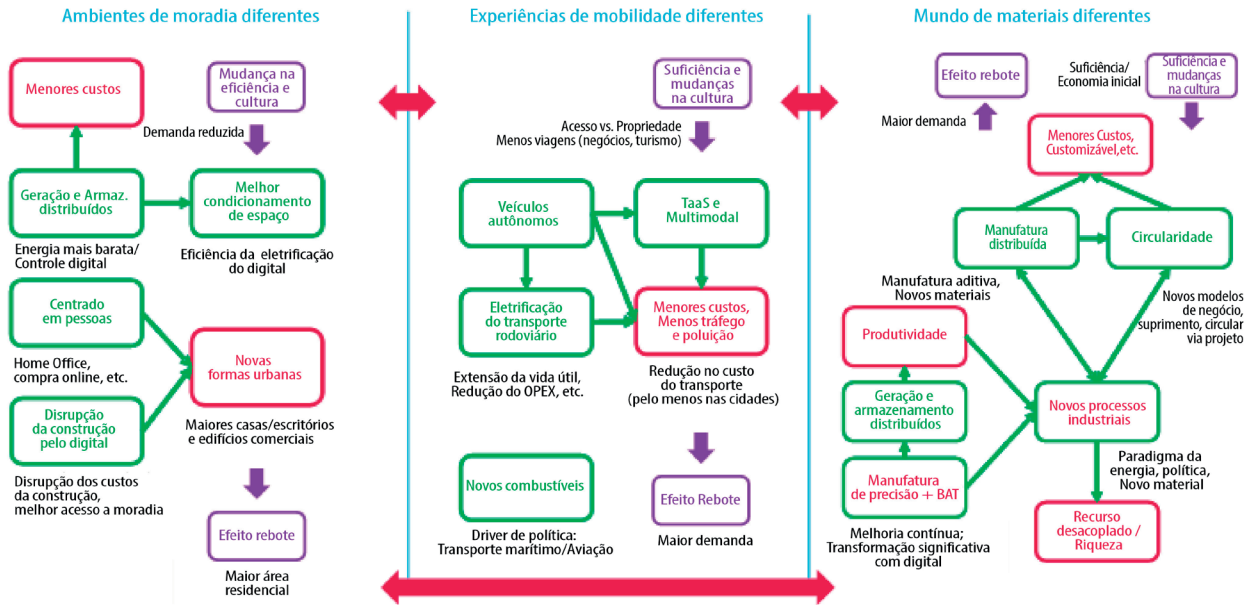


Figura 4 – Uma nova narrativa

Algumas são, na verdade, entradas diretas já disponíveis no POLES. Outras não estão disponíveis e, portanto, representam “valores-alvo” que são alcançados nos resultados do modelo por meio de extensa calibração. Algumas entradas têm impactos essenciais sobre outras, e esses efeitos de “interação” também são levados em consideração. Uma descrição detalhada do módulo de demanda está disponível no anexo.

Principais premissas

A Tabela 1 apresenta uma visão geral dos principais pressupostos feitos em ambos os cenários e para cada transformação modelada.

Mais detalhes disponíveis no anexo.

Tabela 1 – Principais premissas

Principais premissas	Terra Firme	Salto Verde
Edifícios		
Geração distribuída	Potencial estimado em meados do século é cerca de 250 TWh 80% do potencial realizado até 2050 (devido à baixa disponibilidade da rede elétrica e preços elevados da eletricidade)	Potencial estimado em meados do século é cerca de 250 TWh 50% do potencial realizado até 2050
Tecnologias superiores de eletrificação	70% do parque predial equipado com AC até 2050, e o AC é 25% mais eficiente do que atuais 20% do cozimento será elétrico 70% do aquecimento de água será elétrico Eletrodomésticos serão 30% mais eficientes	Praticamente todo o parque predial equipado com AC até 2050, e o AC é 50% mais eficiente do que atuais 90% do cozimento será elétrico 90% do aquecimento de água será elétrico Eletrodomésticos serão 50% mais eficientes
Ambientes virtuais	Haverá 20% a menos de escritórios comerciais e 30% menos de centros de varejo que o esperado na linha de referência (continuação de tendências atuais) devido a digitalização das práticas	Haverá 70% a menos de escritórios comerciais e 30% menos de centros de varejo que o esperado na linha de referência (continuação de tendências atuais) devido a digitalização das práticas
Disrupção na construção	Eficiência de novas construções melhora naturalmente Nenhum esforço significativo em reformas Superfície residencial per capita aumenta em 50% até 2050	Eficiência de novas construções melhora naturalmente com novas construções 40% mais eficientes vs. a linha de referência em 2050 Nenhum esforço significativo em reformas Superfície residencial per capita aumenta em 100% até 2050
Mobilidade		
Eletrificação do transporte rodoviário	Até 2030, 10% da venda de veículos privados será de BEVs, atingindo 50% em 2050. Em ônibus a participação será de 30% até 2050, caminhões 20% em 250	Até 2030, 30% da venda de veículos será de BEVs, atingindo 100% em 2040 (veículos leves) ou 2050 (caminhões)
Transporte como Serviço e veículos autônomos	PKM per capita aumenta 40% até 2050 Ocupação de passageiros por veículo cai de 1,3 até 2050 (de 1,8 em 2023) Carros permanecem o modo preferido de transporte rodoviário para passageiros	PKM per capita aumenta 25% até 2050 Ocupação de passageiros por veículo permanece estável em 2050 Carros permanecem o modo preferido de Modos de transporte rodoviário público são criados para cidades e vizinhanças, mesmo se carros privados permanecer o modo primário de transporte
Sector de aviação e marítimo	40% do transporte aéreo e marítimo alimentado por biocombustíveis ou e-combustíveis (ecológicos) até 2050, biocombustíveis principalmente para aéreo, e-combustíveis primariamente para porões de embarcações	70-80% do transporte aéreo e marítimo alimentado por biocombustíveis ou e-combustíveis até 2050, biocombustíveis principalmente para aéreo, e-combustíveis primariamente para porões de embarcações
Indústria		
Melhores tecnologias digitais disponíveis	Aço: intensidade da energia cai 15% até 2050: processos mais eficientes e pegada de carbono modernizada. Minerais: intensidade da energia cai 5% Ind. química: intensidade da energia cai 10% (impulsionada por modernização e parte em nível de eletrificação, inclusive reciclagem) Manufatura: intensidade da energia cai 10-20% (impulsionada principalmente por modernização e eletrificação, a proporção depende do setor considerado).	Aço: intensidade da energia cai 15% até 2050: processos mais eficientes e pegada de carbono modernizada. Minerais: intensidade da energia cai 5% Ind. química: intensidade da energia cai 20% (impulsionada por modernização e eletrificação, inclusive reciclagem) Manufatura: intensidade da energia cai 20-30% (impulsionada principalmente por modernização e eletrificação, a proporção depende do setor considerado).
Novos processos industriais	Aço: a produção de aço expande 2,7 vezes até 2050. O DRI representa 100% de novas construções de 2040 em diante Minerais: Produção de cimento expande 40% até 2050, sem mudanças significativas nos processos Ind Química: a produção expande 40% até 2050. Modernização e eletrificação da área: eletricidade atinge 40% da demanda final Manufatura: produção da mineração aumenta 50%, produção automotiva aumenta 3 vezes, outras indústrias aumento de 15%. Modernização e eletrificação da área: a eletricidade atinge 35% da demanda final de energia	Aço: a produção de aço expande 4 vezes até 2050. O DRI representa 100% de novas construções de 2030 em diante Minerais: Produção de cimento expande 60% até 2050, sem mudanças significativas nos processos Ind Química: a produção expande 50% até 2050. Modernização e eletrificação da área: eletricidade atinge 85% da demanda final Manufatura: produção da mineração aumenta 50%, produção automotiva aumenta 2,5 vezes, outras indústrias aumento de 20%. Modernização e eletrificação da área: a eletricidade atinge 80% da demanda final de energia
Circularidade	Demanda da Construção e Mobilidade aumenta procura por aço e cimento, melhorias na prática de construção otimizam a demanda em 5% Pequeno desenvolvimento na reciclagem de aço, cimento e plásticos	Demanda da Construção e Mobilidade aumenta procura por aço e cimento, melhorias na prática de construção otimizam a demanda em 10% Pequeno desenvolvimento na reciclagem de aço e cimento porém solidas políticas em vigor na substituição e reciclagem de plásticos Modelos como serviço para máquinas criam e otimizam a demanda em 10% até 2050
Manufatura distribuída	Sem premissas	Sem premissas

Mais abundância
para todos

3



Mais abundância para todos

As inovações tecnológicas e sociais mencionadas acima têm o potencial de contribuir significativamente para a transformação e melhoria dos padrões de vida.

A modernização dos ambientes de moradia

A virtualização dos ambientes de vida, a modernização dos eletrodomésticos, o aumento da geração distribuída e da eletrificação, e a evolução dos ambientes urbanos apontam para mudanças significativas na forma como as pessoas vivem e nos edifícios que abrigam suas atividades (Figuras 5 e 6).

A falta de infraestrutura elétrica limita a digitalização da economia no cenário **Terra Firme** comparado com Salto Verde), daí vários dos seus efeitos em cascata mencionados acima. Como consequência, se o estoque de residências aumentar rapidamente em ambos os cenários, a aceleração é mais perceptível em **Salto Verde**.

A área residencial per capita aumenta 50% em **Terra Firme**, de 14 m² per capita para 21 m² e dobra em **Salto Verde** para 28 m². Essa proporção permanece abaixo dos níveis médios da Europa como ponto de comparação [83] e, portanto, é potencialmente conservadora. Representa, no entanto, um aumento significativo.

A penetração do ar condicionado aumenta em ambos os cenários. Enquanto se torna um serviço universal em **Salto Verde**, atinge apenas 70% em **Terra Firme**, novamente devido às limitações da infraestrutura elétrica. Uma variedade de eletrodomésticos também é convertida ao longo do tempo para sistemas elétricos mais modernos e eficientes, incluindo aquecimento de água e fogões. Essa modernização de eletrodomésticos é novamente mais limitada em **Terra Firme**.

A digitalização dos serviços leva a uma estagnação do estoque de edifícios de serviços, à medida que mais desses serviços são fornecidos remotamente. Esses edifícios, no entanto, passam por renovação e modernização progressivas, com padrões semelhantes de eletrificação e digitalização.

Uma população brasileira mais móvel

mobilidade per capita é outro indicador crítico de prosperidade, acesso a oportunidades individuais e desenvolvimento econômico e social em geral. O aumento da mobilidade no Brasil já foi uma conquista significativa nos últimos 20 anos. Espera-se que esse aumento continue até 2030 e, em seguida, se estabilize. A razão para essa estabilização é uma saturação progressiva das necessidades, dada a maior organização dos ambientes urbanos (notadamente em **Salto Verde**) e uma digitalização substancial da economia, levando a menos necessidades de deslocamento e maiores recursos para entregas online (Figura 7). A título de comparação, estabiliza-se em níveis semelhantes aos da Espanha moderna, embora todos os indicadores em toda a União Europeia apontem para uma queda progressiva da mobilidade per capita [84].

A logística mais do que duplicou nos últimos 20 anos. Espera-se que continue a crescer, a um ritmo semelhante ao observado nas últimas décadas, ajustado ao crescimento populacional. As necessidades de mobilidade também são cada vez mais satisfeitas por sistemas modernos. Os veículos elétricos surgem como uma opção fundamental para um transporte mais acessível e conveniente, à medida que se tornam mais acessíveis para compra (já são mais acessíveis para operar) por volta de 2030 [48].

A penetração de veículos elétricos (VE) acelera, como acontece globalmente. Embora essa aceleração seja rápida em **Salto Verde**, ela é mais limitada em **Terra Firme**, devido à infraestrutura elétrica defasada e às barreiras institucionais. Como consequência, os VEs representam 32% das vendas de veículos leves em 2030 em **Salto Verde**, mas apenas 11% em **Terra Firme**. Em 2040, essas taxas atingem, respectivamente, 20% e 100%. Em 2050, 48% e 100%. Essa transformação é complementada por uma baixa participação do transporte público nas cidades, aumentando ligeiramente mais em **Salto Verde**.

Brasil digital

A infraestrutura digital do Brasil está entrando em um ciclo de expansão no qual os data centers também se tornam um motor da transição energética mais ampla mencionada neste relatório.

Em 2025, a carga de data centers no Brasil é cerca de 800 MW, com um potencial estimado em mais de 13 GW até 2038, concentrado desproporcionalmente nos corredores S. Paulo e Rio [85].

A escala sinaliza uma mudança de instalações incrementais para o planejamento em nível de campus, medido em centenas de megawatts por local, e prenuncia uma demanda de múltiplos gigawatts de demanda em meados da década de 2030, sob a intensificação da computação impulsionada pela IA. A matriz energética excepcionalmente limpa do Brasil proporciona uma vantagem estrutural de descarbonização para essa expansão.

Esse crescimento continuará e se acelerará em ambos os cenários (ver o anexo para mais detalhes). A **Terra Firme** prevê uma rápida aceleração em linha com a trajetória atualmente observada, levando a cerca de 10 GW implantados até 2030 e o dobro desse valor até 2040. Os padrões de localização de data centers permanecem ancorados em pólos metropolitanos existentes, com crescente competição pelo acesso à energia, o que limita seu crescimento na década de 2030 [86].

Salto Verde prevê um crescimento ainda mais rápido na década de 2030, com 45 GW implantados até 2040. Neste cenário, a densidade computacional da era da IA acelera a transição de salas de megawatts para campus com vários edifícios da classe de gigawatts, impulsionando tanto a demanda absoluta por energia quanto o valor de corte de pico de cargas flexíveis. Como resultado, inovações em torno de soluções de energia colocalizadas, armazenamento e outros portfólios de energia livre de carbono, como energia eólica e solar contratadas ou “blocos firmes” de energia hidrelétrica, surgem em grande escala. Essas evoluções, juntamente com reformas de mercado para mercados mais flexíveis e com preços por hora, aliviam as restrições em corredores congestionados e desbloqueiam pólos secundários além de São Paulo e Rio, em regiões com recursos renováveis mais robustos.

Com menor crescimento de data centers e maior competição por energia entre os usos finais, **Terra Firme** passa por uma modernização de sua economia mais lenta do que a observada em **Salto Verde**.

Implicações para a energia

Após um período de rápido crescimento nos últimos 20 anos, a demanda final por energia em edifícios começa a se estabilizar após 2030 em ambos os cenários (Figura 8). Isso se deve aos ganhos de eficiência em eletrodomésticos e à eletrificação de outros usos da energia que, mesmo parcial em **Terra Firme**, impulsiona no entanto a uma certa redução de emissões. A participação da eletricidade em edifícios sobe de cerca de 60% hoje (contra 33% em 2000) para 80-95% em todos os cenários.

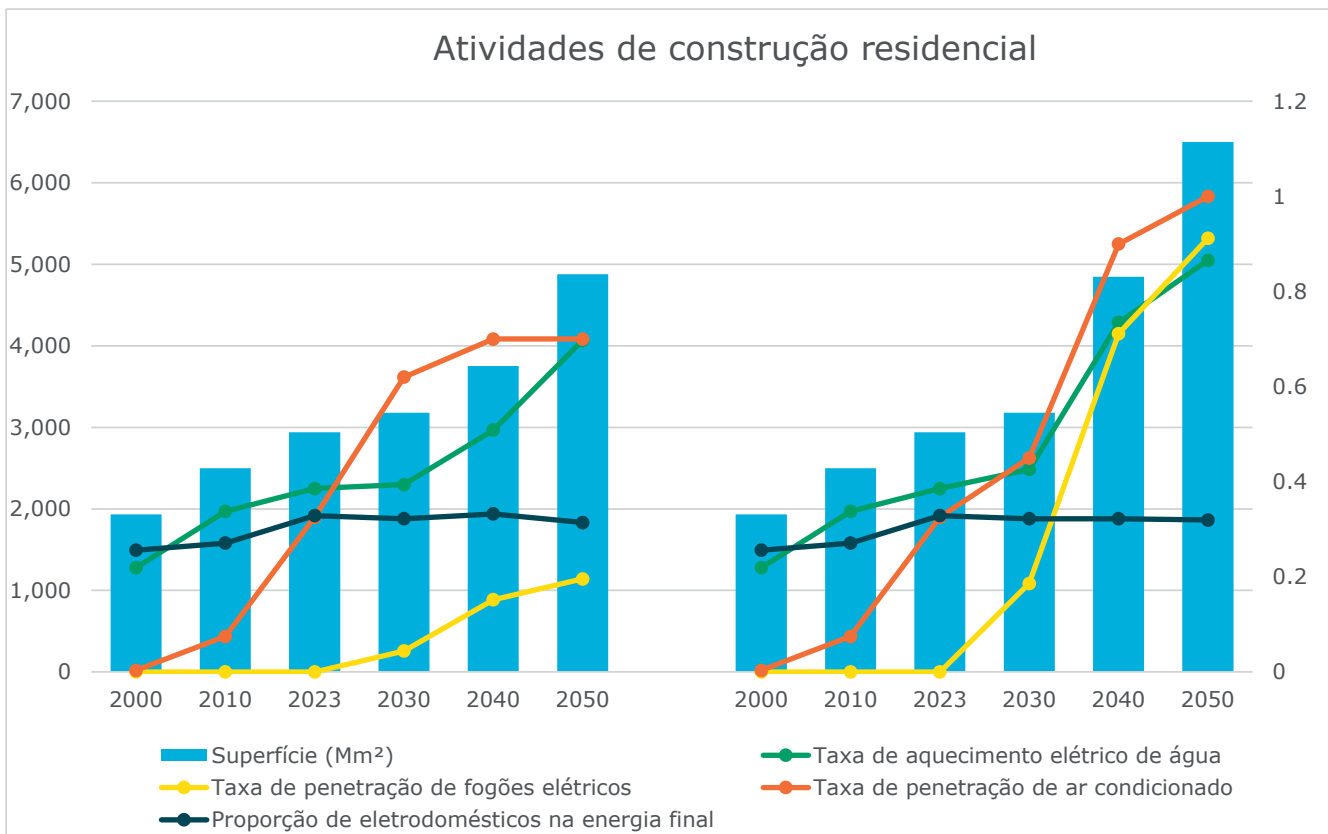


Figura 5 – Atividade residencial

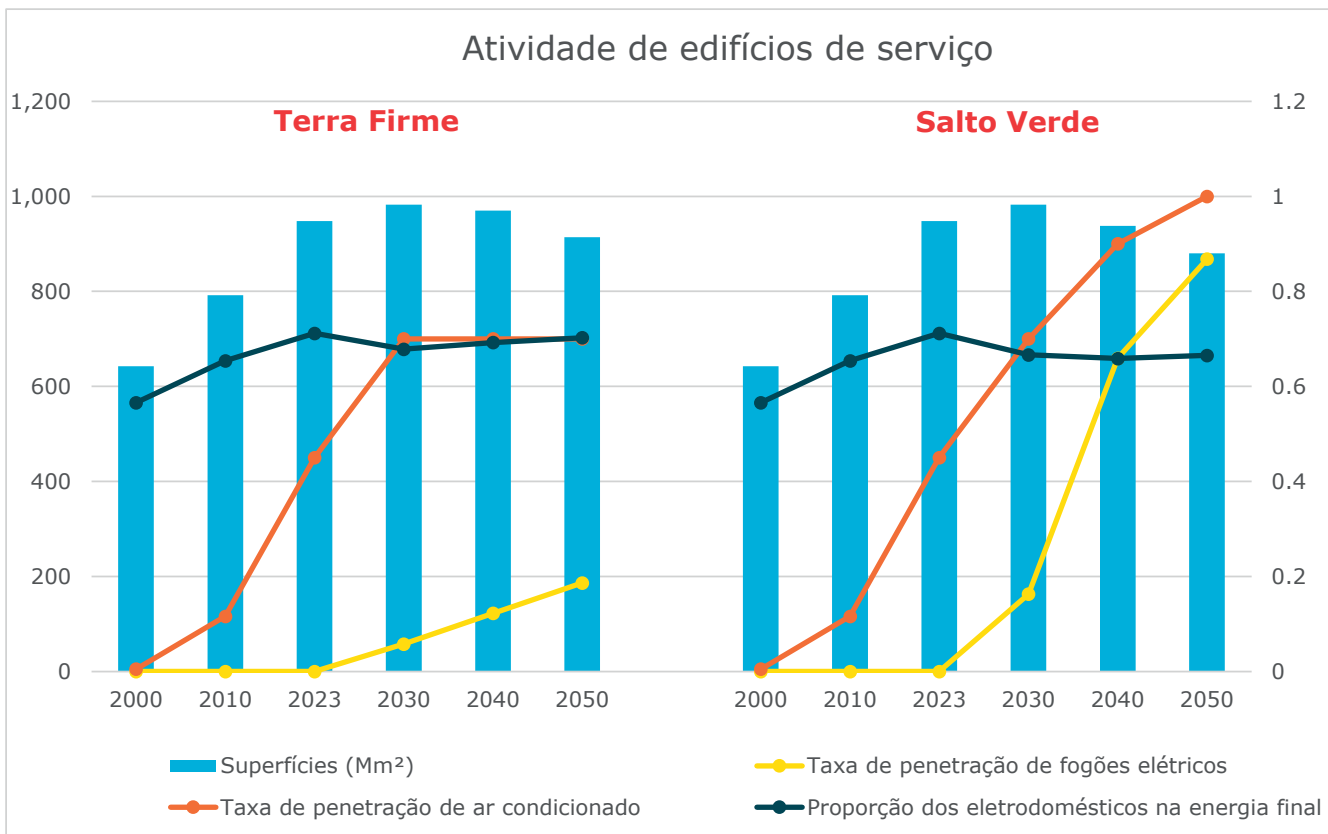


Figura 6 – Atividade em edifícios de serviço

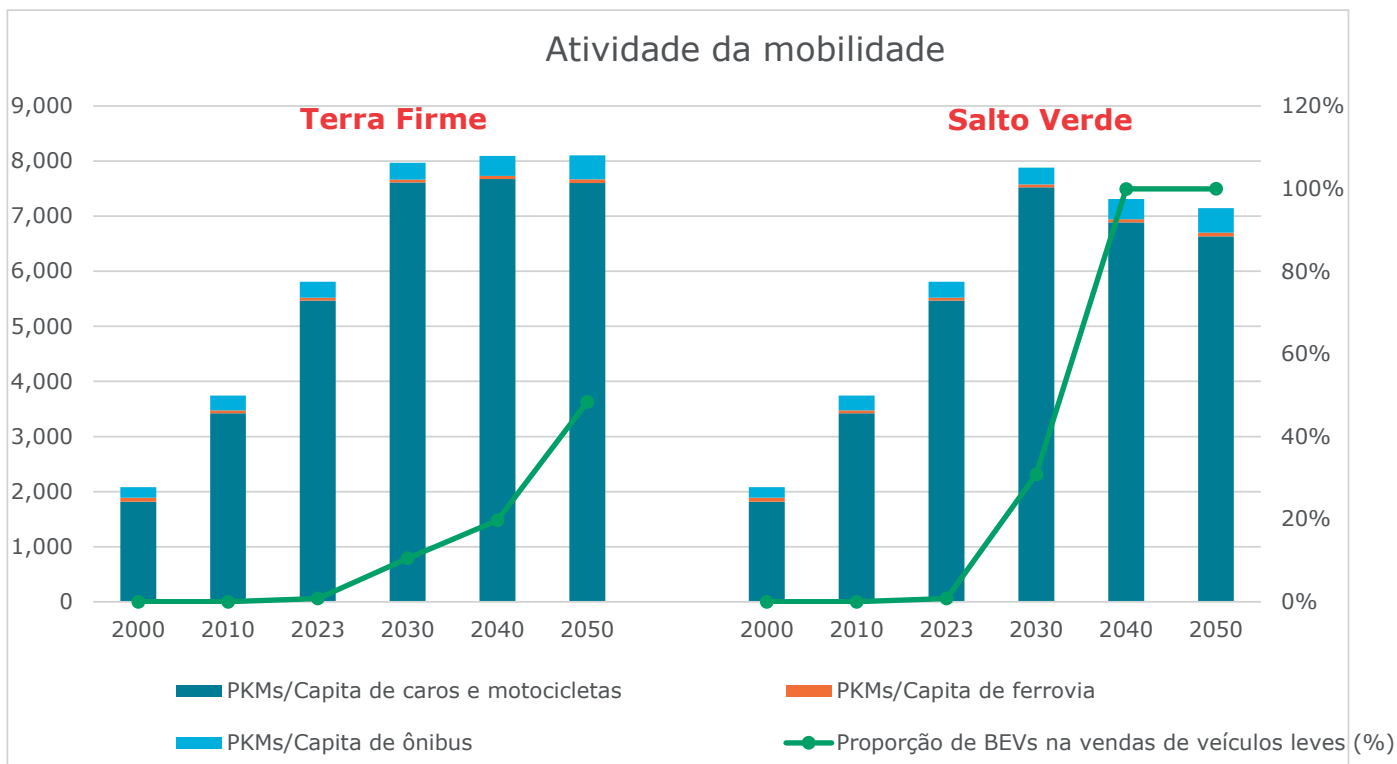


Figura 7 – Atividade da mobilidade rodoviária (passageiros)

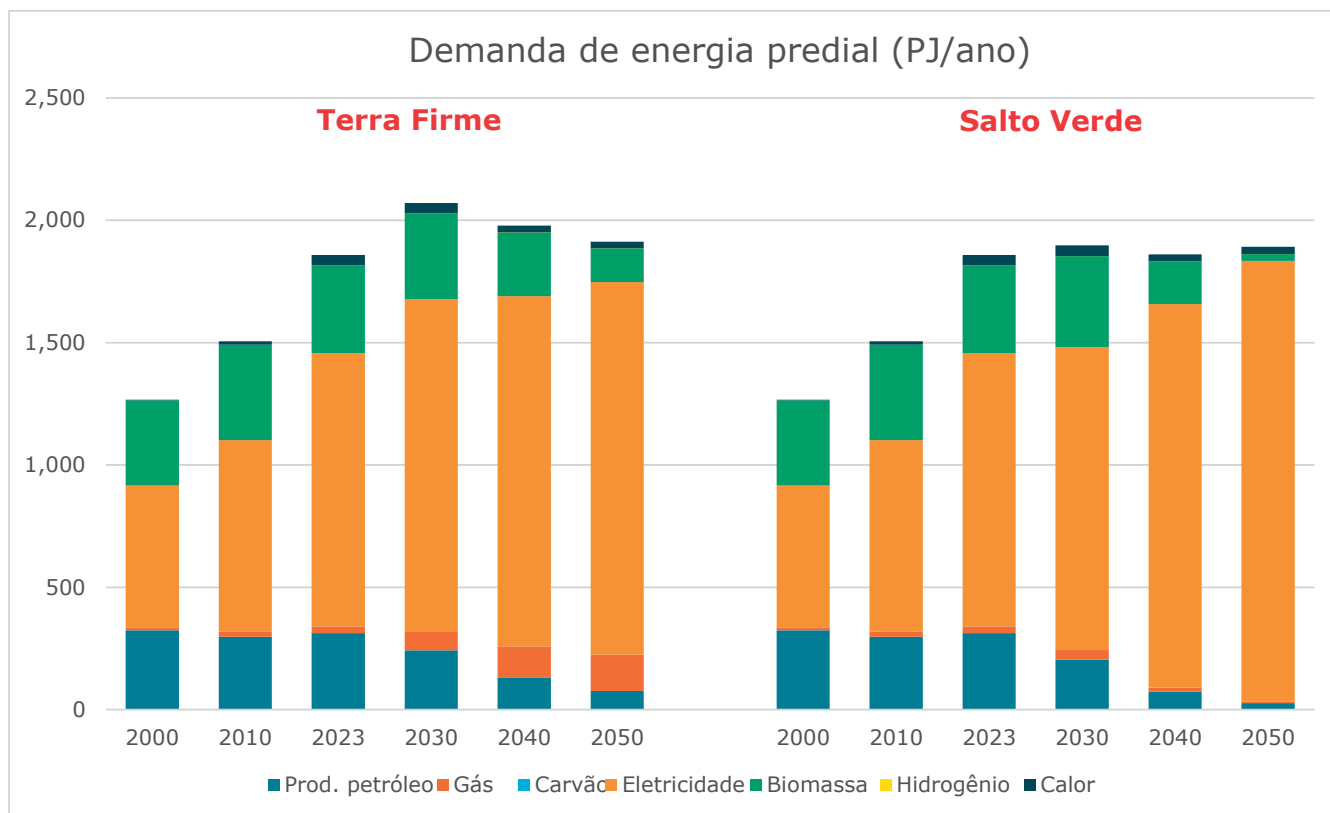


Figura 8 – Demanda de energia final para edifícios

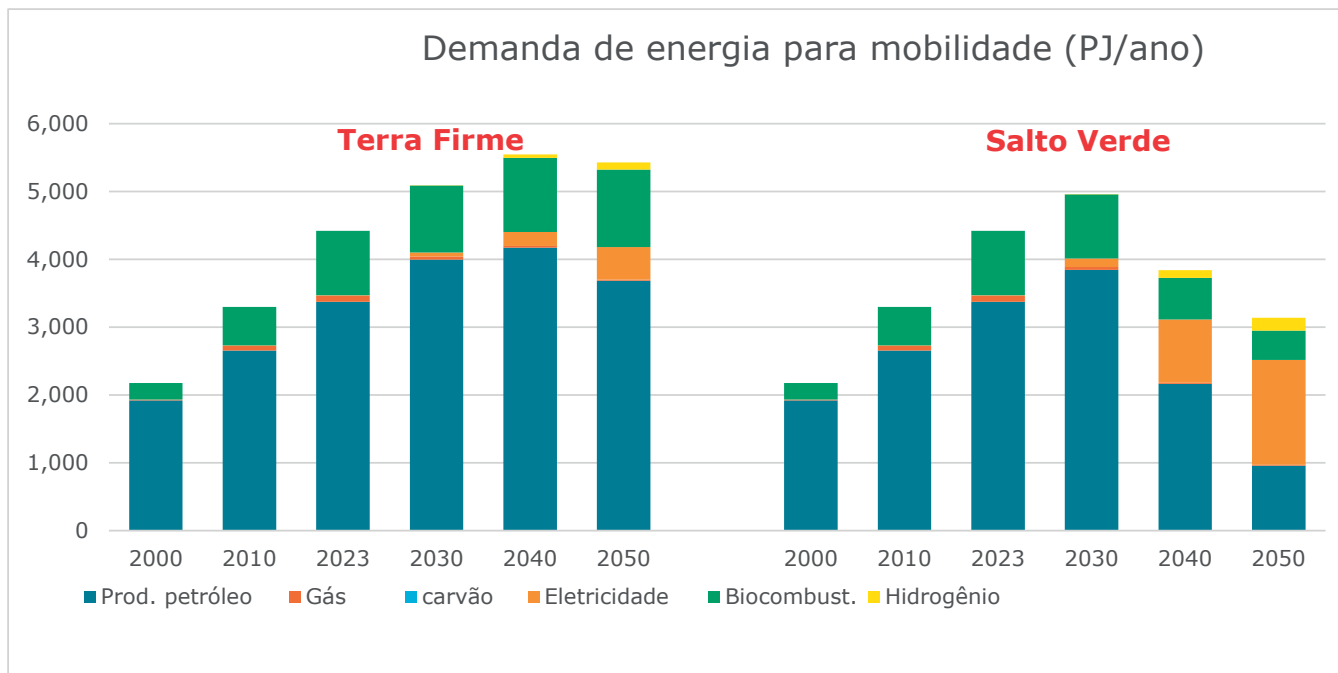


Figura 9 – Demanda de energia para mobilidade, por fonte

O transporte rodoviário representa cerca de 85% da demanda final de energia na mobilidade, uma proporção que deverá permanecer estável. A evolução da demanda de energia depende, portanto, fortemente das transformações nesse setor.

A demanda final de energia para mobilidade atinge o pico por volta de 2040 e, em seguida, declina. Isso se deve essencialmente à penetração de veículos elétricos, que são mais eficientes do que os motores de combustão tradicionais e reduzem a demanda de energia em nível agregado (Figura 9). O aumento dos serviços públicos de mobilidade, mais acentuado em **Salto Verde**, contribui ainda mais para conter o crescimento da demanda por energia. A transformação do sistema de mobilidade em direção aos veículos elétricos, no entanto, leva tempo para se materializar na frota de veículos. É por isso que a demanda por petróleo e biocombustíveis continua sendo dominante até 2040. Embora a adoção de veículos elétricos seja muito lenta em **Terra Firme**, devido novamente a restrições de infraestrutura e preços da eletricidade, a modernização mais rápida do parque de veículos em **Salto Verde** aumenta significativamente a demanda por eletricidade.

Outros modos de transporte também apresentam mudanças importantes ao longo do tempo. O setor marítimo vê seus combustíveis marítimos migrando progressivamente para combustíveis sintéticos.

O setor de aviação, por razões semelhantes, migra progressivamente para biocombustíveis. Existem diferenças entre os cenários em termos de penetração (com cerca de 40% da demanda total em **Terra Firme** e até cerca de 80% em **Salto Verde**), visto que as políticas globais e nacionais têm um impacto significativo nessas taxas (mais detalhes disponíveis no anexo).

Por fim, o crescimento previsto na demanda por data centers se traduz em um aumento na demanda de energia de 220 PJ por ano até 2030, chegando a 570-1.000 PJ até 2040. Isso equivale a uma demanda de eletricidade de 60 TWh até 2030 e de 160-280 TWh até 2040, ou cerca de 10% da eletricidade total. O impacto do crescimento da demanda de eletricidade dos data centers está longe de ser desprezível. É por isso que, em **Terra Firme**, a capacidade dos centros de dados é mais limitada, resultando em menor digitalização da economia e em uma eletrificação mais lenta dos setores adjacentes da economia.



Potência Industrial Verde 4



Potência industrial verde

Em 2000, as energias renováveis já representavam pelo menos 40% do fornecimento total de energia, uma proporção próxima de 50% atualmente. Essa participação é uma das mais altas entre as economias modernas do mundo. Além disso, o Brasil possui um potencial significativo para energia renovável moderna, atingindo um potencial total de 300.000 pentajoules por ano, um número que supera em muito o fornecimento atual de energia de 13.000 petajoules [87]. Como discutido pelo Ministério de Minas e Energia [87], o Brasil está entrando em uma fase de seu desenvolvimento econômico marcada pela abundância de energia. O Brasil está, portanto, em uma posição única para se tornar uma potência industrial verde.

A ascensão de um gigante exportador de aço verde

A produção de aço estagnou nos últimos 20 anos, apesar das importantes exportações de minério de ferro para outros países. Os dois cenários apresentados aqui levam em consideração o aumento da demanda por materiais de construção devido ao aumento das áreas residenciais. Por si só, a necessidade desses materiais leva a um aumento da demanda de 3 vezes em comparação com os níveis atuais. No **Salto Verde**, também consideramos a oportunidade para o Brasil se tornar um exportador direto de aço para o exterior (em vez de ferro bruto). Estudos anteriores mostraram que, sob as condições adequadas de acesso a energias renováveis, o aço verde poderia de fato ser competitivo com os custos de produção atuais em diversos países [88], posicionando o Brasil em uma posição única e diferenciada. Isso adiciona em nosso exercício de modelagem 40 milhões de toneladas adicionais exportadas por ano até 2050, ou um aumento de 4 vezes na capacidade de produção em comparação com os níveis atuais¹ (Figura 10) [89, 90].

1 Até onde sabemos, não há previsão ou cenário para esse potencial.

Esse potencial, entretanto, não se concretiza em **Terra Firme**. O acesso a energia renovável acessível e à infraestrutura elétrica é mais limitado, o que impede a indústria de desenvolver uma capacidade robusta de produção de aço verde na mesma escala que em **Salto Verde**.

Crescimento significativo de uma indústria química verde

Os produtos químicos desempenham um papel fundamental em praticamente todos os setores da economia e em todas as atividades da vida. A produção de produtos químicos estagnou desde 2000, mas agora deverá expandir-se de forma mais acentuada nas próximas décadas, impulsionada pelo desenvolvimento econômico e pelas oportunidades de produção local competitiva e sustentável, incluindo, nomeadamente, os vastos volumes de resíduos agrícolas de um setor agrícola dinâmico (Figura 11). A expansão dos produtos químicos verdes e dos combustíveis sintéticos para exportação é mais acentuada em **Salto Verde**, devido às menores restrições de infraestrutura.

A intensidade energética da produção melhorou desde 2000, uma tendência que se espera que continue e se acelere ainda mais, em grande parte impulsionada pela eletrificação (e, portanto, pela descarbonização) da indústria e, em menor medida, pelo aumento da reciclagem de plásticos.

Estimamos que o Brasil poderia capturar uma parcela significativa das exportações globais de aço como resultado de seu potencial único para produzir aço verde competitivo. Estimamos que o Brasil poderia capturar uma parcela significativa das exportações globais de aço como resultado de seu potencial único para produzir aço verde competitivo.

As exportações de aço representaram cerca de 400 milhões de toneladas em 2023. O Brasil exportou quase 400 milhões de toneladas de minério de ferro em 2024. O potencial para o desenvolvimento de aço verde é, portanto, significativo, mas potencialmente limitado pela capacidade de produção. Nosso modelo sugere um potencial de 40 milhões de toneladas de exportações até 2050.

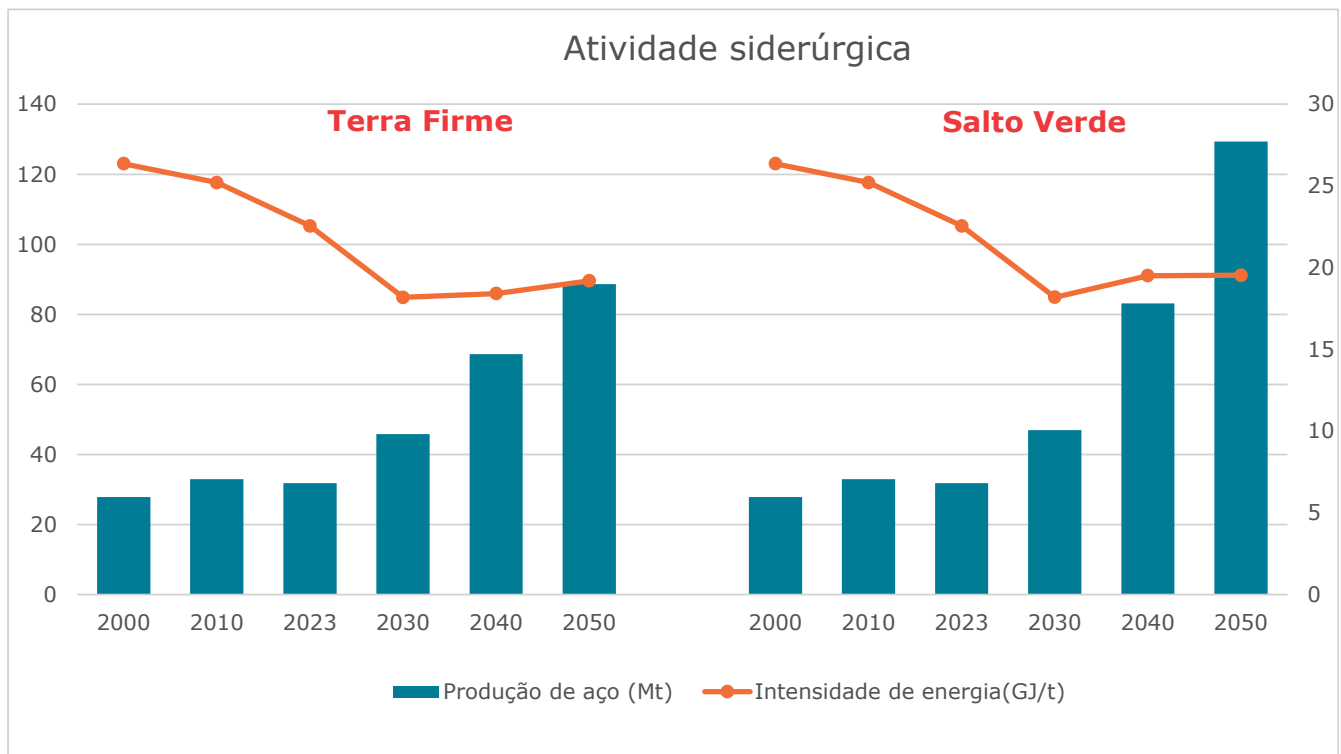


Figura 10 – Atividade siderúrgica

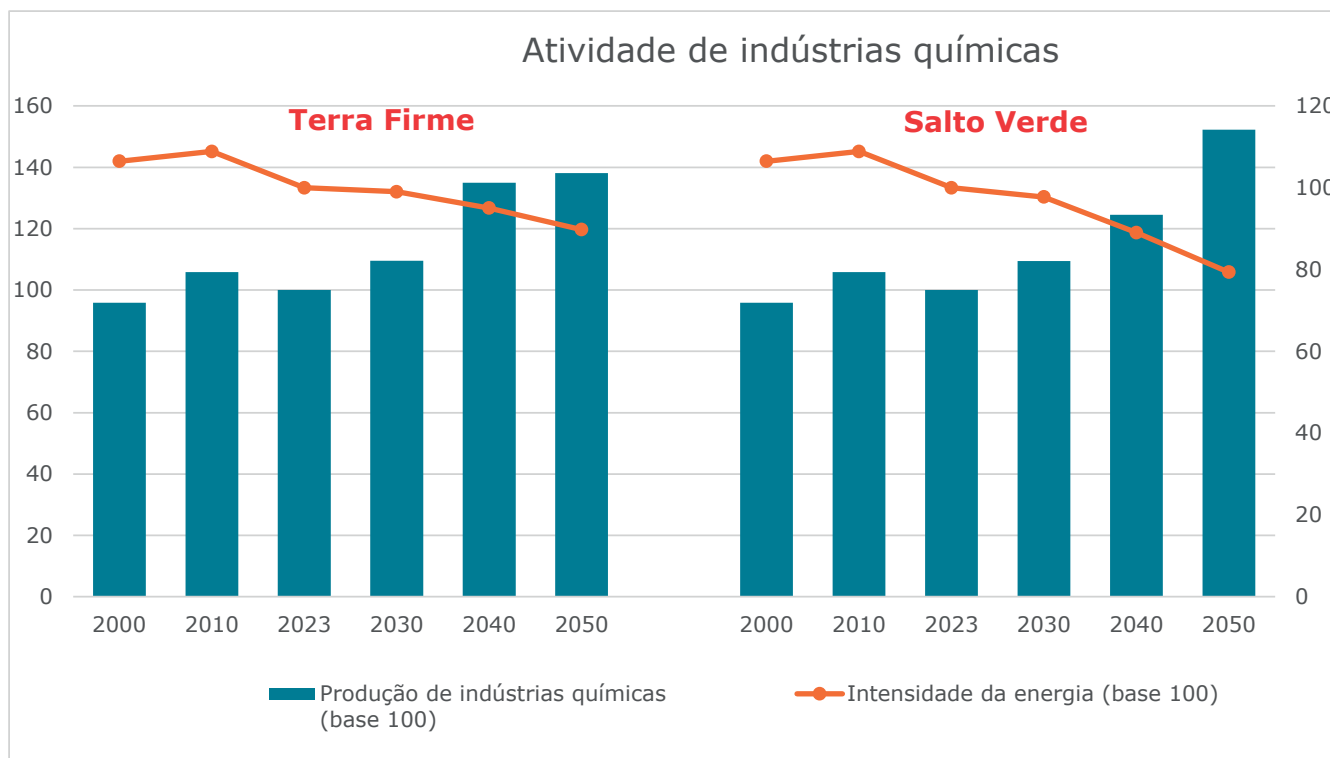


Figura 11 – Atividade de indústrias químicas

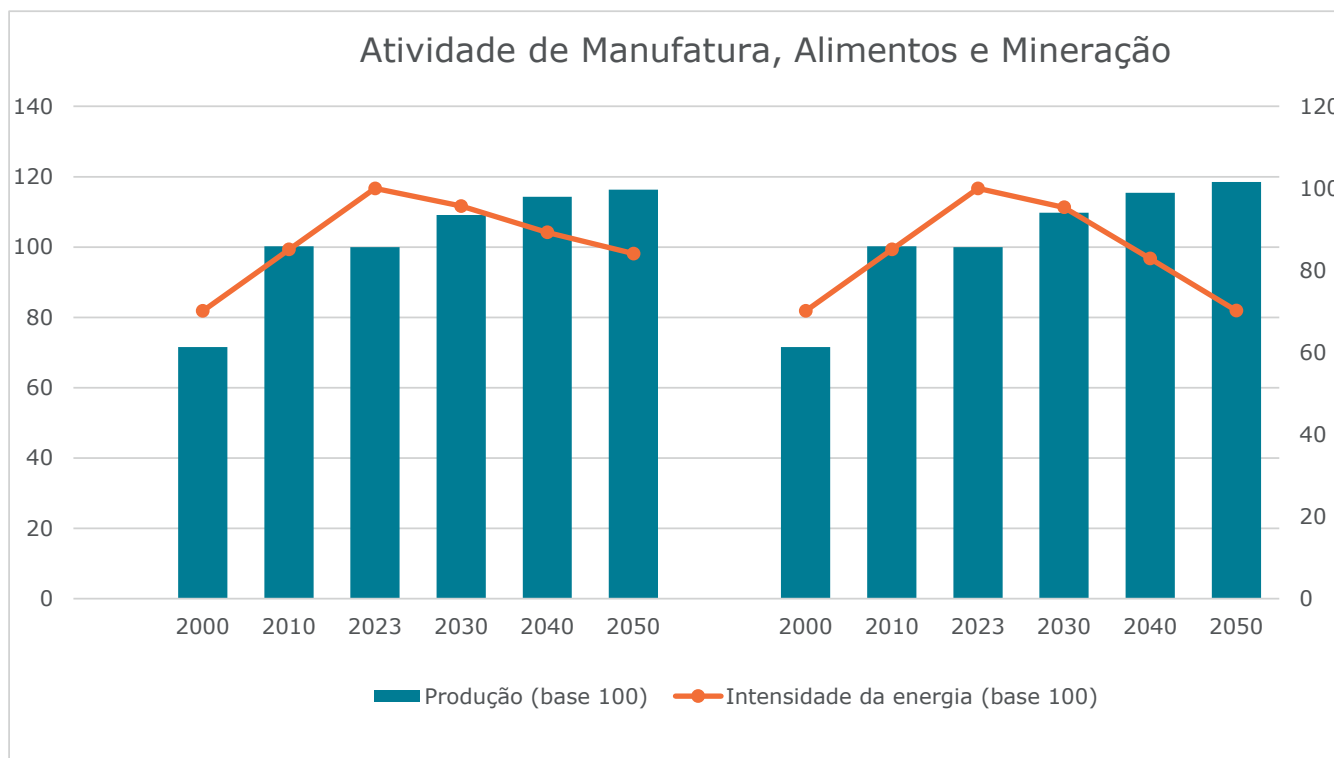


Figura 12 – Outras atividades industriais

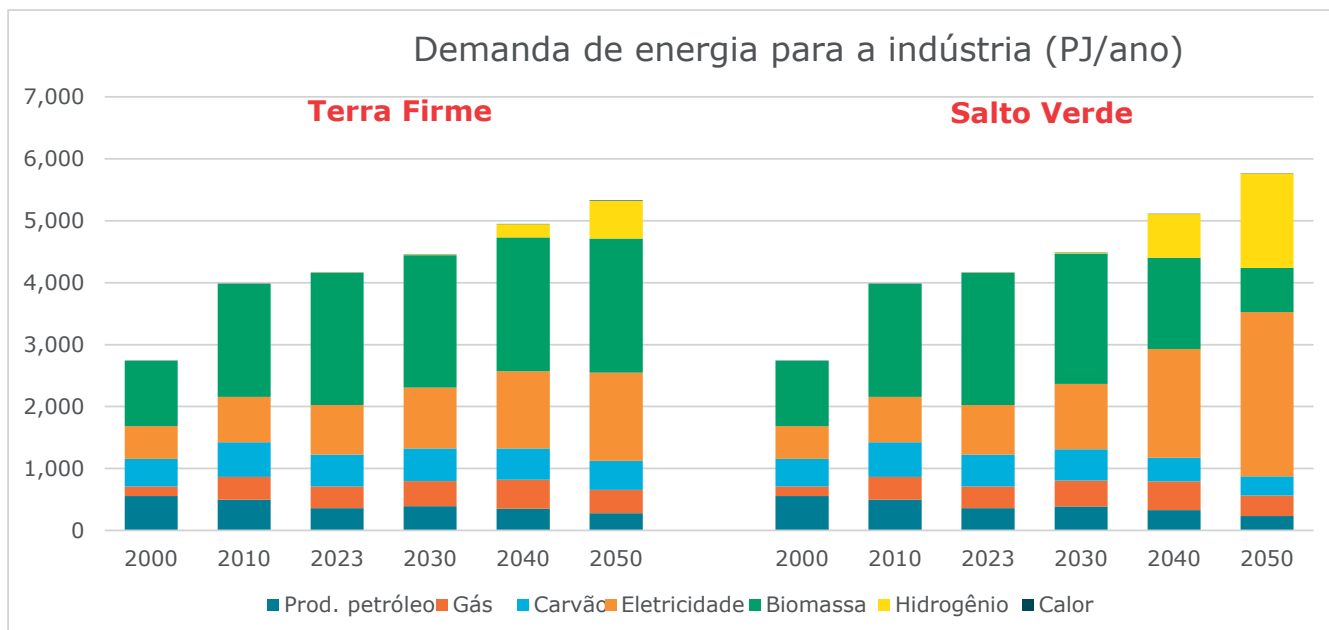


Figura 13 – Demanda por energia, de indústrias

Os produtos químicos verdes, em condições adequadas, também podem se mostrar competitivos em relação aos custos atuais, e o Brasil está bem posicionado para capitalizar essa oportunidade [91]. A extensão desse desenvolvimento, no entanto, assim como para outros setores, dependerá da disponibilidade de uma infraestrutura elétrica robusta.

Desenvolvimento da manufatura local

O Brasil possui um setor industrial vibrante, incluindo automotivo, produção de alimentos, têxtil, máquinas, aeroespacial, produção eletrônica e uma forte atividade de mineração e metalurgia. Os setores de manufatura, alimentos e mineração representam hoje 70% da demanda final de energia na indústria, sendo os 30% restantes provenientes dos setores siderúrgico, mineral e químico. Até 2050, espera-se que essa proporção caia para cerca de 40-50%, dado o aumento significativo na demanda das indústrias de materiais, tanto para consumo interno quanto para exportação.

O crescimento da produção local, contudo, permanece significativo, seguindo a tendência dos últimos 25 anos (com uma pausa nos últimos 10 anos), com um crescimento de 50% no setor de mineração até 2050 e uma expansão de 2,5 a 3 vezes no setor automotivo (Figura 12). As medidas de circularidade, principalmente em bens duráveis, permanecem limitadas nesses cenários, mas moderam ligeiramente o crescimento geral da demanda. A intensidade energética da indústria também aumentou desde 2000, mas espera-se que essa tendência se inverta, à medida que esses setores dependem cada vez mais da eletricidade como fonte de energia, principalmente como parte de suas estratégias de modernização.

As mudanças na composição das atividades levam a uma maior dependência da demanda por eletricidade. Em **Salto Verde**, a abundância de eletricidade a preços acessíveis também impulsiona a substituição da energia elétrica.

Implicações para a energia

A Figura 13 mostra a perspectiva consolidada da demanda final de energia da indústria.

A demanda final de energia cresce cerca de 25-40% em ambos os cenários, um aumento relativamente modesto considerando a expansão significativa do setor industrial. A chave para a eficiência no uso de energia industrial é a eletrificação efetiva, ou seja, modernização, da infraestrutura industrial.

A participação da eletricidade na demanda final de energia aumenta de 19% em 2023 para 27-45% em 2050 em todos os cenários.

Nossas projeções sobre a matriz energética divergem entre os cenários. Embora a demanda por combustíveis fósseis tenha diminuído desde 2010, ela se estabiliza no cenário **Terra Firme**, impulsionada pela rápida expansão das indústrias siderúrgica e mineral, que compensam o lento progresso na eletrificação.

A demanda por biomassa também se estabiliza neste cenário. As restrições na disponibilidade de infraestrutura elétrica preservam o status quo nos setores mais dependentes de biomassa, como a indústria de transformação e a indústria alimentícia.

Em **Salto Verde**, a demanda por combustíveis fósseis cai cerca de 30%. Apesar da expansão dos setores citados acima, a transformação da pegada industrial, em todos os setores, é mais rápida, reduzindo, portanto, a dependência de combustíveis fósseis. Da mesma forma, a demanda por biomassa diminui drasticamente ao longo do período.

A Figura 14 fornece uma perspectiva mais detalhada para os setores siderúrgico, químico e outros setores industriais. Detalhes adicionais sobre a demanda de energia setorial estão disponíveis no anexo.

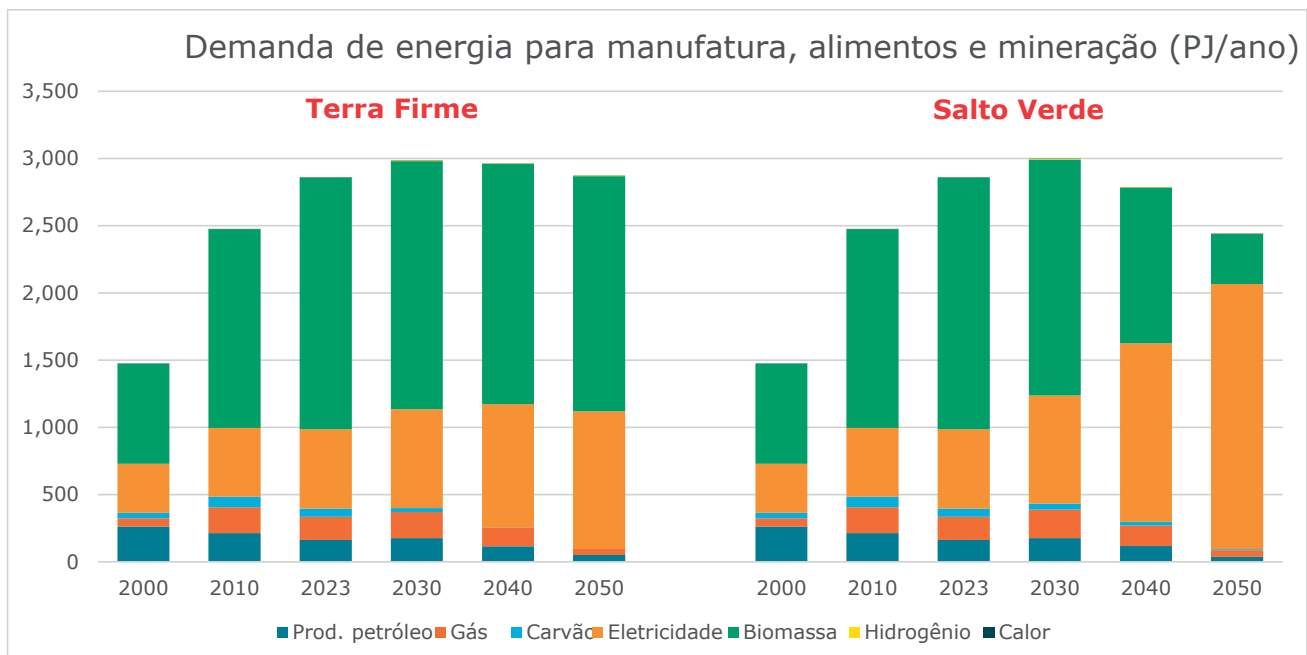
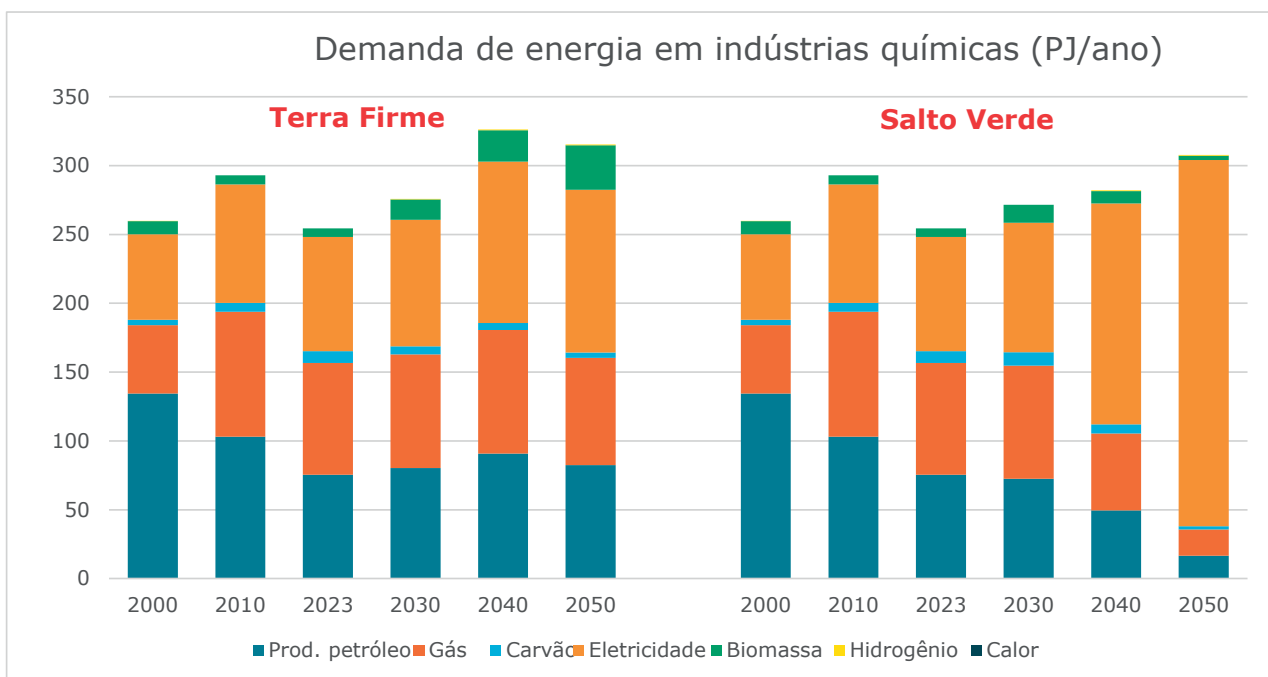
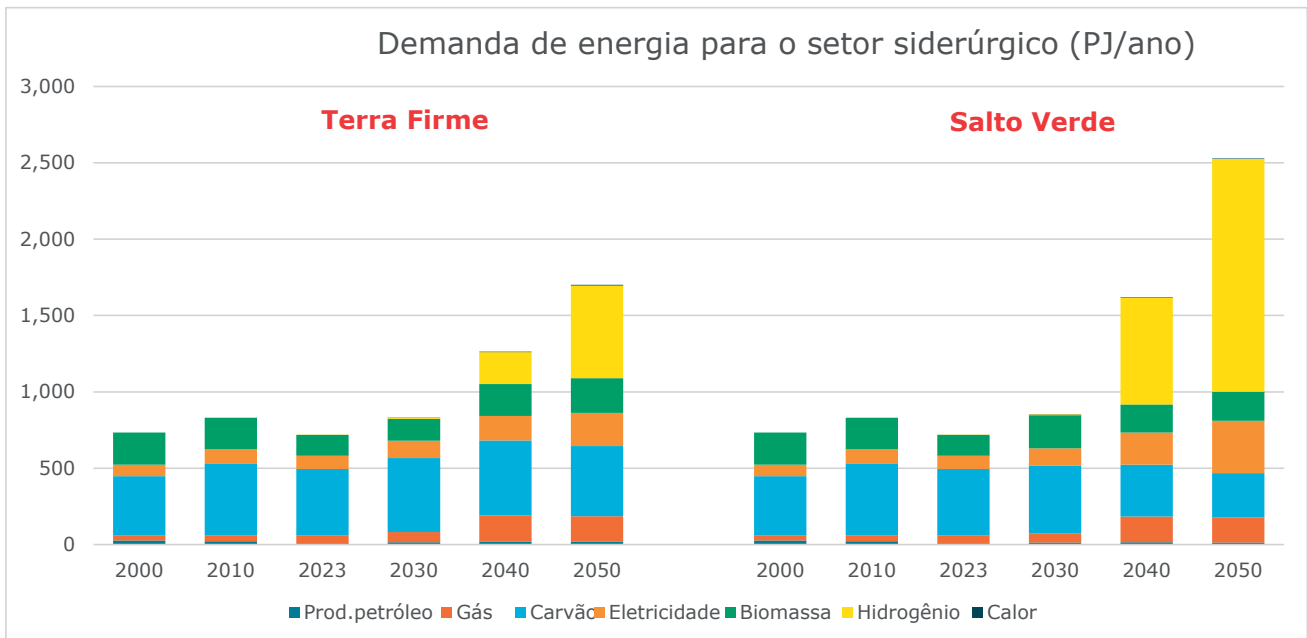


Figura 14 – Demanda de energia setorial na indústria (aço, produtos químicos e outras indústrias)





**Gigante da energia
renovável**

5

Gigante da energia renovável Rumo a uma economia elétrica moderna

As transformações da economia acima mencionadas têm implicações importantes para a infraestrutura energética que a abastece.

A demanda final de energia aumentou 50% nos últimos 20 anos, acompanhando o crescimento do PIB (Figura 15). A estrutura da economia e do sistema energético sofreu poucas alterações, com uma menor participação da indústria (de 40% para 35%) em relação à mobilidade (de 35% para 40%), mantendo-se os demais setores em seus níveis atuais. Também não houve mudanças significativas na matriz energética nos últimos 20 anos, com exceção de uma leve redução na dependência do petróleo, com substituição parcial por biomassa (biocombustíveis) e gás natural.

A participação da eletricidade na matriz aumentou apenas marginalmente, de 16% para 18%, um nível inferior à média global em cerca de 20%.

Os próximos trinta anos testemunharão uma modernização significativa da economia brasileira. Os ambientes urbanos evoluirão e se modernizarão, impulsionados pelo potencial das tecnologias modernas, levando a um rebote no setor da construção civil e a uma penetração mais ampla de eletrodomésticos modernos, incluindo ar-condicionado. A mobilidade continuará a crescer, baseada em tecnologias mais acessíveis e, possivelmente, em políticas ambiciosas de desenvolvimento de infraestrutura. A indústria demonstra um enorme potencial, principalmente na produção de materiais verdes, que deverá ter grande demanda global.

Os dois cenários oferecem, no entanto, perspectivas contrastantes sobre o que essa evolução poderia ser.

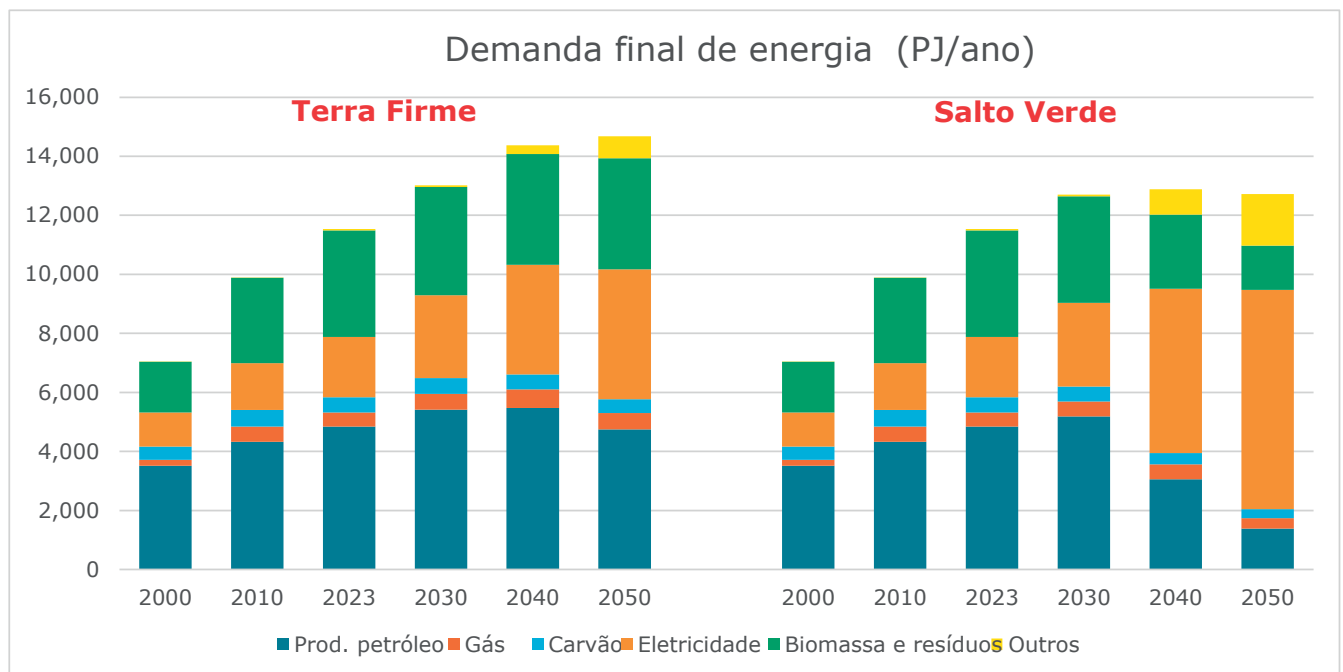


Figura 15 – Demanda final de energia, por fonte

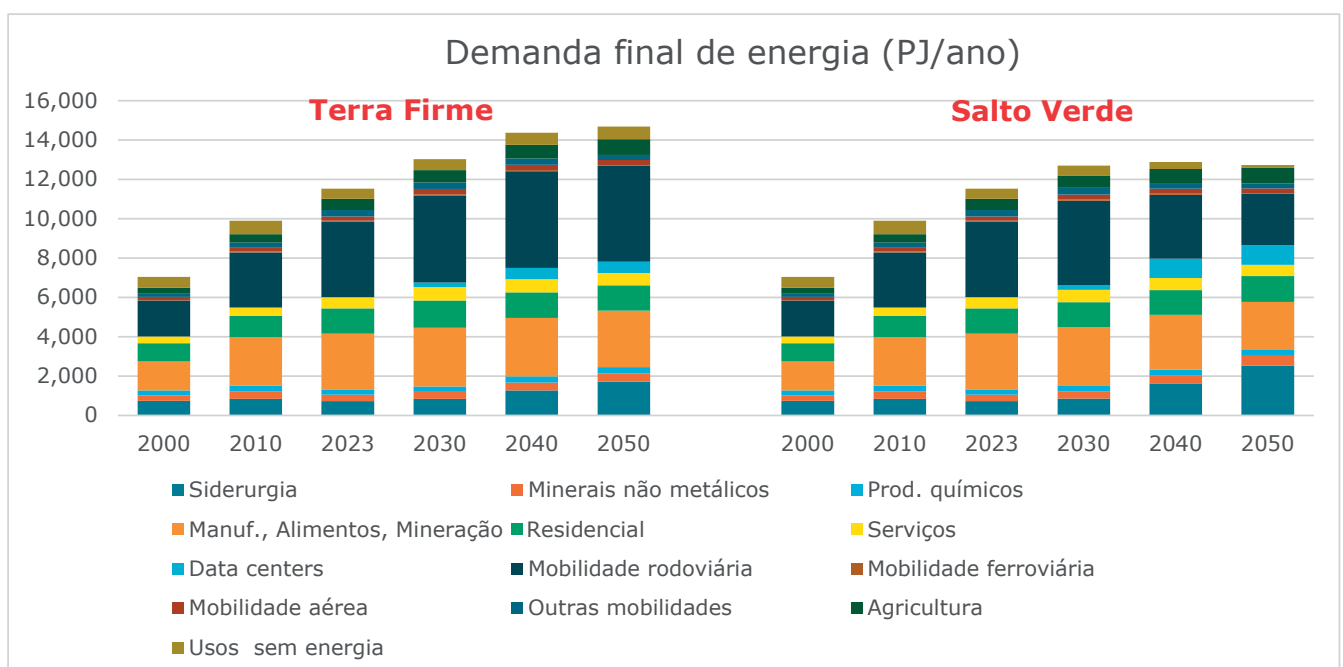


Figura 16 – Demanda final de energia, por setor

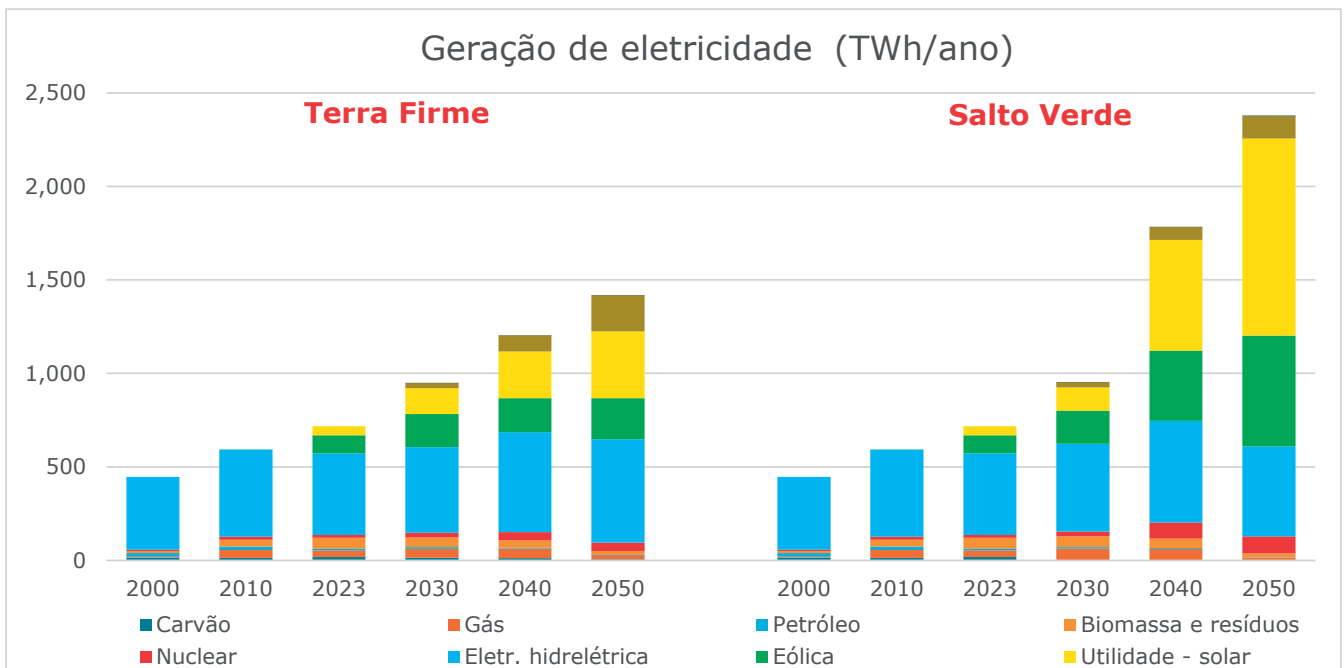


Figura 17 – Geração de eletricidade

O que os diferencia é a disponibilidade de uma infraestrutura de eletricidade renovável abundante e acessível. Apesar do potencial significativo, barreiras econômicas, financeiras e institucionais impedem, em certa medida, esse desenvolvimento em **Terra Firme**. Uma consequência direta disso são os preços mais altos da eletricidade e a capacidade limitada de expandir os serviços digitais e os eletrodomésticos a nível acessível em **Salto Verde**.

Essa restrição gera efeitos em cascata no desenvolvimento econômico, na produção industrial e no sistema energético. A demanda final de energia continua a aumentar em **Terra Firme**, impulsionada pelo crescimento econômico. A participação da eletricidade sobe para 22% em 2030 e, em seguida, muito lentamente para 27% e 30% em 2050, devido à modernização dos eletrodomésticos existentes, das fábricas e ao surgimento de datacenters.

Em **Salto Verde**, a modernização se acelera. Um investimento fundamental em infraestrutura na década de 2025-2035 leva ao desenvolvimento e à disponibilidade de uma infraestrutura elétrica robusta, que possibilita a adoção de eletrodomésticos modernos em edifícios (por exemplo, ar-condicionado, fogões), veículos elétricos acessíveis, a automação e eletrificação progressiva da indústria manufatureira e a expansão de fortes indústrias siderúrgicas e químicas verdes. A demanda final de energia se estabiliza nos níveis de 2030, à medida que o aumento da atividade econômica é compensado pelos ganhos de eficiência da eletrificação. A participação da eletricidade atinge 22% em 2030 e 58% em 2050.

A participação da indústria atinge 40-50% da demanda final de energia até 2050 em ambos os cenários. +10 pontos em relação a 2023, devido ao impacto significativo da indústria brasileira no crescimento da demanda de energia (Figura 16).

Um sistema de energia renovável

Em **Terra Firme**, a infraestrutura elétrica continua a se expandir, apesar das limitações que enfrenta. A geração de eletricidade quase dobra até 2050, passando de 718 TWh em 2023 para 1.400 TWh em 2050. Em **Salto Verde**, o aumento na demanda de eletricidade é ainda mais acentuado, pois assumimos que não há barreiras que se oponham ao rápido desenvolvimento da infraestrutura elétrica. Como consequência, a geração de eletricidade triplica, atingindo 2.300 TWh em 2050 (Figura 17), ou seja, 3 vezes os níveis de 2023.

Historicamente, a maior parte da geração de energia no Brasil tem sido proveniente de hidrelétricas, representando em 2023 60% da produção total. Espera-se que essa produção permaneça constante em nosso modelo, levando em consideração as limitadas oportunidades para aumento da produção no futuro. A maior parte do crescimento deverá ser impulsionada pelas energias eólica e solar. A energia eólica e solar já representam 20% da geração de energia em 2023, uma proporção que deverá aumentar para 50% em **Terra Firme** e até 75% em **Salto Verde**.

A energia solar representaria notavelmente de 40 a 50% da geração total de energia até 2050 em nosso modelo. Dentro da produção solar, também avaliamos o potencial de instalações solares distribuídas, com base em um estudo anterior da Schneider Electric.[92] Essa previsão é conservadora, pois se concentra principalmente no potencial da geração distribuída em telhados de edifícios. Isso demonstra, no entanto, uma contribuição potencial para o aumento da geração de energia de 120 a 200 TWh até 2050. Isso corresponde a 27% do crescimento da demanda de eletricidade em **Terra Firme** e 7% em **Salto Verde**. No primeiro cenário, a proporção é alta porque as restrições ao desenvolvimento da infraestrutura incentivam a adoção da geração distribuída como forma de obter eletricidade a preços acessíveis e impulsionar o desenvolvimento individual. No segundo cenário, a adoção da geração distribuída é menos relevante, dada a aceleração significativa do desenvolvimento da infraestrutura elétrica.

Demanda de hidrogênio e combustíveis à base de hidrogênio (MtH₂/ano)

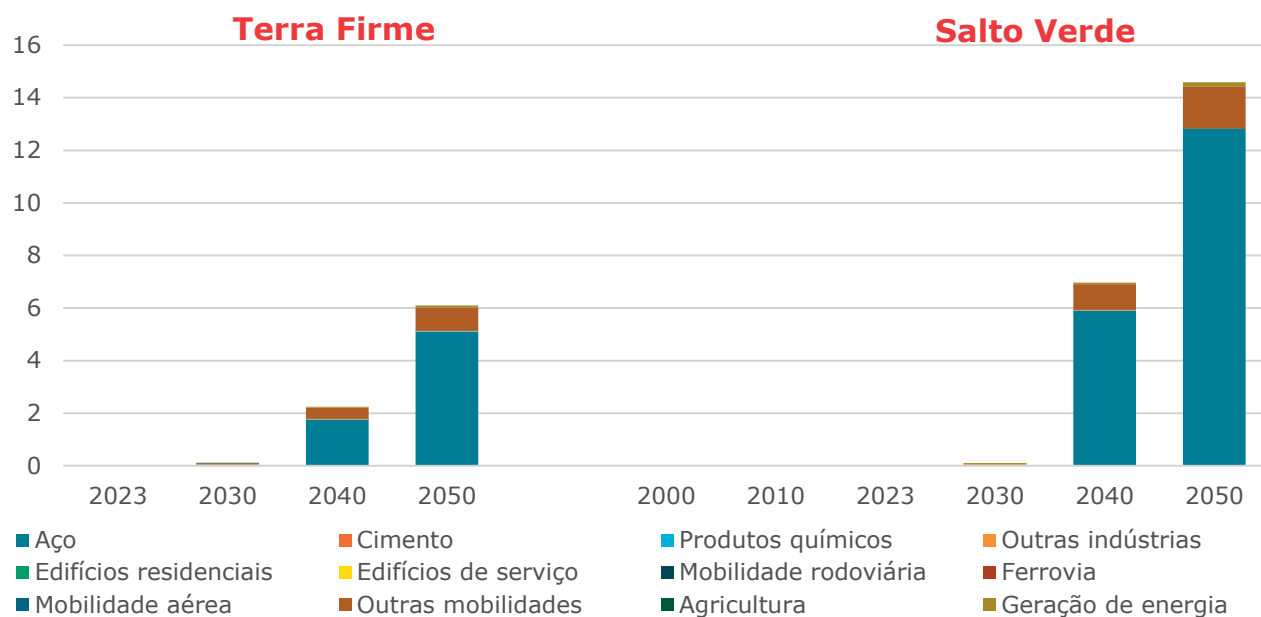


Figura 18 – Demanda de hidrogênio

A necessidade de infraestrutura para hidrogênio verde

Além de seus usos existentes, que não são analisados, o hidrogênio também será necessário para descarbonizar a demanda de energia em determinados setores.

Os dois cenários sugerem um aumento na demanda de 6 a 15 milhões de toneladas de hidrogênio verde até 2050 (Figura 18). Esse desenvolvimento se materializa principalmente após 2030. Ele decorrerá, em grande parte, do desenvolvimento de uma indústria siderúrgica verde (notadamente para exportação, *Salto Verde*) e, em menor escala, da produção de combustíveis alternativos para setores de mobilidade de difícil descarbonização (por exemplo, transporte marítimo).



**Força motriz
global da
descarbonização**

6

Força motriz global da descarbonização

Emissões residuais da economia brasileira

À medida que a economia do Brasil se moderniza, ela também se descarboniza. O **Salto Verde** é mais ambicioso nesse sentido; consequentemente, suas emissões residuais diminuem significativamente, de 510 MtCO₂/ano em 2023 para pouco menos de 200 MtCO₂/ano em 2050. Em contraste, as emissões em **Terra Firme** atingem o pico mais tarde e só começam a diminuir lentamente após 2040 (Figura 19).

As emissões do setor de mobilidade representam quase metade das emissões da economia em 2023 e, portanto, constituem um grande desafio. Embora essas emissões diminuam significativamente em **Salto Verde** devido à eletrificação das estradas, elas permanecem aproximadamente estáveis em **Terra Firme** ao longo do período: a lenta eletrificação da malha rodoviária é compensada por um aumento global na demanda por serviços de mobilidade.

A indústria representa outro desafio significativo para as emissões. Em **Terra Firme**, as emissões tendem a se estabilizar: a expansão industrial compensa a modernização (ou seja, descarbonização) do estoque. Em **Salto Verde**, o declínio das emissões é mais rápido. Primeiro, a expansão industrial se baseia em tecnologias verdes. Um efeito adjacente desse desenvolvimento é a criação de cadeias de valor locais que impulsionam a modernização da base de ativos industriais mais rapidamente. Finalmente, a infraestrutura elétrica fornece eletricidade abundante e acessível, o que permite que essa mudança se materialize em escala.

Biomassa e restauração do solo

No atual sistema energético brasileiro, as energias renováveis já representam quase metade do fornecimento total de energia. Essa participação é uma das mais altas entre as economias modernas do mundo, superada apenas por alguns países (menores). Os combustíveis fósseis representam a outra metade. Em **Terra Firme**, essas participações evoluem apenas ligeiramente até 2050. A incapacidade de desenvolver uma infraestrutura elétrica robusta impede um grande reequilíbrio da demanda de energia e a penetração de energias renováveis alternativas, como a eólica e a solar. Em contraste, em **Salto Verde**, essa transformação é maximizada. Como consequência, a participação das energias renováveis (incluindo biomassa) aumenta para até 70% da matriz energética até 2050 nesse cenário, enquanto a dos combustíveis fósseis cai para 20%.

Em **Terra Firme**, o aumento da eletricidade proveniente de fontes renováveis fornece novos usos para a eletricidade, com substituição limitada dos usos atuais de biomassa na economia (por exemplo, biocombustíveis, biogás), principalmente na indústria e na mobilidade. Em **Salto Verde**, esses novos usos da eletricidade se desenvolvem mais rapidamente, mas a oferta abundante de eletricidade renovável moderna também possibilita a transformação de vários setores da economia, levando a um declínio mais significativo da demanda por biomassa (Figura 21). A eletrificação da mobilidade se acelera e as atividades industriais também adotam progressivamente a eletricidade renovável.

Como consequência, o destino da demanda por biomassa varia amplamente entre os cenários (Figura 20). Após uma expansão de mais de duas vezes desde 2000, nossa modelagem sugere, de fato, uma estabilização da biomassa em **Terra Firme** (-4% até 2050) e um declínio de 60% em **Salto Verde**.

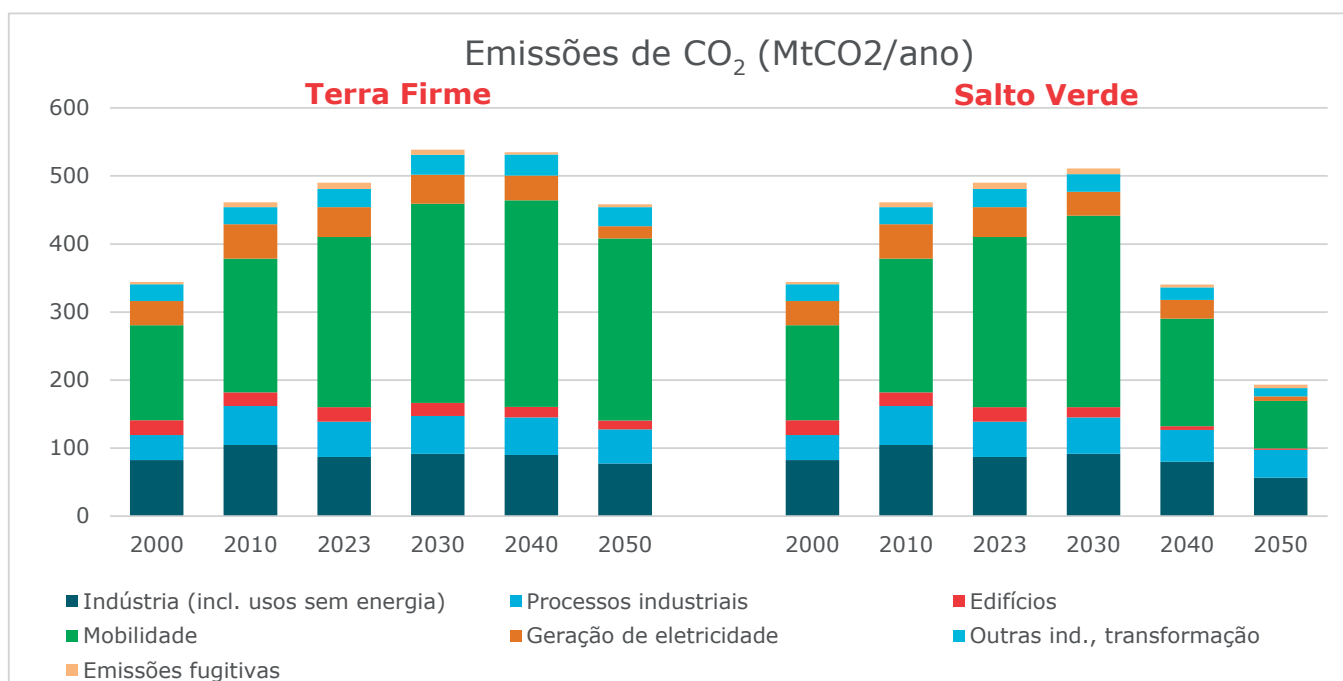


Figura 19 – Emissões de CO₂ (excluindo AFOLU)

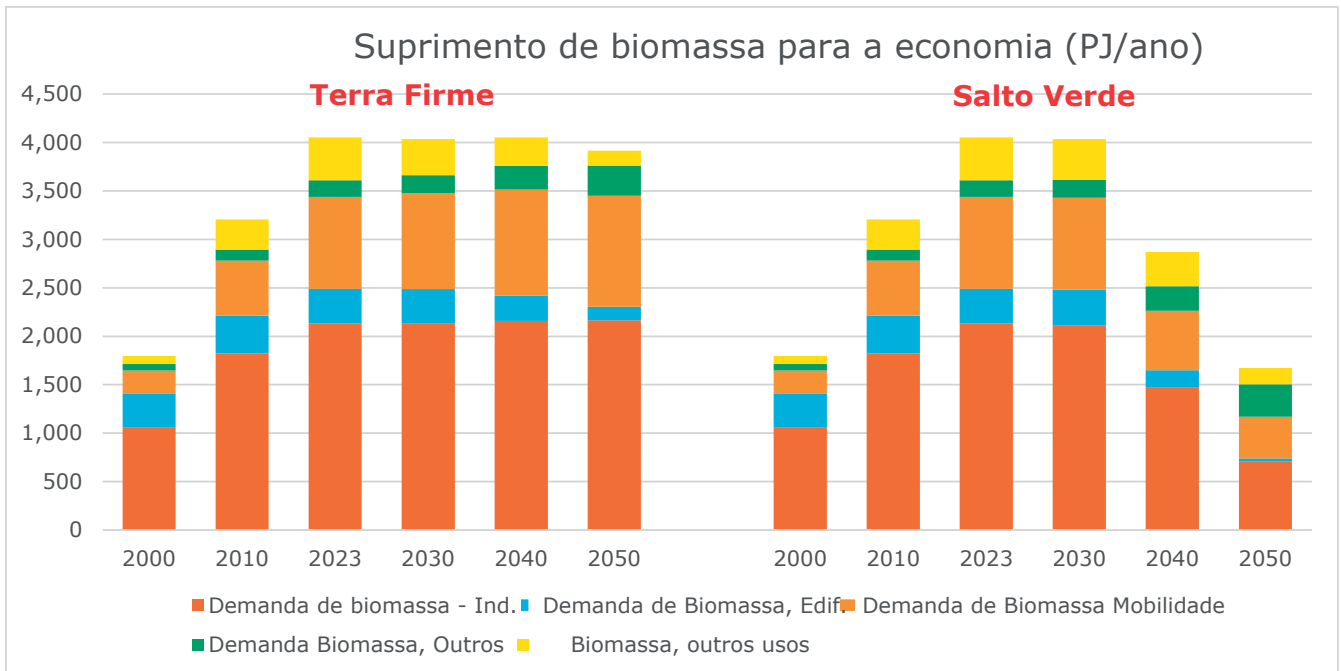


Figura 20 – Suprimento de biomassa

Uma primeira categoria fundamental de biomassa é a produção de cana-de-açúcar, milho e soja destinada à produção de biodiesel e etanol (que ambos denominamos biocombustíveis), cuja demanda está sendo deslocada pela penetração de veículos elétricos. A produção de cana-de-açúcar chega a cerca de 600 milhões de toneladas por ano, a de milho a 115 milhões de toneladas e a de soja a 125 milhões de toneladas [93], mas nem todos esses volumes se destinam a biocombustíveis.

Uma segunda categoria inclui todos os resíduos dessas produções, bem como de outras culturas, e resíduos de madeira da indústria florestal. Atualmente, são geradas mais de 700 milhões de toneladas de resíduos por ano, com cerca de um terço queimado em campos agrícolas [93]. No total, esses resíduos têm um potencial energético de cerca de 13.300 PJ por ano, mas apenas uma fração disso é elegível para fins energéticos, e apenas cerca de 4.000 PJ de biomassa são utilizados para energia.

A queda prevista no uso de biomassa para fins energéticos em **Salto Verde** terá implicações importantes. Isso reduzirá a necessidade de culturas como cana-de-açúcar, soja ou milho, liberando terras, e também reduzirá a necessidade de resíduos.

As consequências são múltiplas. Por um lado, há a oportunidade de continuar essa produção (e o uso de resíduos) para se tornar um importante exportador de biocombustíveis ou para fabricar produtos químicos verdes. Por outro lado, parte da terra liberada pode ser devolvida à natureza, por exemplo, com reflorestamento.

A primeira atividade é parcialmente considerada em nossas previsões para a produção de produtos químicos verdes (veja acima) e outras necessidades de mobilidade, como biocombustíveis para aviação. Ela poderia ser ainda mais expandida, mas não fizemos outras suposições nesta fase.

A segunda, no entanto, oferece uma oportunidade para o sequestro de carbono em grande escala.

O reflorestamento no Brasil pode proporcionar oportunidades de sequestro de carbono de cerca de 10 a 15 toneladas de CO₂ por hectare [94, 95].

Em nosso modelo, estimamos que a redução na demanda por biocombustíveis poderia liberar 33 milhões de hectares em **Salto Verde**. Nossa suposição é que a produção de soja seja substituída primeiro, depois a de milho e, por fim, a de cana-de-açúcar, já que esta última proporciona rendimentos muito maiores.

Considerando uma estimativa intermediária e estimando que apenas 50% da terra retorne à natureza, avaliamos que a redução na demanda por biomassa na economia brasileira poderia oferecer uma oportunidade de sequestro de carbono de 200 milhões de toneladas de CO₂ por ano. Mais detalhes disponíveis no anexo.

Atingir emissões líquidas zero pode ser mais viável do que pensamos.

A consolidação das descobertas acima fornece uma perspectiva sobre a evolução das emissões de CO₂ no Brasil (Figura 21).

Em ambos os cenários, ajustamos as emissões negativas para atingir emissões líquidas zero até 2050, assumindo que os compromissos do governo sejam cumpridos. Ao contrário da análise das emissões residuais, o volume de emissões negativas é, portanto, um exercício normativo.

Em **Terra Firme**, o desenvolvimento econômico do Brasil compensa a relativa descarbonização de sua economia, levando as emissões a atingirem o pico em 2040 e a alcançarem, em 2050, aproximadamente os níveis de 2010 (cerca de 460 MtCO₂ por ano). As soluções de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) contribuem com até 90 MtCO₂ por ano, com custos de redução que permanecem incertos (daí seu impacto na competitividade)

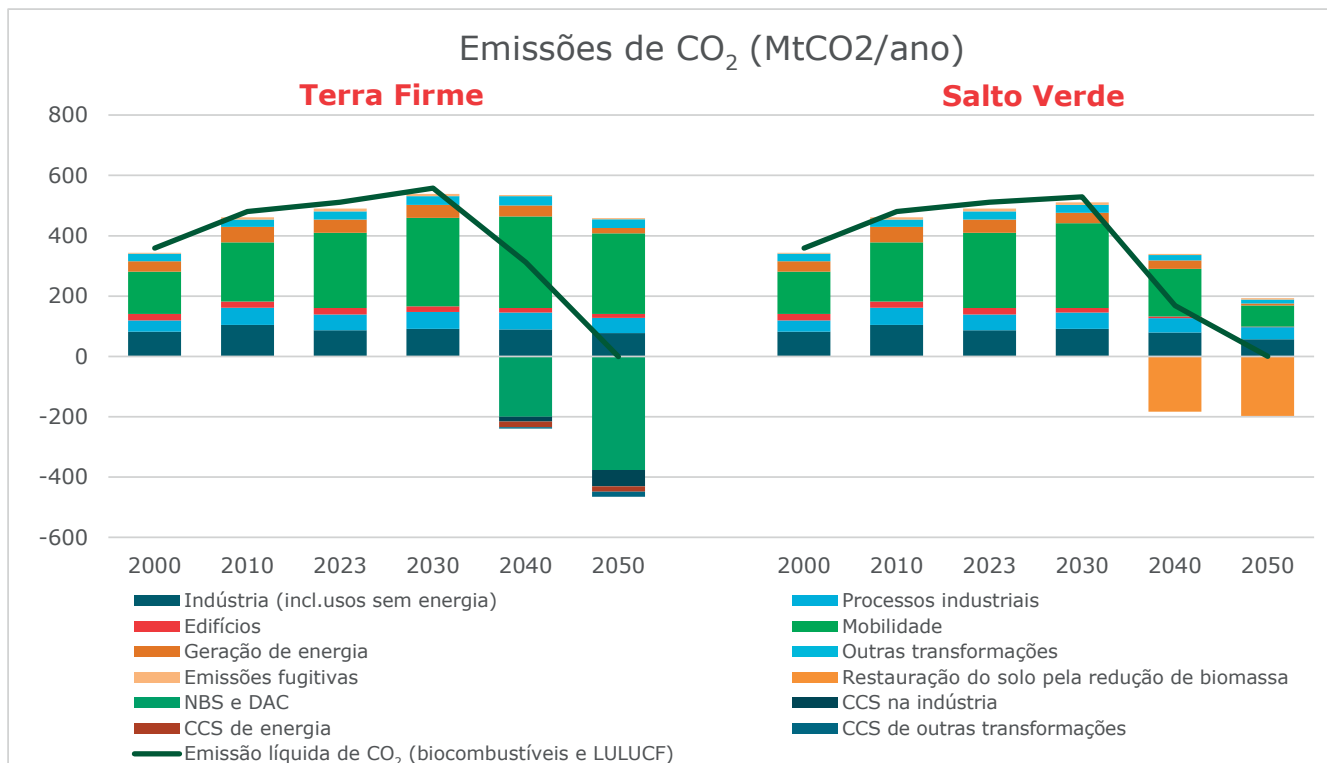


Figura 21 – Jornada rumo à Emissão Líquida Zero

Para atingir emissões líquidas zero, também são necessárias, consequentemente, 400 MtCO₂ por ano em Soluções Baseadas na Natureza (NBS) ou alternativas como a Captura de Ar Direto (DAC). A existência desse potencial e seu custo para a economia brasileira estão além do escopo deste relatório.

Em **Salto Verde**, as emissões residuais atingem 200 MtCO₂ por ano em 2050. A redução de emissões proveniente da restauração de terras por meio da redução da biomassa proporciona uma redução de 200 MtCO₂ por ano, considerando que 50% da terra seja devolvida à natureza. Portanto, não há necessidade de recorrer a soluções adicionais de NBS, DAC ou CCS. Por si só, a rápida modernização da economia resulta em uma economia líquida zero até meados do século

O potencial para emissões líquidas negativas do setor é, contudo, considerável, estimado em 600 MtCO₂ por ano até 2030 e em até 1.950 MtCO₂ por ano até 2050. Considerando uma concretização de 10% desse potencial até 2050, a redução seria equivalente às emissões atuais do Paquistão; uma concretização de 20%, a uma redução equivalente às emissões atuais da África do Sul; e uma redução de 30% praticamente compensaria as emissões da França atual. O Brasil, portanto, possui o potencial para se tornar um sumidouro líquido de carbono para o mundo e contribuir de forma singular para a mitigação das mudanças climáticas globais.

O Brasil como sumidouro de carbono líquido para o mundo

Acima, não consideramos as emissões relacionadas ao uso da terra, notadamente o reflorestamento (Uso da terra, Mudança no uso da terra e Silvicultura – LULUCF). No texto acima, não consideramos as emissões relacionadas ao uso da terra, especialmente ao reflorestamento e à arborização (Uso da terra, Mudança no uso da terra e Silvicultura – LULUCF). Portanto, não integramos quaisquer suposições relacionadas a uma possível redução adicional.

Embora este relatório não esteja especificamente focado neste setor de atividade, fornecemos aqui uma perspectiva simples das implicações mais amplas associadas à sua evolução. Até hoje, as emissões associadas ao LULUCF são positivas, ou seja, o aumento das emissões provenientes do desmatamento e das atividades agrícolas superou o crescimento florestal e os esforços de restauração. Essas emissões, no entanto, diminuíram significativamente desde uma década atrás [96]. Elas representam hoje cerca de 350 MtCO₂ por ano.

The background of the page is a close-up, artistic rendering of the Brazilian national flag. The green and gold stripes are prominent, with the blue starry field and the white banner containing the motto "Ordem e Progresso" visible. The flag appears to be draped or flowing, creating a sense of movement. In the lower right quadrant, a large, bold, green number "7" is superimposed over the flag's colors.

**O que levar em
consideração**

7

O que levar em consideração

Cascata global

A Figura 22 resume a discussão acima e apresenta o nível de emissões de 2023, a evolução de referência das emissões (excluindo todas as outras transformações mencionadas neste relatório) e, em seguida, a contribuição de cada fator individualmente. Este gráfico em cascata fornece mais informações sobre os principais fatores de descarbonização em jogo, em ambos os cenários.

Primeiro, o crescimento da demanda de energia é agravado pela eficiência energética e pelos efeitos de rebote. Os fatores de alavancagem da descarbonização envolvidos em ambos os cenários são, no entanto, muito diferentes. Devido às limitações da infraestrutura elétrica em **Terra Firme**, a eletrificação oferece oportunidades limitadas para a descarbonização. O recurso à captura e armazenamento de carbono (CCS) e a outras soluções de emissões negativas (NBS, DAC) é, portanto, obrigatório para atingir uma economia líquida zero até 2050. Em contraste, o cenário **Salto Verde** aproveita a eletrificação rápida e a oportunidade associada de restaurar parte das terras liberadas da produção de biomassa à natureza para atingir uma economia líquida zero até 2050, sem recorrer à CCS ou a outras emissões negativas.

Principais conclusões

Principal conclusão 1 – O papel fundamental da infraestrutura elétrica para aproveitar o potencial de energia renovável do Brasil

Os dois cenários apresentados neste relatório destacam o significativo potencial do Brasil para gerar maior abundância e elevar o padrão de vida nas próximas décadas, além de desenvolver uma potência industrial moderna e sustentável. Esse desenvolvimento é notavelmente possível devido à enorme disponibilidade de energias renováveis no Brasil. O potencial técnico é de 300.000 peta joules por ano [87], ou quase 30 vezes as necessidades atuais.

As energias renováveis já representam 46% do fornecimento total de energia e 90% da geração de energia no Brasil. O fato de metade do fornecimento de energia do país não provir de fontes renováveis está relacionado ao baixo nível de eletrificação da economia brasileira, estimado em cerca de 18% em 2023. Em ambos os cenários, a modernização da economia leva a um aumento da participação da eletricidade na matriz energética. Entretanto, o cenário **Terra Firme** pressupõe restrições significativas ao desenvolvimento da infraestrutura de suporte, enquanto o cenário **Salto Verde**, ao contrário, levanta a hipótese de que as barreiras ao seu desenvolvimento sejam ativamente removidas. A conclusão é que o destino de ambos os cenários é muito diferente após 2030, com a participação da eletricidade na matriz energética variando entre 30% e 58% até 2050 e níveis absolutos de geração de eletricidade entre 1.400 e 2.300 TWh, ou seja, um aumento de 2 a 3 vezes.

A eletrificação permite explorar os significativos recursos eólicos e solares disponíveis no Brasil, impulsionando um aumento na participação das energias renováveis no fornecimento total de energia.

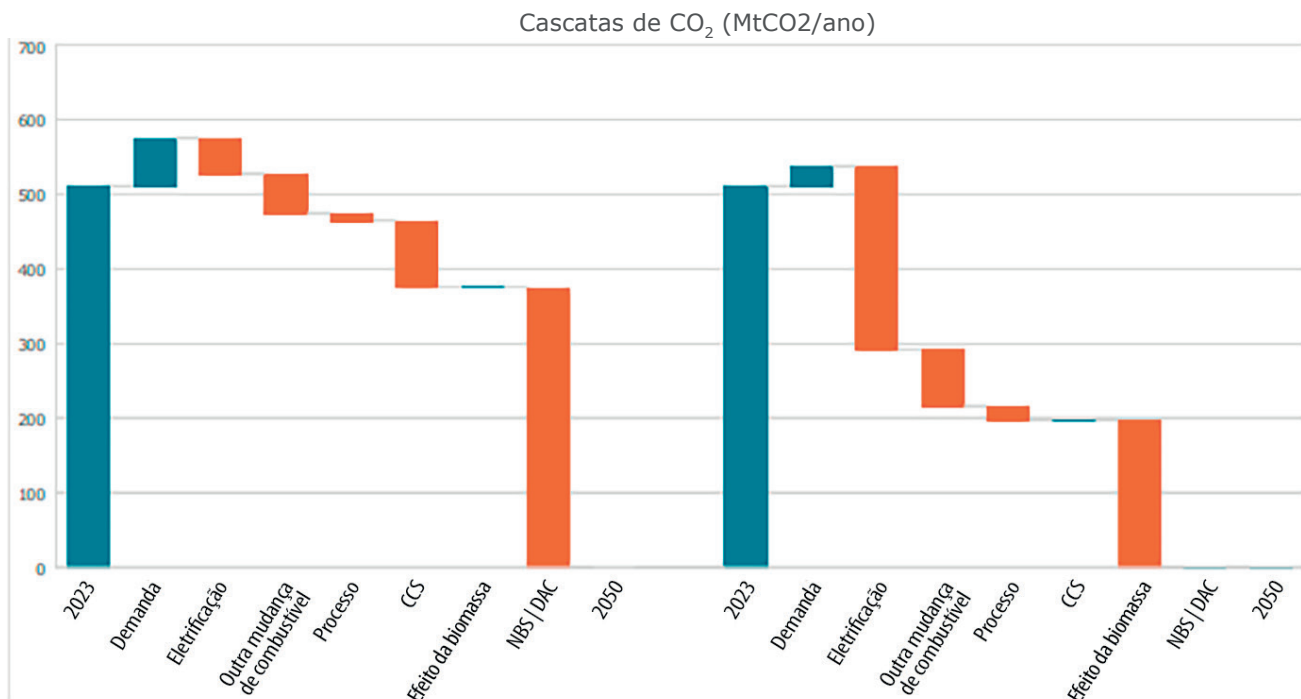


Figura 22 – Cascata global

Tabela 2 – Resumo dos cenários

Resumo do Brasil									
	Evolução histórica			Terra Firme			Salto verde		
	2000	2010	2023	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Emissões de GEE									
Emissões de CO2 no escopo coberto	359	480	511	558	551	465	530	351	197
Emissões de CO2 no escopo coberto com biocombustíveis/ impacto de emissões negativas	359	480	511	558	312	0	529	168	0
Demanda final de energia									
Demanda final de energia (PJ)	7,039	9,897	11,533	13,021	14,377	14,681	12,703	12,881	12,724
Participação de biomassa na demanda de energia final (%)	24%	29%	31%	28%	26%	26%	28%	20%	12%
Participação da eletricidade (%)	16%	16%	18%	22%	26%	30%	22%	43%	58%
Participação de combustíveis fósseis (%)	59%	55%	51%	50%	46%	39%	49%	31%	16%
Geração de energia									
Geração de energia (TWh)	445	592	718	949	1,205	1,422	954	1,788	2,386
Participação de comb. fóssil (%)	9%	12%	9%	7%	6%	2%	7%	4%	1%
Participação de energia hidrelétrica (%)	87%	79%	61%	48%	44%	39%	49%	30%	20%
Participação de solar/eólica (%)	0%	0%	20%	36%	43%	54%	35%	58%	74%
Participação da energia Solar Distribuída (%)	0%	0%	0%	3%	7%	13%	3%	4%	5%
Indústria									
Demanda final de energia (PJ)	2,739	3,980	4,159	4,458	4,950	5,330	4,487	5,113	5,768
Participação da eletricidade (%)	19%	18%	19%	22%	25%	27%	23%	34%	46%
Participação de aço e minerais na demanda geral de energia para a indústria (%)	37%	30%	25%	27%	34%	40%	27%	40%	52%
Siderurgia									
Produção de aço (Mt)	28	33	32	46	69	89	47	83	129
Participação de hidrogênio (%)	0%	0%	0%	1%	16%	36%	1%	43%	60%
Minerais não metálicos									
Produção de cimento (base 100)	65	121	100	112	125	142	112	134	158
Participação da eletricidade (%)	10%	10%	12%	12%	13%	14%	12%	13%	14%
Produtos químicos									
Produção de produtos químicos (base 100)	96	106	100	110	135	138	109	124	152
Participação da eletricidade (%)	24%	29%	33%	33%	36%	38%	35%	57%	87%
Outras indústrias									
Produção (base 100)	72	100	100	109	114	116	110	115	118
Participação da eletricidade (%)	25%	21%	21%	25%	31%	36%	27%	48%	81%
Edifícios									
Demanda final da energia (PJ)	1,267	1,505	1,858	2,071	1,979	1,913	1,897	1,861	1,892
Participação da eletricidade (%)	46%	52%	60%	66%	72%	80%	65%	84%	95%
Residencial									
Superfícies (Mm2)	1,933	2,499	2,940	3,180	3,754	4,877	3,180	4,847	6,501
Superfície per capita (m2 / cap)	11	13	14	14	16	21	14	21	28
Taxa de penetração de aquecimento elétrico de água	22%	34%	39%	39%	51%	70%	43%	73%	87%
Taxa de penetração de cozimento elétrico	0%	0%	0%	4%	15%	20%	19%	71%	91%
Taxa de penetração de Ar Condicionado	0%	7%	33%	62%	70%	70%	45%	90%	100%
Serviços									
Superfícies (Mm2)	643	792	948	983	970	914	983	938	880
Superfície per capita (m2 / cap)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Taxa de penetração de aquecimento elétrico de água	46%	75%	76%	80%	91%	97%	80%	91%	97%
Taxa de penetração de cozimento elétrico	0%	0%	0%	6%	12%	19%	16%	66%	87%
Taxa de penetração de Ar Condicionado	0%	12%	45%	70%	70%	70%	70%	90%	100%
Data Centers									
Demanda de energia final (PJ)	0	0	0	61	159	159	61	276	276
Mobilidade									
Demanda de energia final (PJ)	2,176	3,298	4,419	5,090	5,546	5,430	4,958	3,842	3,139
Participação da eletricidade (%)	0%	0%	0%	1%	4%	9%	3%	24%	49%
Passageiros									
Total de PKMs (Gpkm)	387	780	1,312	1,852	1,937	1,948	1,832	1,757	1,727
Total de PKMs/Capita (km/cap/ano)	2,200	3,971	6,063	8,272	8,416	8,436	8,182	7,635	7,479
Participação de BEVs na venda de veículos leves	0%	0%	1%	11%	20%	48%	31%	100%	100%
Atividade de frete									
Total de TKM	657	971	1,455	1,645	1,772	1,866	1,645	1,772	1,866

Devido às restrições mencionadas acima, espera-se que esta participação permaneça estável em **Terra Firme** em torno de 50%, mas aumenta para 70% em **Salto Verde**.

Em **Terra Firme**, as restrições na disponibilidade de infraestrutura limitam o crescimento da demanda por eletricidade, e surge uma “competição por energia”, levando a aumentos de preços e implicações em cascata como resultado.

- O acesso a eletrodomésticos modernos é mais restrito (por exemplo, 70% de penetração de ar condicionado até 2050 versus acesso universal em **Salto Verde**).
- A expansão de data centers enfrenta problemas de integração (26 GW implantados versus 45 GW).
- A penetração de veículos elétricos é mais limitada (20% das vendas em 2040 versus 100% para veículos leves).
- O desenvolvimento das indústrias de exportação de aço verde e produtos químicos verdes é mais limitado (produção de aço 30% menor até 2050 em **Terra Firme** e produção de produtos químicos 15% menor).
- A substituição de combustíveis fósseis e/ou biomassa é mais difícil (a participação de combustíveis fósseis cai 10 pontos percentuais na matriz energética, em comparação com 35 pontos percentuais em **Salto Verde**, e a participação de biomassa cai 5 pontos percentuais, em comparação com 19 pontos percentuais).
- Para lidar com essas limitações, a penetração da geração distribuída (ou seja, energia solar em telhados) acelera, principalmente no setor residencial (200 TWh contra 100 TWh em **Salto Verde**).

A economia brasileira se moderniza rapidamente em ambos os cenários, mas o formato e o ritmo desse desenvolvimento em **Terra Firme** são limitados pela disponibilidade de infraestrutura. Por outro lado, **Salto Verde** apresenta uma trajetória de rápida transformação econômica, baseada na disponibilidade de quantidades significativas de energia elétrica renovável a preços acessíveis.

Conclusão 2 – O nexo de biomassa-mobilidade-emissões

Ambos os cenários mostram trajetórias de emissões divergentes. Em **Terra Firme**, as emissões diminuem apenas ligeiramente, de cerca de 500 MtCO₂ por ano para cerca de 460 MtCO₂ por ano em 2050. O desenvolvimento e o crescimento compensam a modernização e a descarbonização. Com esse nível de emissões residuais, o Brasil precisa se concentrar na implantação de grandes volumes de emissões negativas, incluindo CCS (cujo potencial estimamos em pouco menos de 90 MtCO₂ por ano) e NBS e DAC para as emissões restantes. A análise acima sobre LULUCF mostra que existe um forte potencial para alavancar Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para compensar as emissões remanescentes.

Salto Verde, no entanto, apresenta uma trajetória consideravelmente diferente. A rápida modernização dos usos finais, apesar dos efeitos de rebote na demanda (ou seja, desenvolvimento econômico), leva as emissões residuais de 2050 a mais da metade dos níveis atuais, atingindo cerca de 200 MtCO₂ por ano.

A chave para essa redução é a eletrificação do setor de mobilidade (e notadamente a mobilidade rodoviária), que responde hoje por cerca de metade das emissões. Entretanto, a eletrificação da mobilidade não apenas contribui para reduzir as emissões do Brasil, como também libera terras da produção de biocombustíveis, terras que, por sua vez, podem ser devolvidas à natureza. É por isso que falamos aqui de um nexo biomassa-mobilidade-emissões. Nosso modelo mostra que até 33 milhões de hectares de terra poderiam ser liberados da exploração com a eletrificação dos usos finais (principalmente a mobilidade). Uma parcela de 50% dessa terra restaurada à natureza poderia gerar 200 MtCO₂ por ano de emissões negativas, mantidas inalteradas todas as outras coisas,

ajudando o Brasil a atingir uma economia líquida zero sem qualquer outra intervenção (ou seja, CCS, DAC ou o uso de outras Soluções Baseadas na Natureza - NBS). O CCS e DAC representam um custo líquido para a sociedade e, portanto, seriam evitados. A implantação de SbN adicionais poderia tornar o Brasil um país com emissões negativas antes de 2050 e apoiar a mitigação global das mudanças climáticas.

Essa importante descoberta sugere que, independentemente das porcentagens reais consideradas, a descarbonização da economia brasileira está mais ao nosso alcance do que se costuma pensar.

A Tabela 2 apresenta um resumo das transformações em jogo dentro de cada cenário.

Limites e pesquisa adicional

Os cenários são experimentos mentais, não previsões. Eles são construídos para testar suposições e analisar seu impacto em sistemas agregados, como o de energia. Este exercício não difere de outros nesse aspecto. O que nossos cenários testaram, e o que esperamos que constitua uma contribuição significativa para o debate, são mudanças importantes nos padrões de consumo decorrentes da rápida implantação de novas tecnologias. Naturalmente, esse tipo de exercício traz consigo incertezas, e resumimos neste capítulo algumas das principais suposições que poderiam ser questionadas em exercícios futuros.

Identificamos 5 caminhos principais para pesquisas futuras.

1. É necessário um foco mais aprofundado na indústria da construção.

Uma descoberta fundamental deste relatório é o papel sistêmico da indústria de construção na transição energética global. Apesar de consumir uma fração da energia final por si só, a indústria da construção utiliza parcelas significativas de materiais de todos os tipos (cimento, aço, metais, plásticos, etc.). Seu desenvolvimento também está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico, visto que a urbanização e a riqueza são fortes impulsionadores das atividades de construção.

Em nossos cenários, adotamos premissas importantes em termos da evolução do parque imobiliário, além dos indicadores tradicionais de atividade econômica (por exemplo, população, PIB). Embora tenhamos avaliado o impacto de estilos de vida mais conectados no desenvolvimento futuro do parque imobiliário (por exemplo, home office, compras e entretenimento online), uma premissa fundamental foi a expansão do parque residencial graças a estilos de vida mais modernos e conectados. A extensão desse desenvolvimento permanece discutível e poderia ser objeto de pesquisas futuras. Ela também é impactada por políticas públicas.

Também assumimos uma melhoria limitada nas técnicas de construção nas próximas décadas, apesar do surgimento de novas tecnologias. O setor da construção civil permanece, de fato, fortemente regulamentado, fragmentado e propenso à inércia. Embora haja evidências significativas de um maior potencial disruptivo [44, 97], a extensão e o ritmo dessa mudança podem ser ainda mais questionados. Isso é ainda mais crítico, pois tem um impacto significativo na evolução geral da demanda por aço e cimento (e particularmente aço em nossos cenários), e define, em grande medida, a evolução futura desses setores (embora, para o aço, a evolução da indústria automotiva e da mobilidade também precise desempenhar um papel não negligenciável).

2. Como as tecnologias digitais vão transformar efetivamente a economia

A tecnologia digital é uma das principais tecnologias que levam à rápida modernização da economia brasileira e do resto do mundo. Os efeitos dessa digitalização da economia ainda não foram totalmente compreendidos. Neste relatório, as tecnologias digitais servem a múltiplos propósitos: contribuem para maior produtividade e eficiência energética em edifícios e na indústria (incluindo a construção civil) e são um poderoso impulsionador de novos modelos de negócios.

A extensão desses desenvolvimentos e seus benefícios provavelmente devem ser investigados mais a fundo. Dado o ritmo de inovação no setor, muitas aplicações e serviços novos podem surgir, o que poderia melhorar significativamente a situação. A circularidade, em particular, está em um estágio muito inicial no Brasil (e globalmente) e pode remodelar massivamente os setores industriais e as cadeias de valor como os conhecemos, de maneiras muito maiores do que as modeladas neste relatório. Adicionalmente, não fizemos nenhuma suposição sobre manufatura distribuída neste relatório, apesar do seu potencial para remodelar o desenvolvimento industrial.

Essa inovação pode levar a novos serviços que ainda não foram previstos, o que poderia gerar efeitos de rebote ou de nova demanda ainda não contabilizada. Embora tenhamos fornecido uma previsão para o setor de TI, também é necessário mais trabalho para adequar essa análise inicial aos futuros desenvolvimentos de uma economia digital no Brasil.

3. É necessário mais trabalho sobre o real potencial da eletrificação

Uma descoberta fundamental deste relatório é o aumento da participação da eletricidade na matriz energética final, dada a significativa modernização da economia. Até 2050, a participação da eletricidade na demanda final de energia aumenta de 18% para 30-58%. Essa proporção ultrapassa 80% nos setores de manufatura e química (**Salto Verde**), acima de 90% em edifícios e 50% em mobilidade. Além disso, o hidrogênio ou seus derivados combustíveis (produzidos a partir da eletricidade) contribuem com outros 20% para a demanda de energia na indústria e 80% para o transporte aéreo e marítimo nesse cenário.

Essas previsões podem ser conservadoras. De fato, excluímos de nossa análise tecnologias de processo alternativas baseadas em eletricidade que apresentam hoje um baixo Nível de Prontidão Tecnológica (TRL), como, por exemplo, a eletro extração no aço ou o aquecimento por plasma para minerais. Mais importante ainda, não consideramos como a combinação do acesso a um recurso abundante de eletricidade com novas formas de armazenamento de energia (por exemplo, armazenamento de calor em alta temperatura) poderia transformar as instalações industriais existentes. Em um setor como o de cimento, por exemplo, depender de tal infraestrutura poderia, em teoria, ajudar a eliminar completamente o consumo de combustíveis fósseis.

Mais trabalho é necessário, no entanto, para avaliar o verdadeiro potencial da eletrificação da economia brasileira, particularmente na indústria, apesar de um potencial tecnológico reconhecido [66, 67, 98]. Uma questão crucial também será a disponibilidade da infraestrutura elétrica para suprir todas essas necessidades. Mais pesquisas são, portanto, necessárias sobre as principais restrições geográficas, econômicas e institucionais que podem limitar o acesso à eletricidade renovável, como mostram os dois cenários.

4. O Nexo Mobilidade – Biomassa - Emissões

A mobilidade representa, em 2023, quase 40% da demanda final de energia e quase 50% das emissões (no âmbito abrangido), provenientes essencialmente do transporte rodoviário privado. No entanto, a mobilidade per capita situa-se hoje em cerca de 6.000 km por pessoa por ano, um valor muito inferior ao da Europa contemporânea, que ronda os 11.000 km por pessoa por ano. Em ambos os cenários, a procura aumenta para cerca de 7.500-8.500 km por pessoa por ano, estabilizando-se depois nesses níveis. Esta estabilização resulta de estilos de vida mais conectados e de ambientes urbanos mais bem organizados (com, por razões semelhantes, uma procura que se prevê diminuir na Europa). Dada a importância dos transportes no sistema energético, estas premissas poderiam ser mais bem investigadas.

Uma das principais conclusões deste relatório é o potencial, à medida que a eletrificação avança, de devolver à natureza grandes áreas atualmente dedicadas à produção de biocombustíveis. À medida que essa transição ocorre, as emissões negativas associadas contribuem significativamente para alcançar uma economia com emissões líquidas zero até 2050 ou antes.

No entanto, é necessário mais trabalho para refinar ainda mais o potencial futuro dessas emissões negativas e, principalmente, discutir o ritmo e a extensão da mudança que é possível.

Tal trabalho também deve analisar a questão mais ampla das emissões de LULUCF e dos desenvolvimentos agrícolas. Futuras arbitragens entre o desenvolvimento agrícola (e as exportações) e a gestão florestal exigiriam um esforço adicional. O potencial para o desenvolvimento de biogás (notadamente a partir do enorme volume de resíduos agrícolas) também poderia ser investigado mais a fundo.

Por fim, deve-se considerar um foco maior nas emissões totais de gases do efeito estufa. Nosso relatório, de fato, concentrou-se em cerca de 500 MtCO₂ por ano de emissões de carbono, negligenciando as 350 MtCO₂ por ano de LULUCF e as 600 MtCO₂ por ano de emissões agrícolas não relacionadas ao CO₂.

5. Outros tópicos que não consideramos

Como explicado na introdução, um esforço prospectivo como este, sobre novas tecnologias e como elas podem remodelar a demanda de energia não pode ser considerado exaustivo. Portanto, mais pesquisas são necessárias para refinar ainda mais o panorama das inovações e seu potencial de desenvolvimento. Notavelmente, há alguns elementos que deixamos de lado voluntariamente nesta etapa.

Estes incluem, principalmente, o desenvolvimento de novos projetos de materiais que poderiam substituir os existentes e transformar ainda mais os desenvolvimentos industriais de maneiras que não podemos projetar nesta fase.

Mais importante ainda, estes incluem também os efeitos das mudanças climáticas na economia e como as transformações aceleradas dos ecossistemas naturais podem levar a uma grande adaptação da economia no período até 2050.





Anexo

Anexo

Modelo POLES e “módulo de demanda”

Utilizamos o modelo POLES da Enerdata para rodar os cenários. O POLES é um modelo de equilíbrio parcial, com cobertura global, para projeções de longo prazo de energia e emissões de GEE até 2070 (Figura A1).

- O horizonte temporal é 2070 com resolução anual.
- O modelo utiliza uma simulação recursiva: todas as variáveis são calculadas para o ano t antes do cálculo do ano t+1. Os resultados do ano t impactam os cálculos do ano t+1.
- A modelagem da demanda de energia é uma combinação de parâmetros econométricos e tecnoeconômicos; uma abordagem de baixo para cima mais detalhada é utilizada para o fornecimento de eletricidade.

- O modelo é simulado utilizando-se o software Vensim, um software de simulação desenvolvido pela Ventana Systems.

Módulo de Demanda

Como muitos modelos, as premissas disponíveis sobre a demanda já oferecem uma ampla gama de possibilidades, mas adicionamos um “módulo de demanda” específico para integrar ainda mais as mudanças sofisticadas na estrutura de certas atividades econômicas que os modelos atuais não conseguem reproduzir facilmente (Figura A2).

O “módulo de demanda” avalia exogenamente a evolução das tendências dos parâmetros-chave e as reinsere no modelo POLES principal.



Figura A1 – Visão geral do modelo POLES

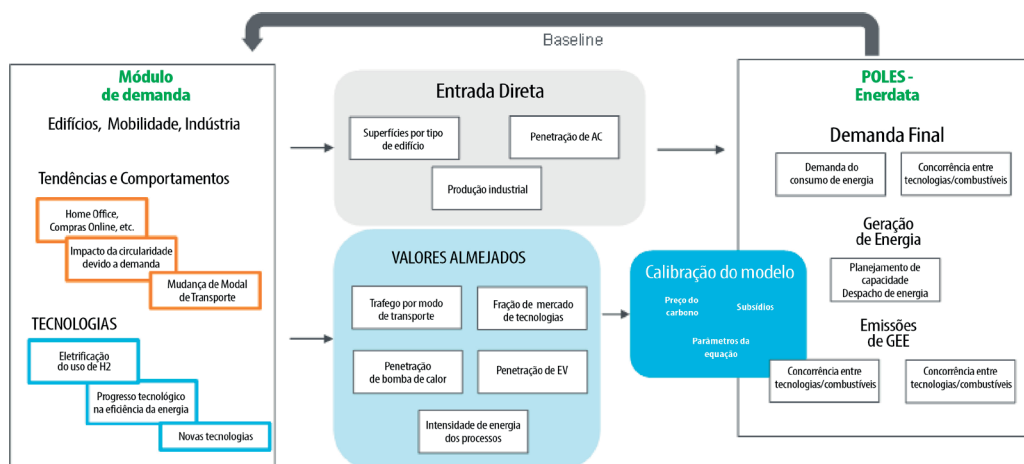


Figura A2 – Modelo POLES, descrição estilizada do módulo de demanda

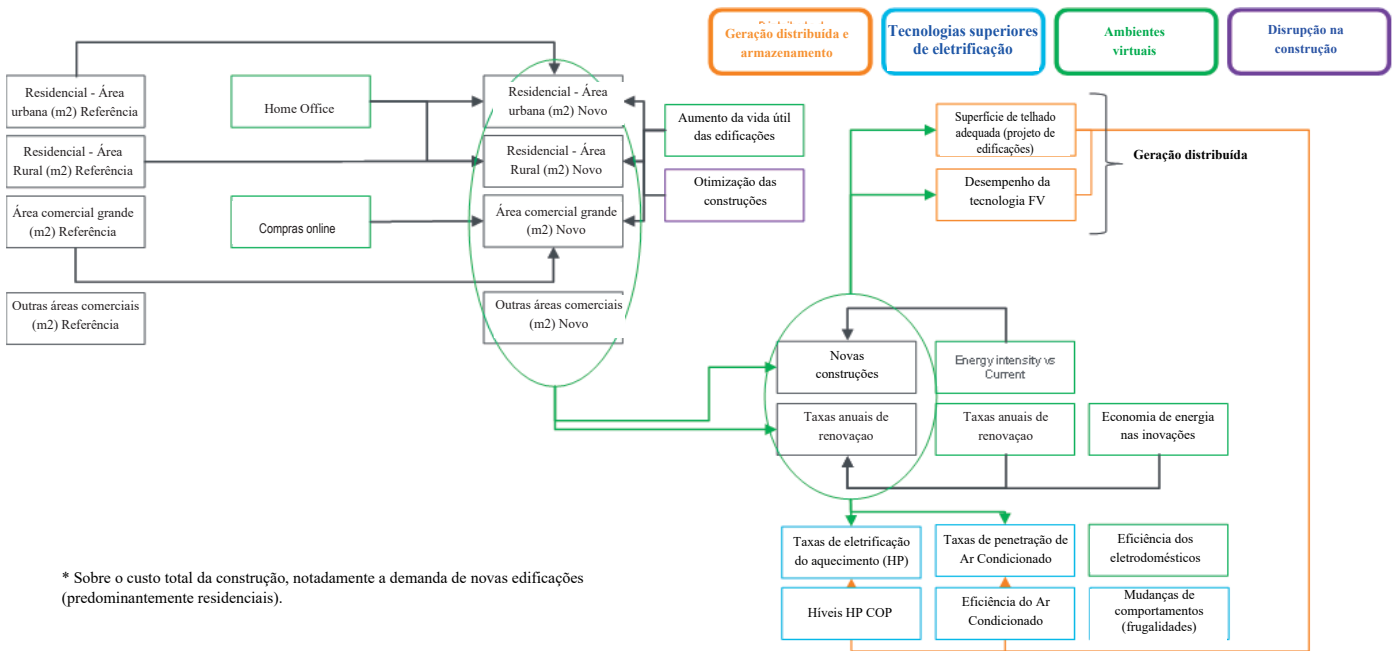


Figura A3 – Módulo de demanda, Edifícios

Modelo POLES

- Alguns são entradas diretas já disponíveis no POLES.
- Outros não estão disponíveis e, portanto, representam “valores-alvo” que são alcançados nos resultados finais do modelo por meio de extensa calibração, aproveitando parâmetros como preços de carbono, subsídios ou parâmetros específicos da equação.

Descrição do módulo de demanda – Edifícios

Consideramos quatro transformações principais: geração e armazenamento distribuídos; condicionamento e tecnologias de espaço superiores; ambientes virtuais; e interrupção da construção (Figura A3).

Geração distribuída

Este aspecto é tratado fora do modelo.

Utilizamos um estudo diferente do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ sobre o potencial de geração distribuída por região [92], avaliando o espaço adequado nos telhados em todo o parque imobiliário e projetando suposições sobre as taxas de penetração até 2050, considerando diferentes taxas de melhorias econômicas. Neste relatório, também extrapolamos essas tendências para 2070.

Tecnologias de eletrificação superiores

Analisamos especificamente a taxa de penetração de vários equipamentos, principalmente sistemas de aquecimento e refrigeração, mas também sistemas de cozimento elétrico (consideramos que a taxa de penetração de outros eletrodomésticos é definida pelo desenvolvimento econômico). As bombas de calor poderiam se beneficiar de um incentivo da política, sendo naturalmente impulsionadas pela eletricidade cada vez mais acessível proveniente da geração distribuída. Os sistemas de ar condicionado poderiam penetrar o parque imobiliário mais rapidamente do que o crescimento do PIB sugere (principalmente devido a externalidades como as mudanças climáticas). Também incluímos no modelo o possível impacto da suficiência, que pode afetar a demanda geral de energia em edifícios, pelo menos em certas regiões geográficas.

Ambientes virtuais

A crescente digitalização dos ambientes residenciais terá três tipos de impacto:

-Primeiro, consideramos premissas importantes sobre a penetração do home office e das compras online e como isso poderia afetar a oferta de imóveis em diferentes tipos de edifícios (principalmente residenciais, comerciais e de varejo). Isso também teria um impacto indireto na extensão da vida útil e na reutilização dos edifícios, afetando ainda mais a evolução do parque imobiliário.

- Em segundo lugar, as tecnologias digitais podem dar uma importante contribuição para a otimização da intensidade energética dos edifícios. Portanto, revisitamos as premissas típicas sobre a otimização da intensidade energética dos edifícios (juntamente com programas de renovação orientados por políticas) para incluir o seu impacto na evolução da intensidade energética.

- Em terceiro lugar, a eficiência dos eletrodomésticos também continuará a melhorar e, de fato, a convergência de dispositivos poderá também gerar ganhos de eficiência adicionais nesta área. Adotamos premissas importantes a este respeito.

Disrupção na construção

A disrupção significativa e positiva no setor da construção (impulsionada por tecnologias digitais) permite ganhos de produtividade consideráveis, nomeadamente na forma de eliminação de matérias-primas em grande escala (aço, cimento), ao mesmo tempo que otimiza a execução e reduz o desperdício a níveis mínimos. Com isso, os custos de construção diminuem. Resulta disso um acesso mais acessível à habitação, impulsionando um rebote na procura por edifícios residenciais que, ainda mais amplificada pela menor necessidade de deslocamento devido à digitalização, aponta para novas formas urbanas. Também são consideradas premissas específicas sobre o desempenho do entorno do edifício como resultado de novas normas de construção.

Descrição do módulo de demanda – Mobilidade

Quatro transformações principais são analisadas: eletrificação do transporte rodoviário; mobilidade como serviço e sistemas multimodais; veículos autônomos; e novos combustíveis (Figura A4).

Eletrificação do transporte rodoviário

Analisamos as taxas de eletrificação do transporte privado e de carga para carros, caminhões e ferrovias. Embora o modelo utilize fatores como PIB e curvas de aprendizado tecnológico, também integramos a dinâmica de adoção pelo consumidor. Também integramos em nossa avaliação o impacto de uma tecnologia se tornar o modelo dominante rapidamente em um setor (por exemplo, veículos elétricos) e seu possível efeito de rede em serviços adjacentes (por exemplo, maior disseminação no transporte rodoviário de cargas). A taxa de penetração de sistemas elétricos no transporte ferroviário é principalmente resultado de um ambiente orientado por políticas.

Mobilidade como serviço, sistemas multimodais e veículos autônomos

Analisamos primeiro os passageiros-quilômetro (pkm). Além das taxas naturais de crescimento decorrentes do aumento da riqueza e da população, também consideramos os efeitos de rede observados em edifícios (escritórios domésticos, etc.), os de um serviço de mobilidade cada vez mais acessível (com veículos autônomos), uma melhoria nos sistemas de transporte multimodal, bem como possíveis mudanças nos hábitos de viagem (novos hábitos de viagem para turismo, caronas, etc.). Aplicamos uma abordagem semelhante ao frete e toneladas-quilômetro (tkm). O que analisamos, em particular, é o impacto da transformação do varejo (compras online), da circularidade (por exemplo, economia compartilhada) e da ascensão da manufatura distribuída (produção e consumo locais de bens) nos sistemas logísticos.

Em segundo lugar, analisamos os veículos-quilômetro (vkm), que também contabilizam o número de veículos nas estradas (isso não se aplica a hidrovias e ferrovias). Nesse ponto, exploramos como novas tecnologias e, mais importante, novos comportamentos do consumidor (menor dependência de um carro, relutância em possuir um veículo, etc.) podem afetar ainda mais as projeções de estoques de veículos nas estradas.

Novos combustíveis

Por fim, consideramos opções alternativas no transporte rodoviário (células de combustível, biocombustíveis) e no transporte aéreo e marítimo (células de combustível, biocombustíveis, combustíveis sintéticos). Embora isso seja amplamente impulsionado pelo modelo, suas curvas de aprendizado e nossas suposições exógenas sobre políticas, também verificamos a penetração dos biocombustíveis à luz do fornecimento sustentável e revisitamos a implantação de células de combustível à luz das necessidades de infraestrutura e da emergência realmente plausível ao lado de uma cadeia de suprimentos de veículos elétricos muito maior e totalmente integrada.

Descrição do módulo de demanda – Indústria

Analisamos quatro transformações principais: indústrias digitalizadas e melhores tecnologias disponíveis; novos processos industriais; circularidade; e manufatura distribuída (Figura A5).

Indústrias digitalizadas e melhores tecnologias disponíveis

Isso é abordado principalmente no modelo por meio de estimativas importantes de melhorias adicionais na intensidade energética (e de carbono) de processos industriais-chave.

Além disso, focamos nesses aspectos avaliando, em cenários ambiciosos, em que medida as disrupções tecnológicas (notadamente as provenientes de tecnologias digitais) poderiam acelerar ainda mais a convergência para os melhores níveis, mas também aprimorar aqueles mais próximos dos limites termodinâmicos.

Novos processos industriais

Isso se refere principalmente a processos para aço, cimento e produtos químicos. Além das iniciativas políticas, refinamos a taxa de penetração de processos alternativos ao longo do tempo. Isso tem a ver, por um lado, com o crescimento real da demanda por produtos (e, portanto, com as taxas subsequentes de rotatividade de estoque, veja Circularidade abaixo) e, por outro lado, com o nível de desenvolvimento tecnológico. Embora abordados no modelo, calibramos cuidadosamente essas taxas de penetração, considerando que é provável que ocorram novos avanços tecnológicos (enquanto a penetração pode ser limitada por rotatividades de estoque lentas). Para o aço, analisamos essencialmente o H-DRI (Redução Direta de Ferro por Hidrogênio). Para o cimento, analisamos a penetração de sistemas pré-fabricados na construção, bem como novas “receitas” de cimento (evoluções das proporções clínquer/cimento que podem levar a menores intensidades de carbono). Para os produtos químicos, focamos essencialmente nos plásticos e na taxa de penetração da reciclagem (tanto mecânica quanto química).

Circularidade

Primeiramente, precisamos levar em conta a multiplicidade de efeitos decorrentes das transformações em outros setores, como a evolução da pegada ecológica dos edifícios, a disrupção na construção civil (e seu impacto na demanda por aço e cimento) e a evolução dos serviços de mobilidade (mais ou menos veículos, conseqüentemente, diferentes dimensões da indústria automotiva e, portanto, impactos de segunda ordem na demanda por aço e produtos químicos – por exemplo, plásticos).

Em seguida, consideramos também o possível desenvolvimento de uma economia compartilhada, essencialmente focada em bens de consumo específicos, combinada com possíveis evoluções culturais (suficiência) em determinadas regiões. Esses fatores são complementados pelo desenvolvimento de mercados de segunda mão em diversos setores da indústria, com efeitos de segunda ordem na demanda por aço e produtos químicos.

Por fim, a substituição de materiais no cimento e a evolução das políticas em torno das embalagens (cerca de 40 a 50% da demanda por plásticos) têm um efeito nas previsões de produção de matéria-prima virgem.

Em conjunto, esses efeitos sobre a demanda também influenciam a taxa máxima alcançável de reciclagem e, conseqüentemente, a distribuição final da tecnologia nas indústrias siderúrgica e química.

Manufatura distribuída

Por fim, exploramos como a manufatura aditiva se dissemina por diversos setores industriais (automotivo, de máquinas e de bens de consumo) e o impacto de sua intensidade energética relativa (em comparação com os sistemas de produção convencionais) sobre a demanda energética total.

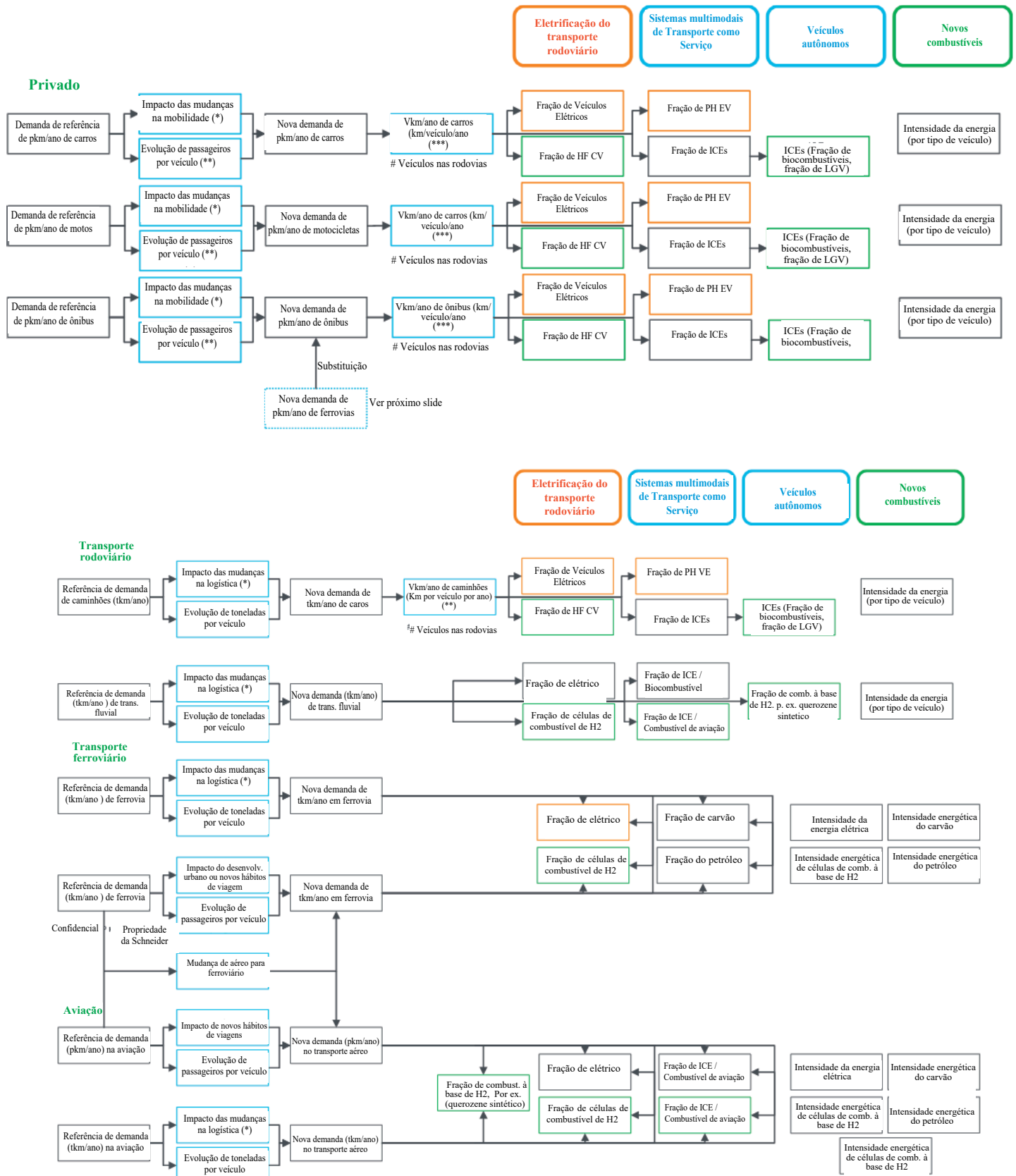
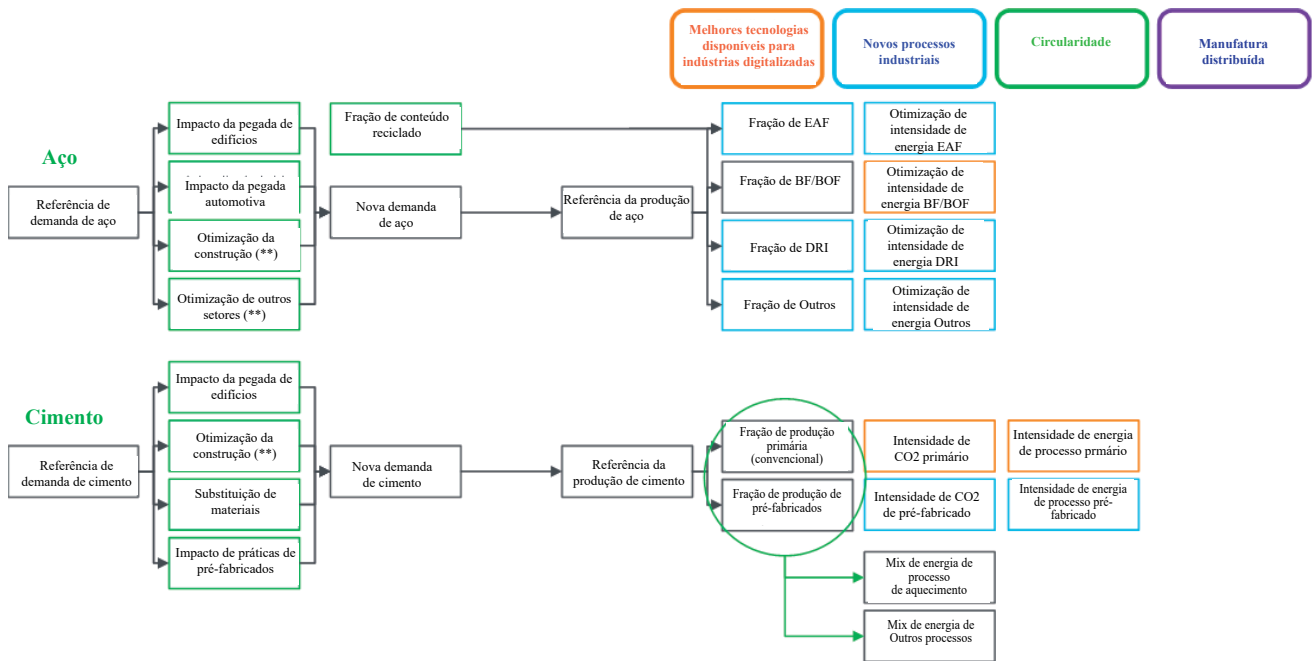
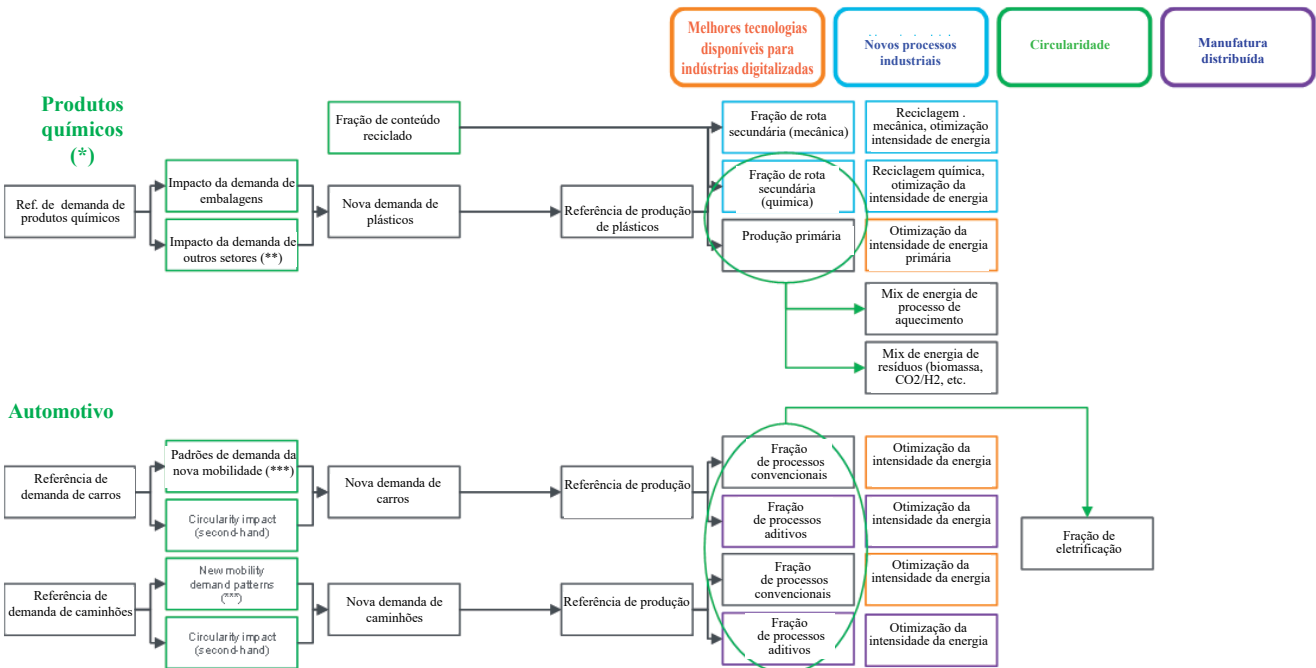


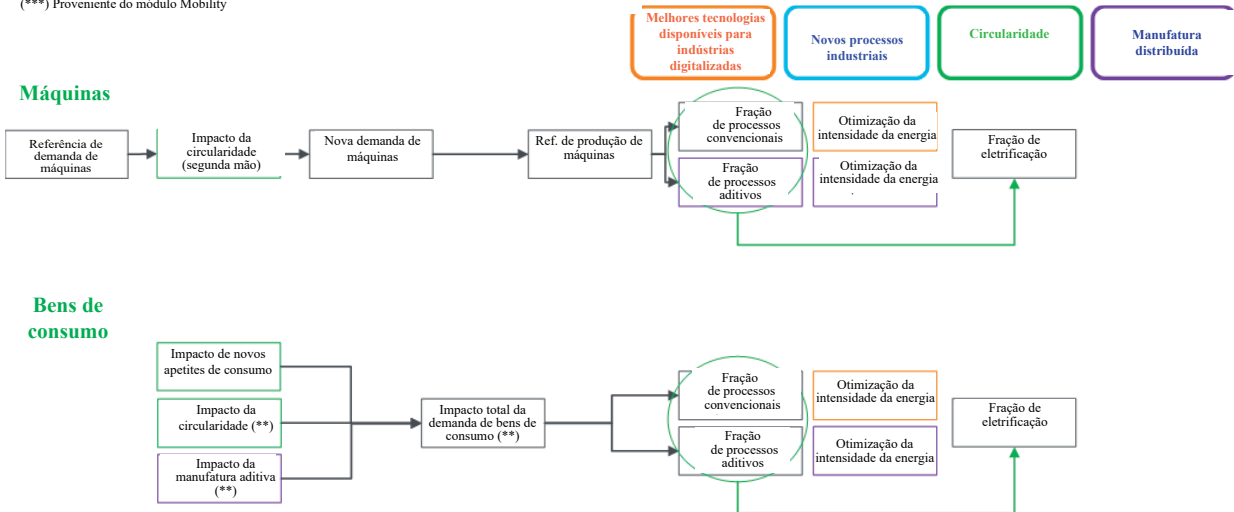
Figura A4 –Módulo de demanda, mobilidade



(*) Dos módulos Buildings e Automotive
 (**) Impacto de práticas mais eficientes e de projetos de novos edifícios
 (***) Máquinas, bens de capital, etc.



(*) Focamos apenas nas transformações de plásticos, entretanto poderíamos adicionar também em fertilizadores e amônia, se relevante na china. Isto não foi simulado em nosso exercício inicial.
 (**) Notadamente a partir de otimização de construções, evoluções de projeto automotivo e demanda.
 (***) Proveniente do módulo Mobility



(*) Frugalidades ou suficiência, evolução de hábitos culturais
 (**) Economia compartilhada, mercados de segunda mão, etc.
 (***) Rebote na demanda devido a recursos de fabricação descentralizados

Figura A5 – Módulo de demanda, Indústria

Tabela A1 – Premissas diretas e indiretas no módulo de demanda

Sector	Transformação	Premissa	Impacto direto	Efeito na rede (impacto indireto)	Direto / Almejado
Edifícios	Geração distribuída	Espaço adequado no teto	Geração EV	Cond. de ambiente (HP, AC)	Fora do modelo
Edifícios	Geração distribuída	Tecnologia EV	Geração EV	Cond. de ambiente (HP, AC)	Fora do modelo
Edifícios	Ar condicionado	HPS: penetração COP	Penetração de HP		Direto
Edifícios	Ar condicionado	ACS: penetração COP	Penetração de CA		Direto
Edifícios	Ar condicionado	Suficiência	Intensidade de energia da construção		Almejado
Edifícios	Ambientes virtuais	Home Office	Pegada do edifício	Mobilidade, indústria	Direto
Edifícios	Ambientes virtuais	Compras Online	Pegada do edifício	Mobilidade, indústria	Direto
Edifícios	Ambientes virtuais	Aumento da vida útil dos edifícios	Pegada do edifício	Indústria	Direto
Edifícios	Ambientes virtuais	Desenvolvimento intensivo da energia	Intensidade de energia da construção		Almejado
Edifícios	Ambientes virtuais	Economia de energia em reformas	Intensidade de energia da construção		Almejado
Edifícios	Ambientes virtuais	Taxas de renovações	Pegada do edifício		Direto
Mobilidade	Disrupção na construção	Otimização de custos	Pegada do edifício	Mobilidade, indústria	Direto
Mobilidade	Eletificação em rodovias	Penetração de EV e PHEV	Fração da distribuição		Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	Impacto dos edifícios	pkm		Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	MaaS, Multimodal, AV	pkm		Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	Mudança de modais (ônibus, ferroviário, avião)	pkm		Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	Cultura, modelos de mobilidade	vkmd	Indústria	Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	Impacto da indústria florestal	tkm		Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	Desenv. da tecnologia (ton por veículo)	tkm		Almejado
Mobilidade	MaaS, Multimodal, Avs	Desenv. da tecnologia AV	vkmd		Almejado
Indústria	Novos combustíveis	ICS, HFCV, Biocomb. comb. sintético	Fração da distribuição		Almejado
Indústria	Digital, BA	Desenvolvimento intensivo da energia	Intensidade de energia da construção		Almejado
Indústria	Digital, BA	Desenvolvimento intensivo do carbono	Intensidade de carbono da construção		Direto
Indústria	Novos processos digitais	Impacto do potencial de reciclagem	Produção de aço, cimento, prod. químicos		Direto
Indústria	Novos processos digitais	Compartilhar novos processos	Produção de aço, cimento, prod. químicos		Direto
Indústria	Circularidade	Impacto de edifícios	Produção de aço, cimento	Potencial de reciclagem	Direto
Indústria	Circularidade	Impacto da mobilidade	Produção de aço automotivo	Potencial de reciclagem	Direto
Indústria	Circularidade	Substituição de material	Produção de cimento	Potencial de reciclagem	Direto
Indústria	Circularidade	Práticas pré-fabricadas	Produção de cimento	Potencial de reciclagem	Direto
Indústria	Circularidade	Demanda por embalagem	Produção de prod. químicos	Potencial de reciclagem	Direto
Indústria	Circularidade	Mercados de segunda mão	Prod. de bens cons., máquinas, autos	Produção de aço e prod. químicos	Direto
Indústria	Circularidade	Comportamentos do consumidor (suficiência)	Produção de bens de consumo	Produção de aço e prod. químicos	Direto
Indústria	Circularidade	Modelos de circularidade (compartilhamento)	Produção de bens de consumo	Produção de aço e prod. químicos	Direto
Indústria	Circularidade	Impacto de outros setores	Produção de aço, prod. químicos		Direto
Indústria	Manufatura distribuída	Compartilhar manufatura aditiva	Prod. de bens cons., máquinas, autos	Produção de aço e prod. químicos, Logística	Direto
Indústria	Manufatura distribuída	Intensidade de energia da manuf. aditiva	Intensidade de energia da construção		Almejado

Módulo de demanda – parâmetros importantes

A Tabela A1 resume as principais premissas adotadas e se elas são de natureza “Direta” ou “Direcionada” no modelo. A seguir, descrevemos abaixo a quais parâmetros essas premissas se aplicam (impacto direto), bem como a forma como contribuem para a definição de outras premissas (efeito de rede, impacto indireto).

Níveis de atividade

Os valores a seguir descrevem as principais premissas adotadas em termos de mudança de atividade, melhorias na intensidade energética, taxas de renovação, etc., consideradas nos dois cenários deste relatório. Para estabelecer essas premissas, começamos gerando um cenário base que simplesmente projeta a continuação das tendências atuais, com base em melhorias típicas na intensidade energética, taxas de construção, crescimento populacional e evolução do PIB. Em seguida, as entradas do módulo de demanda forçam valores “alvo” específicos em pontos-chave no tempo para levar em conta as evoluções exógenas já descritas e não consideradas no modelo. O modelo então atinge um novo equilíbrio e recalcula todos os dados de acordo.

Indicadores-chave de atividade

A Tabela A2 apresenta uma visão das evoluções da atividade.

Geração distribuída

Aproveitamos aqui um relatório anterior da Schneider Electric [92] que projetou o potencial da geração distribuída globalmente.

Neste relatório, utilizamos o mesmo modelo.

O modelo utiliza a evolução do estoque tanto residencial quanto de serviços (e sua evolução). A avaliação considera a proporção entre a área de telhados e a área total, e então a parcela do telhado adequada para a instalação de painéis fotovoltaicos (por exemplo, áreas sem sombra ou áreas sem equipamentos instalados). Utilizando um nível médio de irradiação solar para o país, avalia-se o potencial de geração de energia a partir da geração distribuída. Ambos os cenários utilizam essa avaliação e assumem diferentes taxas de penetração ao longo do tempo.

Nossa estimativa para o potencial de geração distribuída no Brasil é de 130 TWh por ano atualmente, atingindo 250 TWh até 2050.

As previsões dos cenários variam entre 120 TWh e 200 TWh, dependendo do ritmo de adoção até 2050. Essa previsão permanece bastante conservadora. Considerando nosso conhecimento limitado sobre a tipologia dos edifícios, adotamos estimativas conservadoras para as áreas dos edifícios utilizadas em nosso cálculo. Todas as instalações de geração distribuída fora de edifícios residenciais ou comerciais também foram excluídas. Eles incluem edifícios industriais (por exemplo, fábricas, armazéns, etc.), coberturas de estacionamentos, etc. O potencial para geração distribuída é, portanto, provavelmente subestimado (Tabela A3).

Demanda de data centers

Nos baseamos em previsões da BNAméricas [85] estimativas de curto prazo do crescimento atual da demanda por data centers. Essas previsões são baseadas em projetos existentes, que apresentam rápido crescimento até 2038, com uma capacidade total instalada prevista para atingir 13 GW até então, em comparação com os atuais 0,8 GW (em 2025).

Tabela A2 – Evolução da atividade

Consolidação da atividade no Brasil												
	Evolução histórica Terra Firme						Evolução histórica Salto Verde					
	2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Emissões de GEE												
Emissões de CO2 no escopo coberto	359	480	511	558	551	465	359	480	511	530	351	197
Emissões de CO2 no escopo coberto com biocombustíveis/ impacto de emissões negativas	359	480	511	558	312	0	359	480	511	529	168	0
Demanda final de energia												
Demanda final de energia (PJ)	7,039	9,897	11,533	13,021	14,377	14,681	7,039	9,897	11,533	12,703	12,881	12,724
Participação de biomassa na demanda de energia final (%)	24%	29%	31%	28%	26%	26%	24%	29%	31%	28%	20%	12%
Participação da eletricidade (%)	16%	16%	18%	22%	26%	30%	16%	16%	18%	22%	43%	58%
PIB / Cap (\$PIB/Cap)	11,285	14,510	15,124	16,681	17,574	18,521	11,285	14,510	15,124	16,681	17,574	18,521
Energia / Cap (Gj/cap)	40	50	53	58	62	64	40	50	53	57	56	55
Energia / (\$PIB (Kj/\$PIB)	3,547	3,474	3,523	3,486	3,555	3,433	3,547	3,474	3,523	3,401	3,185	2,975
Geração de energia												
Geração de energia (TWh)	445	592	718	949	1,205	1,422	445	592	718	954	1,788	2,386
Participação de comb. fóssil (%)	9%	12%	9%	7%	6%	2%	9%	12%	9%	7%	4%	1%
Participação de energia renovável(%)	90%	85%	89%	90%	90%	94%	90%	85%	89%	90%	91%	95%
Participação de Hidro (%)	87%	79%	61%	48%	44%	39%	87%	79%	61%	49%	30%	20%
Participação da energia Solar Distribuída (%)	0%	0%	0%	3%	7%	13%	0%	0%	0%	3%	4%	5%
Indústria												
Demanda final de energia (PJ)	2,739	3,980	4,159	4,458	4,950	5,330	2,739	3,980	4,159	4,487	5,113	5,768
Participação da eletricidade (%)	19%	18%	19%	22%	25%	27%	19%	18%	19%	23%	34%	46%
Participação de aço e minerais na demanda geral de energia para a indústria (%)	37%	30%	25%	27%	34%	40%	37%	30%	25%	27%	40%	52%
Siderurgia												
Produção de aço (Mt)	28	33	32	46	69	89	28	33	32	47	83	129
do qual Sucata EAF (%)	10%	9%	21%	20%	14%	14%	10%	9%	21%	20%	17%	13%
Produção de aço / per capita (Kg/Cap)	158	168	147	205	298	384	158	168	147	210	361	560
Intensidade da energia (Gj/t)	26	25	23	18	18	19	26	25	23	18	20	20
Minerais não metálicos												
Produção de cimento (base 100)	65	121	100	112	125	142	65	121	100	112	134	158
Intensidade da energia (base 100)	156	95	100	99	97	95	156	95	100	99	97	95
Participação da eletricidade (%)	10%	10%	12%	12%	13%	14%	10%	10%	12%	12%	13%	14%
Produtos químicos												
Produção de produtos químicos (base 100)	96	106	100	110	135	138	96	106	100	109	124	152
Intensidade da energia (base 100)	106	109	100	99	95	90	106	109	100	98	89	79
Participação da eletricidade (%)	24%	29%	33%	33%	36%	38%	24%	29%	33%	35%	57%	87%
Mineração e extração												
Produção de produto químico (base 100)	75	106	100	100	125	150	75	106	100	100	125	150
Intensidade da energia (base 100)	113	109	100	97	88	78	113	109	100	97	88	78
Participação da eletricidade (%)	31%	34%	45%	51%	61%	70%	31%	34%	45%	54%	67%	80%
Automotivo												
Produção de produto químico (base 100)	84	169	100	155	283	324	84	169	100	172	246	249
Intensidade da energia (base 100)	92	92	100	126	132	157	92	92	100	126	176	157
Participação da eletricidade (%)	69%	72%	62%	67%	73%	80%	69%	72%	62%	70%	80%	90%
Manufatura, Alimentos, Mineração												
Produção (base 100)	72	100	100	109	114	116	72	100	100	110	115	118
Intensidade da energia (base 100)	70	85	100	96	89	84	70	85	100	95	83	70
Participação da eletricidade (%)	24%	20%	20%	23%	29%	34%	24%	20%	20%	26%	47%	81%
Edifícios												
Demanda final de energia (PJ)	1,267	1,505	1,858	2,071	1,979	1,913	1,267	1,505	1,858	1,897	1,861	1,892
Participação da eletricidade (%)	46%	52%	60%	66%	72%	80%	46%	52%	60%	65%	84%	95%
Residências												
Intensidade da energia (base 100)	482	430	435	434	348	262	482	430	435	398	260	202
Superfícies (Mm2)	1,933	2,499	2,940	3,180	3,754	4,877	1,933	2,499	2,940	3,180	4,847	6,501
Superfície per capita (m2 / cap)	11	13	14	14	16	21	11	13	14	14	21	28
Taxa de penetração de aquecimento elétrico de água	22%	34%	39%	39%	51%	70%	22%	34%	39%	43%	73%	87%
Taxa de penetração de cozimento elétrico	0%	0%	0%	4%	15%	20%	0%	0%	0%	19%	71%	91%
Taxa de penetração de Ar Condicionado	0%	7%	33%	62%	70%	70%	0%	7%	33%	45%	90%	100%
Participação de eletrodomésticos na energia final	26%	27%	33%	32%	33%	31%	26%	27%	33%	32%	32%	32%
Serviços												
Intensidade da energia (base 100)	522	545	612	705	694	694	522	545	612	644	643	660
Superfícies (Mm2)	643	792	948	983	970	914	643	792	948	983	938	880
Superfície per capita (m2 / cap)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Taxa de penetração de aquecimento elétrico de água	46%	75%	76%	80%	91%	97%	46%	75%	76%	80%	91%	97%
Taxa de penetração de cozimento elétrico	0%	0%	0%	6%	12%	19%	0%	0%	0%	16%	66%	87%
Taxa de penetração de Ar Condicionado	0%	12%	45%	70%	70%	70%	0%	12%	45%	70%	90%	100%
Participação de eletrodomésticos na energia final	57%	65%	71%	68%	69%	70%	57%	65%	71%	67%	66%	67%
Data Centers												
Demanda final da energia (PJ)	0	0	0	61	159	159	0	0	0	61	276	276
Mobilidade												
Demanda de energia final (PJ)	2,176	3,298	4,419	5,090	5,546	5,430	2,176	3,298	4,419	4,958	3,842	3,139
Participação da eletricidade (%)	0%	0%	0%	1%	4%	9%	0%	0%	0%	3%	24%	49%
Passageiros												
Total de PKMs (Gpkm)	387	780	1,312	1,852	1,937	1,948	387	780	1,312	1,832	1,757	1,727
Total de PKMs/Capita (km/cap/ano)	2,200	3,971	6,063	8,272	8,416	8,436	2,200	3,971	6,063	8,182	7,635	7,479
PKMs per capita – Caros e motocicletas	1,816	3,425	5,470	7,615	7,674	7,601	1,816	3,425	5,470	7,525	6,887	6,635
PKMs per capita - Ferrovia	72	48	49	52	59	68	72	48	49	52	59	68
PKMs per capita - Ônibus	191	272	293	303	361	434	191	272	293	303	366	442
PKMs Aviação (Gpkm)	120	226	251	302	322	333	120	226	251	302	323	334
Participação de BEVs na venda de veículos leves (%)	0%	0%	1%	20%	20%	48%	0%	0%	1%	31%	100%	100%
Atividade de frete												
Total de TKM	657	971	1,455	1,645	1,772	1,866	657	971	1,455	1,645	1,772	1,866

Tabela A3 – Geração distribuída

Geração distribuída (TWh)	Terra Firme				Salto Verde			
	2023	2030	2040	2050	2023	2030	2040	2050
Residencial	0.00	24.24	75.66	181.00	0.00	24.24	60.53	113.13
Serviço	0.00	3.43	8.38	10.94	0.00	3.43	6.70	6.84
Total	0.00	27.68	84.04	191.95	0.00	27.68	67.23	119.97

Elaboramos um modelo simples para impulsionar o aumento dos projetos ao longo do tempo, para projetar o crescimento futuro além dessa data, dada a falta de estimativas existentes e as incertezas inerentes a elas. Estimamos que os projetos dobrem em nosso cenário *Terra Firme* até 2040 e mais que tripliquem em nosso cenário *Salto Verde*. Isso nos dá previsões de capacidade atingindo 10 GW até 2030 (semelhante à BNamericas) e 26-45 GW até 2040.

Nesta fase, não consideramos nenhuma expansão adicional de pipelines além de 2040, dadas as incertezas atuais associadas ao desenvolvimento da infraestrutura digital. Nossa previsão pode, portanto, estar subestimada, mas também superestimada se ganhos significativos de eficiência na infraestrutura digital levarem a uma redução na demanda por energia.

Modelo de redução de biomassa

A produção de biocombustíveis (incluindo biodiesel e etanol) totaliza cerca de 40 bilhões de litros em 2024 [99].

A cana-de-açúcar representa cerca de 2/3 [99] desse volume e a grande maioria da produção de etanol, com cerca de 6.000 litros produzidos por hectare, seguida por milho, com cerca de 2.000 litros produzidos por hectare. A produção de soja é utilizada para biodiesel, com cerca de 400 litros produzidos por hectare. [99, 101]

Cerca de metade da produção de cana-de-açúcar destina-se a biocombustíveis, ou cerca de 4,1 milhões de hectares. Estimamos que mais de 70% da soja seja destinada a biocombustíveis, ou cerca de 28,7 milhões de hectares, e 15% do milho, ou cerca de 3,3 milhões de hectares [100, 102-104]

Em nossos cenários, o consumo de biocombustíveis cai de 13 a 23 bilhões de litros até 2050, considerando ambos os cenários. Assumimos que a produção de soja será a primeira a ser substituída, seguida pela de milho e, por fim, pela de cana-de-açúcar. Nossa justificativa para essa suposição é acompanhar o aumento das taxas de produtividade.

Em nosso modelo, liberamos progressivamente hectares de terras cultivadas com soja, milho e cana-de-açúcar à medida que a demanda diminui. Atingimos um total de 29 milhões de hectares de terra liberada em *Terra Firme* e 33 milhões de hectares em *Salto Verde*, incluindo a totalidade da área de soja dedicada à produção de biocombustíveis, 0,6 a 3,3 milhões de hectares de produção de milho e 0 a 0,9 milhões de hectares de cana-de-açúcar.

Em seguida, avaliamos o potencial de sequestro de carbono do reflorestamento, com um valor relatado de 10 a 15 tCO₂ por hectare [94, 95]. Usando uma estimativa intermediária de 12 tCO₂ por hectare, atingimos um total potencial de sequestro de carbono de 350 a 400 MCO₂. Para fins de comparação, a estimativa na faixa alta fornece um potencial de 450 a 500 MCO₂; o potencial da faixa baixa é de 300-330 MCO₂. Assumimos que dois terços desse potencial retornam à natureza.

Mudança no uso da terra

Atingir uma descarbonização profunda no Brasil até meados do século depende tanto da transformação dos serviços energéticos quanto da credibilidade e da escala das ações de Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (AFOLU) e de soluções baseadas na natureza (SBN) mais abrangentes.

Dentro de uma economia brasileira em modernização que eletrifica os usos finais, implementa controles digitais e direciona os processos industriais para trajetórias de baixo carbono, a AFOLU continua sendo fundamental para promover remoções em larga escala com rapidez, ao mesmo tempo em que suprime uma fonte dominante de emissões brutas na forma de desmatamento.

A oportunidade é excepcionalmente grande em comparação com os padrões globais. As emissões do uso da terra no Brasil estão concentradas em alguns biomas e classes de transição; elas são tecnicamente evitáveis sob os instrumentos de governança existentes e podem ser mais do que compensadas por meio de um portfólio que combina desmatamento zero, restauração florestal legal, manejo de florestas secundárias, intensificação sustentável dos sistemas de pecuária e agricultura e desenvolvimento direcionado da bioeconomia.

Nas últimas três décadas, as emissões brutas da mudança no uso da terra no Brasil oscilaram entre aproximadamente 700 MtCO₂e e 2,1 GtCO₂e por ano, com o pico de 2003 impulsionado pela conversão da floresta amazônica e o declínio subsequente até 2011 devido a medidas de fiscalização e da cadeia de suprimentos. Em 2010, as emissões líquidas do uso da terra caíram para aproximadamente 116 MtCO₂e, uma vez que as remoções dentro de áreas protegidas e vegetação secundária quase compensaram as fontes brutas, demonstrando a elasticidade do balanço nacional à governança e a proximidade do zero líquido no setor.

Duas características da dinâmica do carbono terrestre no Brasil tornam uma abordagem liderada pela AFOLU não apenas material, mas também rapidamente implantável. Primeiro, as emissões são dominadas por um pequeno conjunto de conversões: a substituição de florestas primárias e savanas arborizadas por pastagens e terras agrícolas na Amazônia, Cerrado e partes da Caatinga, que representam a maior parte do fluxo bruto nacional. Em contraste, as perdas de vegetação secundária e as conversões de pastagens em terras agrícolas contribuem com fontes menores e mais difusas [105]. Segundo, o país controla sumidouros naturais muito grandes e espacialmente heterogêneos. As florestas secundárias cobrem atualmente cerca de 14 milhões de hectares somente na Amazônia brasileira e sequestram, em média, cerca de 19 TgC por ano, se mantidas, com taxas de crescimento específicas do bioma impulsionadas pelo clima e históricos de perturbação. Por exemplo, florestas secundárias na Amazônia Ocidental, sob baixa radiação de ondas curtas e baixo déficit hídrico, podem acumular aproximadamente 3,0±1,0 MgC/ha/ano nas duas primeiras décadas, enquanto povoamentos equivalentes no nordeste, mais seco, acumulam cerca de 1,3±0,3 MgC/ha/ano. No entanto, o desmatamento e os incêndios repetidos reduzem essas taxas em 20–55% e podem causar platôs precoces nos estoques de carbono. Isso enfatiza a importância do controle de distúrbios e da segurança da posse em qualquer estratégia de remoção crível [106].

Essas regularidades empíricas têm três implicações diretas para os dois cenários de sistema energético desenvolvidos neste relatório. Primeiro, a contribuição “sem arrependimentos” do AFOLU em todos os cenários é a reanimação para o desmatamento ilegal líquido zero na Amazônia e no Cerrado, juntamente com o forte apoio às disposições do Código Florestal sobre Reserva Legal e Área de Preservação Permanente.

Outros pesquisadores demonstraram que o histórico do Brasil mostra que tal regime é administrativamente viável, fiscalmente eficiente em relação a outras opções de descarbonização e rapidamente refletido no inventário nacional [105]. Em segundo lugar, a escala de remoções duradouras disponíveis até 2030-2040 depende mais da salvaguarda e aceleração da regeneração natural do que de tecnologias especulativas de emissão negativa. As florestas secundárias do Brasil representam uma solução climática significativa, porém subutilizada. A proteção de todas as florestas secundárias estabelecidas até 2017 poderia fornecer 5,5% dos compromissos de redução de emissões do Brasil até 2030. No entanto, as políticas atuais que protegem apenas florestas com mais de 20 anos capturam menos de 1% desse potencial. Isso demonstra como as políticas podem capturar o valor do sumidouro de carbono do Brasil, em particular os anos iniciais críticos, quando as florestas jovens absorvem carbono mais rapidamente [106]. Em terceiro lugar, uma bioeconomia crível deve internalizar as emissões da mudança no uso da terra (MUT) no ponto de demanda. A contabilização espacialmente explícita mostra que as emissões da MUT variam em ordens de magnitude entre municípios e produtos. Levando em consideração que as intensidades médias nacionais de dLUC para milho, soja e cana-de-açúcar são de aproximadamente 2,0, 2,3 e 0,3 tCO₂/ha/ano, respectivamente, com pastagens em cerca de 4,1 tCO₂/ha/ano, mas os valores são altamente heterogêneos. A expansão da bioenergia e das matérias-primas biogênicas previstas em nossas trajetórias industriais e de transporte deve ser relativa e condicionada ao fornecimento de desmatamento zero e à contabilização local do dLUC para evitar a erosão dos ganhos de mitigação em todo o sistema [107].

Baseamos nossa análise quantitativa neste artigo no trabalho do explorador de trajetória nacional de 1,5 graus [96]. Este trabalho estima um potencial de remoção de carbono proveniente do reflorestamento e da florestação de 600 MtCO₂ por ano em 2030, 1.790 MtCO₂ em 2040 e 1.950 MtCO₂ em 2050. Até o momento, a contribuição do LULUCF para as emissões tem sido positiva, representando cerca de 350 MtCO₂e em 2023, um declínio acentuado em relação à década anterior. Consideramos que essa tendência continuará e que as emissões líquidas totais do LULUCF se tornarão negativas na próxima década.

Em nossa opinião, as maiores oportunidades de mitigação e remoção de carbono entre 2030 e 2040 provêm de quatro pilares estratégicos.

Sistemas de Governança Aprimorados

O primeiro pilar centra-se no fortalecimento da governança por meio de mecanismos abrangentes de fiscalização. Essa abordagem inclui o aproveitamento de sistemas de monitoramento baseados em risco e habilitados por satélite, que já demonstraram eficácia na redução das taxas de desmatamento. Os programas de crédito governamentais e as políticas de compras públicas podem sancionar ativamente municípios e cadeias de suprimentos que não cumprem as normas, criando incentivos econômicos para a conformidade ambiental. Além disso, a resolução de disputas sobre a posse de terras e a simplificação dos processos de regularização ambiental eliminarão os gargalos que atualmente permitem a apropriação especulativa de terras e práticas predatórias de desmatamento.

Manejo Florestal Ampliado

O segundo pilar concentra-se na proteção e expansão dos sumidouros naturais de carbono do Brasil.

As unidades de conservação e os territórios indígenas têm historicamente gerado remoções líquidas de carbono que compensam parcelas significativas das emissões brutas nacionais, tornando sua proteção e expansão uma prioridade. Os proprietários de terras privadas podem ser apoiados na ampliação da regeneração natural por meio do cumprimento do Código Florestal e de programas de restauração ecológica direcionados. O manejo ativo do fogo também é importante porque os distúrbios causados pelo fogo reduzem substancialmente o potencial de armazenamento de carbono florestal [105, 106].

Intensificação Agrícola em Terras Existentes

O terceiro pilar enfatiza a intensificação produtiva por meio das práticas comprovadas do Plano ABC. A aceleração da adoção da restauração de pastagens, sistemas de pastoreio rotativo, modelos integrados de lavoura-pecuária-floresta e técnicas de calagem e fertilização de precisão permitirá uma maior produção de carne bovina em áreas de terra reduzidas. Essa abordagem de intensificação libera terras adicionais para a restauração florestal e a produção de culturas de alto valor agregado, sem aumentar a pressão sobre as fronteiras florestais.

Medição e responsabilização transparentes

O quarto pilar estabelece sistemas de contabilização de mudanças no uso da terra espacialmente explícitos e atualizados anualmente. A implementação de abordagens como a metodologia SEEG baseada no MapBiomass torna as emissões e as remoções de carbono visíveis em escalas municipais, ao mesmo tempo que permite uma alocação precisa entre diferentes produtos e agentes econômicos. Essa estrutura de “responsabilidade compartilhada”, já utilizada em importantes bancos de dados de avaliação do ciclo de vida, evita a superestimação ou subestimação das emissões que atualmente obscurecem as prioridades de mitigação. Uma alocação mais precisa também fortalece a conexão entre as decisões do setor energético e os resultados do uso da terra [105, 107].

Resultados detalhados da simulação

Tabelas detalhadas de nossa simulação estão disponíveis nas Tabelas A4-12.

Tabela A4 – Demanda final de energia

Energia Brasil	Terra Firme						Salto Verde					
	2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Demanda Final												
Total (PJ/ano)	7,039	9,897	11,533	13,021	14,377	14,681	7,039	9,897	11,533	12,703	12,881	12,724
Derivados de petróleo	3,513	4,326	4,842	5,421	5,475	4,751	3,513	4,326	4,842	5,184	3,059	1,386
Gás	201	515	475	533	630	551	201	515	475	508	503	354
Carvão	450	564	521	528	504	467	450	564	521	508	381	308
Eleticidade	1,160	1,584	2,042	2,816	3,712	4,403	1,160	1,584	2,042	2,830	5,567	7,424
Biomassa e resíduos	1,713	2,894	3,609	3,663	3,759	3,760	1,713	2,894	3,609	3,616	2,515	1,504
Outros	2	14	44	61	297	749	2	14	44	57	855	1,749

Tabela A5 – Demanda de energia da indústria

Energia Brasil	Terra Firme						Salto Verde					
	2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Indústria												
Demanda Final (PJ/ano)	2.739	3.980	4.159	4.458	4.950	5.330	2.739	3.980	4.159	4.487	5.113	5.768
Derivados de petróleo	556	495	359	392	350	277	556	495	359	386	328	231
Gás	154	370	352	404	471	380	154	370	352	418	464	336
Carvão	444	558	514	528	504	467	444	558	514	508	381	308
Eleticidade	528	732	799	983	1.246	1.422	528	732	799	1.053	1.755	2.652
Biomassa	1.056	1.824	2.132	2.135	2.159	2.164	1.056	1.824	2.132	2.109	1.475	712
Hidrogênio	0	0	0	11	213	611	0	0	0	10	705	1.524
Calor	0	1	2	5	7	7	0	1	2	4	5	6
Siderurgia												
Demanda Final (PJ/ano)	735	831	719	833	1.264	1.701	735	831	719	854	1.622	2.528
Derivados de petróleo	26	21	9	16	21	20	26	21	9	13	15	13
Gás	32	38	49	67	170	166	32	38	49	60	169	163
Carvão	390	469	436	483	492	459	390	469	436	445	339	291
Eleticidade	76	98	87	114	160	218	76	98	87	111	211	343
Biomassa	211	205	137	144	209	226	211	205	137	218	183	190
Hidrogênio	0	0	0	6	208	607	0	0	0	5	701	1.523
Calor	0	0	0	3	5	6	0	0	0	2	3	4
Minerais não metálicos												
Demanda Final (PJ/ano)	271	381	326	362	395	439	271	381	326	362	422	490
Derivados de petróleo	49%	41%	34%	33%	31%	28%	49%	41%	34%	34%	35%	33%
Gás	5%	13%	15%	17%	19%	20%	5%	13%	15%	18%	21%	21%
Carvão	3%	2%	3%	2%	1%	1%	3%	2%	3%	2%	1%	1%
Eleticidade	10%	10%	12%	12%	13%	14%	10%	10%	12%	12%	13%	14%
Biomassa	34%	35%	36%	36%	36%	36%	34%	35%	36%	34%	30%	30%
Hidrogênio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Produtos químicos												
Demanda Final (PJ/ano)	260	293	254	276	326	315	260	293	254	272	282	307
Derivados de petróleo	52%	35%	30%	29%	28%	26%	52%	35%	30%	27%	18%	5%
Gás	19%	31%	32%	30%	28%	25%	19%	31%	32%	30%	20%	6%
Carvão	2%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	2%	3%	4%	2%	1%
Eleticidade	24%	29%	33%	33%	36%	38%	24%	29%	33%	35%	57%	87%
Biomassa	4%	2%	2%	5%	7%	10%	4%	2%	2%	5%	3%	1%
Hidrogênio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Manufatura, Alimentos e Mineração												
Demanda Final (PJ/ano)	1.474	2.476	2.860	2.987	2.965	2.874	1.474	2.476	2.860	2.999	2.787	2.443
Derivados de petróleo	18%	9%	6%	6%	4%	2%	18%	9%	6%	6%	4%	2%
Gás	4%	8%	6%	6%	5%	2%	4%	8%	6%	7%	5%	2%
Carvão	3%	3%	2%	1%	0%	0%	3%	3%	2%	2%	1%	0%
Eleticidade	25%	21%	21%	25%	31%	36%	25%	21%	21%	27%	48%	81%
Biomassa	51%	60%	65%	62%	60%	61%	51%	60%	65%	59%	41%	15%
Hidrogênio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela A6 – Demanda de energia de edifícios, total

Energia		Terra Firme					Salto Verde						
Brasil													
		2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Edifícios													
Demanda Total (PJ/ano)		1,267	1,505	1,858	2,071	1,979	1,913	1,267	1,505	1,858	1,897	1,861	1,892
Derivados de petróleo		325	298	313	243	132	76	325	298	313	205	75	27
Gás		11	22	27	74	127	149	11	22	27	39	16	7
Carvão		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eletricidade		581	783	1,116	1,360	1,431	1,523	581	783	1,116	1,237	1,567	1,801
Bi omassa		348	389	359	351	261	138	348	389	359	373	175	27
Hidrogênio		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calor		2	14	42	43	27	26	2	14	42	43	29	31

Tabela A7 – Demanda de energia de edifícios, residencial

Energia		Terra Firme					Salto Verde						
Brasil													
		2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Residencial													
Demanda Total (PJ/ano)		932	1,073	1,278	1,379	1,306	1,278	932	1,073	1,278	1,264	1,238	1,311
Derivados de petróleo		269	267	280	220	117	65	269	267	280	182	64	23
Gás		7	11	20	65	116	143	7	11	20	31	11	4
Carvão		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eletricidade		308	399	590	723	800	920	308	399	590	656	987	1,228
Biomassa		345	385	353	342	250	125	345	385	353	366	171	26
Hidrogênio		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calor		2	12	35	30	22	26	2	12	35	30	24	30
Aquecimento de ambiente													
Demanda Final (PJ/ano)		16%	16%	16%	29%	29%	29%	16%	16%	16%	29%	29%	29%
Derivados de petróleo		16%	16%	16%	31%	31%	31%	16%	16%	16%	31%	31%	31%
Gás		16%	16%	16%	0%	0%	0%	16%	16%	16%	0%	0%	0%
Carvão		17%	17%	17%	32%	32%	32%	17%	17%	17%	32%	32%	32%
Eletricidade		1%	1%	1%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	2%	2%	2%
Biomassa		19%	19%	17%	8%	8%	8%	19%	19%	17%	8%	8%	8%
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor		16%	16%	16%	0%	0%	0%	16%	16%	16%	0%	0%	0%
Aquecimento de água													
Demanda Final (PJ/ano)		393	420	449	446	341	231	393	420	449	445	286	173
Derivados de petróleo		27%	13%	5%	5%	5%	4%	27%	13%	5%	4%	3%	2%
Gás		1%	1%	3%	3%	2%	2%	1%	1%	3%	2%	1%	1%
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Eletricidade		15%	19%	21%	23%	30%	46%	15%	19%	21%	24%	41%	68%
dos quais bombas de calor		1%	1%	1%	3%	10%	24%	1%	1%	1%	4%	23%	50%
Biomassa		57%	63%	63%	63%	57%	35%	57%	63%	63%	63%	47%	12%
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor		1%	3%	8%	7%	7%	11%	1%	3%	8%	7%	8%	18%
Cozimento													
Demanda Final (PJ/ano)		288	333	336	319	291	269	288	333	336	299	215	171
Derivados de petróleo		56%	64%	76%	62%	35%	21%	56%	64%	76%	54%	26%	11%
Gás		1%	2%	2%	17%	38%	52%	1%	2%	2%	7%	3%	1%
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Eletricidade		0%	0%	0%	2%	8%	11%	0%	0%	0%	10%	53%	84%
Biomassa		43%	34%	21%	19%	19%	16%	43%	34%	21%	29%	18%	3%
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Resfriamento de ambiente													
Demanda Final (PJ/ano)		12	30	73	170	240	376	12	30	73	113	352	549
Eletrodomésticos e iluminação		239	291	420	444	434	402	239	291	420	407	405	419

Tabela A8 – Demanda de energia de edifícios, serviços

Energia		Terra Firme						Salto Verde						
Brasil		2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050	
Serviços														
Demanda Total (PJ/ano)		335	432	580	693	673	635	335	432	580	633	603	581	
Derivados de petróleo		56	31	33	23	15	11	56	31	33	23	10	4	
Gás		4	11	7	10	10	7	4	11	7	8	5	3	
Carvão		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Eletricidade		272	384	526	637	631	603	272	384	526	581	580	573	
Biomassa		3	4	6	10	12	14	3	4	6	8	3	1	
Hidrogênio		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Calor		0	2	7	13	5	0	0	2	7	13	5	0	
Aquecimento de ambiente		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Derivados de petróleo		8%	7%	0%	0%	1%	1%	8%	7%	0%	1%	1%	1%	
Gás		7%	7%	0%	0%	1%	1%	7%	7%	0%	0%	1%	0%	
Carvão		3%	2%	0%	0%	0%	0%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	
Eletricidade		9%	7%	99%	97%	97%	98%	9%	7%	99%	97%	97%	98%	
Dos quais bombas de calor		0%	0%	99%	49%	55%	61%	0%	0%	99%	49%	56%	65%	
Biomassa		58%	68%	1%	1%	1%	1%	58%	68%	1%	1%	1%	0%	
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Calor		16%	9%	0%	1%	1%	0%	16%	9%	0%	1%	1%	0%	
Aquecimento de água		64	56	72	73	58	48	64	56	72	73	59	49	
Derivados de petróleo		49%	6%	4%	3%	2%	2%	49%	6%	4%	3%	2%	2%	
Gás		6%	19%	10%	8%	6%	4%	6%	19%	10%	8%	6%	4%	
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Eletricidade		44%	72%	76%	71%	83%	93%	44%	72%	76%	71%	82%	93%	
Dos quais bombas de calor		2%	3%	4%	14%	34%	51%	2%	3%	4%	14%	34%	51%	
Biomassa		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Calor		0%	3%	10%	18%	9%	0%	0%	3%	10%	18%	9%	1%	
Cozimento		27	32	36	36	34	32	27	32	36	34	25	21	
Derivados de petróleo		89%	87%	84%	59%	40%	33%	89%	87%	84%	62%	35%	18%	
Gás		0%	0%	0%	12%	20%	14%	0%	0%	0%	7%	4%	2%	
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Eletricidade		0%	0%	0%	3%	7%	11%	0%	0%	0%	9%	48%	77%	
Biomassa		11%	13%	16%	26%	34%	42%	11%	13%	16%	22%	13%	4%	
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Calor		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Resfriamento de ambiente		54	61	59	114	115	109	54	61	59	104	122	125	
Eletrodomésticos e iluminação		190	282	413	470	466	446	190	282	413	422	397	388	

Tabela A9 – Demanda de energia da mobilidade

Energia		Terra Firme					
Brasil		2000	2010	2023	2030	2040	2050
Mobilidade							
Demanda Final (PJ/ano)		2,176	3,298	4,419	5,090	5,546	5,430
Derivados de petróleo		1,918	2,654	3,374	3,996	4,174	3,687
Gás		11	70	88	47	25	14
		0	0	0	0	0	0
Elettricidade		5	6	10	57	205	480
Biocombustíveis		243	568	947	988	1,093	1,145
Hidrogênio e combustíveis derivados		0	0	0	2	50	103
Mobilidade rodoviária							
Demanda Final (PJ/ano)		1,827	2,803	3,824	4,436	4,908	4,862
Derivados de petróleo		86%	77%	73%	76%	74%	69%
Gás		1%	2%	2%	1%	1%	0%
Elettricidade		0%	0%	0%	1%	4%	10%
Biocombustíveis		13%	20%	25%	22%	21%	22%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mobilidade ferroviária							
Demanda Final (PJ/ano)		22	46	51	53	53	53
Derivados de petróleo		80%	87%	86%	81%	76%	73%
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Elettricidade		20%	13%	14%	19%	24%	27%
Biocombustíveis		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mobilidade aérea							
Demanda Final (PJ/ano)		169	225	224	269	284	248
Doméstica		140	142	122	147	155	135
Internacional		29	83	102	122	129	113
Mix de combustíveis (%)							
Derivados de petróleo		100%	100%	100%	100%	87%	61%
Elettricidade		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biocombustíveis		0%	0%	0%	0%	13%	39%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mobilidade – Outros							
Demanda Final (PJ/ano)		159	223	320	332	301	267
Vias fluviais – em terra		38	57	51	66	78	83
Tanques marítimos		121	166	269	266	222	184
Mix de combustíveis (%)							
Derivados de petróleo		100%	100%	100%	99%	83%	61%
Elettricidade		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biocombustíveis		0%	0%	0%	0%	1%	1%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	16%	38%

		Salto Verde					
		2000	2010	2023	2030	2040	2050
Mobilidade							
Demanda Final (PJ/ano)		2,176	3,298	4,419	4,958	3,842	3,139
Derivados de petróleo		1,918	2,654	3,374	3,843	2,163	958
Gás		11	70	88	44	18	9
		0	0	0	0	0	0
Elettricidade		5	6	10	126	933	1,550
Biocombustíveis		243	568	947	946	612	432
Hidrogênio e combustíveis derivados		0	0	0	0	116	189
Mobilidade rodoviária							
Demanda Final (PJ/ano)		1,827	2,803	3,824	4,306	3,251	2,594
Derivados de petróleo		86%	77%	73%	74%	56%	32%
Gás		1%	2%	2%	1%	1%	0%
Elettricidade		0%	0%	0%	3%	28%	58%
Biocombustíveis		13%	20%	25%	22%	16%	9%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mobilidade ferroviária							
Demanda Final (PJ/ano)		22	46	51	51	47	46
Derivados de petróleo		80%	87%	86%	83%	60%	27%
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Elettricidade		20%	13%	14%	17%	40%	73%
Biocombustíveis		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mobilidade aérea							
Demanda Final (PJ/ano)		169	225	224	269	264	240
Doméstica		140	142	122	147	144	131
Internacional		29	83	102	122	120	109
Mix de combustíveis (%)							
Derivados de petróleo		100%	100%	100%	100%	62%	21%
Elettricidade		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biocombustíveis		0%	0%	0%	0%	38%	79%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mobilidade – Outros							
Demanda Final (PJ/ano)		159	223	320	333	280	259
Vias fluviais – em terra		38	57	51	66	78	83
Tanques marítimos		121	166	269	266	202	176
Mix de combustíveis (%)							
Derivados de petróleo		100%	100%	100%	99%	56%	24%
Elettricidade		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biocombustíveis		0%	0%	0%	1%	2%	3%
Hidrogênio e combustíveis derivados		0%	0%	0%	0%	41%	73%

Tabela A10 – Demanda de energia de outros setores

Energia		Terra Firme					Salto Verde						
Brasil													
		2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Agricultura (PJ/ano)													
Demanda Total (PJ/ano)		311	431	572	634	711	791	311	431	572	634	711	791
Derivados de petróleo		64%	59%	50%	41%	31%	11%	64%	59%	50%	41%	21%	6%
Gás		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Carvão		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Eletricidade		15%	15%	20%	31%	36%	51%	15%	15%	20%	31%	45%	54%
Biomassa		21%	26%	30%	29%	33%	37%	21%	26%	30%	29%	34%	39%
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Usos sem energia (PJ/ano)													
Demanda Total (PJ/ano)		547	682	525	546	617	643	547	682	525	506	360	140
Derivados de petróleo		516	623	512	532	598	621	516	623	512	492	343	119
Gás		25	53	7	7	8	7	25	53	7	7	5	1
Carvão		6	6	6	0	0	0	6	6	6	0	0	0
Biomassa		0	0	0	7	12	15	0	0	0	7	12	20
Hidrogênio		3	3	4	5	5	5	3	3	4	5	5	5

Tabela A11 – Geração de energia

Energia		Terra Firme					Salto Verde						
Brasil													
		2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Geração de eletricidade													
Geração total (TWh)		445	592	718	949	1,205	1,422	445	592	718	954	1,788	2,386
Carvão		3%	2%	3%	1%	1%	0%	3%	2%	3%	0%	0%	0%
Gás		1%	7%	5%	5%	4%	2%	1%	7%	5%	7%	3%	1%
Petróleo		4%	3%	1%	1%	0%	0%	4%	3%	1%	1%	0%	0%
Biomassa e resíduos		2%	6%	8%	5%	3%	1%	2%	6%	8%	6%	3%	1%
Nuclear		2%	3%	2%	3%	4%	3%	2%	3%	2%	3%	5%	4%
Renováveis		90%	85%	89%	90%	90%	94%	90%	85%	89%	90%	91%	95%
Hidroeletricidade		87%	79%	61%	48%	44%	39%	87%	79%	61%	49%	30%	20%
Eólica		0%	0%	14%	19%	15%	15%	0%	0%	14%	19%	21%	25%
Solar		0%	0%	7%	17%	28%	39%	0%	0%	7%	16%	37%	49%
Outros		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Hidrogênio		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela A12 – Emissões

Energia Brasil	Terra Firme					Salto Verde						
	2000	2010	2023	2030	2040	2050	2000	2010	2023	2030	2040	2050
Emissões de Gases do Efeito Estufa												
Total de emissões (MCO₂e/ano)												
Demanda Final sem AFOLU	359	480	511	558	551	465	359	480	511	530	351	197
Demanda Final sem AFOLU mas com todos os efeitos, (emissões negativas e de biomassa)	359	480	511	558	312	0	359	480	511	529	168	0
Emissões de CO₂ de Energia												
Total (MCO₂/ano)	322	423	459	503	496	411	322	423	459	476	304	157
do total carvão	60	71	69	62	54	46	60	71	69	45	32	26
do total gás	16	52	52	60	64	47	16	52	52	66	59	31
do total petróleo	245	300	339	380	378	321	245	300	339	365	214	100
Cequeiro final	259	340	379	423	425	365	259	340	379	407	254	133
Indústria (incl. usos sem energia)	82	105	87	92	90	77	82	105	87	91	80	57
do total carvão	20	30	29	28	25	23	20	30	29	28	21	16
do total gás	10	23	20	23	26	21	10	23	20	23	25	18
do total petróleo	53	52	38	41	39	33	53	52	38	40	34	23
Edifícios	22	20	21	19	15	13	22	20	21	15	6	2
do total carvão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
do total gás	1	1	2	4	7	8	1	1	2	2	1	0
do total petróleo	21	19	20	15	8	5	21	19	20	13	5	2
Mobilidade	140	197	250	293	304	268	140	197	230	281	158	70
do total petróleo	139	193	245	290	302	267	139	193	245	279	157	69
do total gás	1	4	5	3	1	1	1	4	5	2	1	1
Agricultura	15	19	21	19	16	7	15	19	21	19	11	4
do total carvão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
do total gás	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
do total petróleo	15	19	21	19	16	7	15	19	21	19	11	4
Geração de energia	35	51	44	43	36	18	35	51	44	35	28	7
do total carvão	19	20	21	15	11	6	19	20	21	0	0	0
do total gás	2	17	16	22	22	10	2	17	16	29	26	6
do total petróleo	14	14	7	6	3	1	14	14	7	6	2	0
Intensidade de emissões (gCO₂e/kWh)	79	85	61	48	35	14	79	85	61	39	18	3
Outras transformações	25	25	27	29	31	28	25	25	27	26	18	12
do total carvão	22	21	18	19	17	17	22	21	18	17	11	10
do total gás	0	0	0	1	4	3	0	0	0	1	2	0
do total petróleo	3	4	8	9	9	8	3	4	8	9	5	2
Emissões positivas	3	7	9	8	3	-4	3	7	9	8	-4	5
Indústrias de processo	37	37	32	35	35	30	37	37	32	34	47	41
Emissões Negativas	0	0	0	0	-239	-463	0	0	0	-1	-183	-197
Redução de biomassa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-183	-197
NBS e DAC	0	0	0	0	-200	-376	0	0	0	0	0	0
CCS Indústria	0	0	0	0	-16	-54	0	0	0	0	0	0
CCS Energia	0	0	0	0	-18	-18	0	0	0	0	0	0
CCS de outras transformações	0	0	0	0	-5	-17	0	0	0	0	0	0

A photograph of a library bookshelf filled with colorful books. The books are arranged on wooden shelves, and the colors of the spines are vibrant, including red, blue, green, yellow, and orange. The perspective is from a low angle, looking up at the shelves, which creates a sense of depth and abundance. The lighting is soft, highlighting the texture of the book covers and the wood of the shelves. The word "Referências" is overlaid in white, bold, sans-serif font in the lower right quadrant of the image.

Referências

Referências

1. European Commission, GHG emissions of all world countries. 2024: European Commission. EDGAR - Emissions Database for Global Atmospheric Research.
2. World Meteorological Organization, Carbon dioxide levels increase by record amount to new highs in 2024. 2025: World Meteorological Organization.
3. Paddison, L., Global heat in 'uncharted territory' as scientists warn 2023 could be the hottest year on record. CNN. July 8, 2023. 2023.
4. Carbon Brief, State of the climate: 2025 on track to be second or third warmest year on record. 2025: Carbon Brief.
5. European Commission, Communication on Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050. EU Commission. 2024.
6. Schneider Electric, China carbon neutrality 2060: Pathway of social transition and green development. 2024: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
7. IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. doi: 10.1017/9781009157926. 2022, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
8. Petit, V., The Future of the Global Order. 2020: WORLD SCIENTIFIC (EUROPE). 212.
9. Petit, V., The Age of Fire is Over: A new Approach to the Energy Transition. 2021, London: World Scientific Publishing.
10. Araújo, K., The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities. Energy Research & Social Science, 2014. 1: p. 112-121.
11. Jefferson, M., Closing the gap between energy research and modelling, the social sciences, and modern realities. Energy Research & Social Science, 2014. 4: p. 42-52.
12. Truffer, B., et al., Energy Innovation Systems - Structure of an emerging scholarly field and its future research directions. 2012.
13. Edomah, N., C. Foulds, and A. Jones, Influences on energy supply infrastructure: A comparison of different theoretical perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. 79: p. 765-778.
14. Geels, F.W., Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. Research Policy, 2010. 39(4): p. 495-510.
15. Geels, F.W., Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. Research policy, 2002. 31(8-9): p. 1257-1274.
16. Geels, F.W. and J. Schot, Typology of sociotechnical transition pathways. Research Policy, 2007. 36(3): p. 399-417.
17. Grubler, A., et al., A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies. Nature Energy, 2018. 3(6): p. 515-527.
18. Köhler, J., et al., An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2019. 31: p. 1-32.
19. Li, F.G.N., E. Trutnevyte, and N. Strachan, A review of socio-technical energy transition (STET) models. Technological Forecasting and Social Change, 2015. 100: p. 290-305.
20. Loorbach, D. and R. Raak, Transition Management: toward a prescriptive model for multi-level governance systems. 2006.
21. Rotmans, J., R. Kemp, and M. van Asselt, More evolution than revolution: transition management in public policy. Foresight, 2001. 3(1): p. 15-31.
22. Schot, J. and L. Kanger, Deep transitions: Emergence, acceleration, stabilization and directionality. Research Policy, 2018. 47(6): p. 1045-1059.
23. Sovacool, B.K., What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda. Energy Research & Social Science, 2014. 1: p. 1-29.
24. Sovacool, B.K. and D.J. Hess, Ordering theories: Typologies and conceptual frameworks for sociotechnical change. Soc Stud Sci, 2017. 47(5): p. 703-750.
25. Wilson, C. and D. Tyfield, Critical perspectives on disruptive innovation and energy transformation. Energy Research & Social Science, 2018. 37: p. 211-215.
26. Smil, V., Energy and Civilization: a History. The MIT Press: Cambridge, MA. 2017.
27. Hall, J., et al., The future of national infrastructure: A system-of-systems approach. 2016. 1-322.
28. Rhodes, R., Energy: a Human History. Simon & Schuster: New York, NJ. 2018.
29. Shell, The Colours of Energy. Essays on the Future of Energy in Society, edited by G. J. Kramer and B. Vermeer. Amsterdam: Shell. Accessed: September 2018. 2014.
30. Suits, R., N. Matteson, and E. Moyer, Energy transitions in US History, 1800-2019. 2020, RDCEP Working Paper Series.

31. Eising, J.W., T. van Onna, and F. Alkemade, Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains. *Applied Energy*, 2014. 123: p. 448-455.
32. Hoppmann, J., J. Huenteler, and B. Girod, Compulsive policy-making—The evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power. *Research Policy*, 2014. 43(8): p. 1422-1441.
33. Papachristos, G., Towards multi-system sociotechnical transitions: why simulate. *Technology Analysis & Strategic Management*, 2014. 26(9): p. 1037-1055.
34. Yücel, G., Analyzing Transition Dynamics: The Actor-Option Framework for Modelling Socio-Technical Systems. 2010.
35. Markard, J. and V.H. Hoffmann, Analysis of complementarities: Framework and examples from the energy transition. *Technological Forecasting and Social Change*, 2016. 111: p. 63-75.
36. Schot, J., Confronting the Second Deep Transition through the Historical Imagination. *Technol Cult*, 2016. 57(2): p. 445-56.
37. Energy Transitions Commission, Making Mission Possible. 2020.
38. Arbib_et_al., Rethinking Climate Change. How Humanity Can Choose to Reduce Emissions 90% by 2035 through the Disruption of Energy, Transportation, and Food with Existing Technologies. Arbib J., Dorr A., Seba T. RethinkX. 2021.
39. Creutzig, F., et al., Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of well-being. *Nature Climate Change*, 2021. 12(1): p. 36-46.
40. Schneider Electric, Back to 2050. 1.5°C is more feasible than we think. 2021: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
41. Suarez, F.F., S. Grodal, and A. Gotsopoulos, Perfect timing? Dominant category, dominant design, and the window of opportunity for firm entry. *Strategic Management Journal*, 2015. 36(3): p. 437-448.
42. Cilia, J., The Construction Labor Shortage: Will Developers Deploy Robotics? *Forbes*. . 2019.
43. McKinsey, Reinventing construction: a route to higher productivity. . 2017.
44. Lovins, A., Profitably Decarbonizing Heavy Transport and Industrial Calor: Transforming These “Harder to-Abate” Sectors Is Not Uniquely Hard and Can Be Lucrative. Rocky Mountain Institute. 2021.
45. MaterialEconomics, The Circular Economy. A powerful force for climate mitigation. . 2018.
46. BloombergNEF, Realizing the potential of customersited solar. *Bloomberg New Energy Finance*. . 2021.
47. Petit, V., Cracking the energy efficiency case in buildings. 2021, Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
48. BloombergNEF, Electric Vehicle Outlook. 2024: BloombergNEF.
49. Seba, T., Clean Disruption of Energy and Transportation: How Silicon Valley Will Make Oil, Nuclear, Natural Gás, Carvão, Electric Utilities and Conventional Cars Obsolete by 2030. . 2014.
50. Bloch_et_al., Bloch, C., Newcomb, J., Shiledar, S., and Tyson M. (2019). Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification. Report, Rocky Mountain Institute. . 2019.
51. Arbib&Seba, Rethinking Transportation 2020–2030. The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle and Oil Industries. RethinkX. 2017.
52. Keeney, J., “The Future of Transport is Autonomous Mobility-as-a-Service.” *Ark Invest*, November 30. 2017.
53. Hamblen, M., Self-driving vehicles will emerge, but only gradually, IDC says. *Fierce Electronics*. 2020.
54. Hyatt, K., Elon Musk says Tesla’s Full Self-Driving tech will have Level 5 autonomy by the end of 2021. *CNET*. . 2021.
55. Litman, T., Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Victoria Transport Policy Institute. . 2021.
56. Metz, C., The Costly Pursuit of Self-Driving Cars Continues On. And On. And On. *New York Times*. . 2021.
57. Immelt, J., “Digital Industrial Transformation.” Presentation at the GE Oil & Gás annual meeting of 2016. . 2016.
58. McKinsey, A Future That Works: Automation, Employment and Productivity. . 2017.
59. RolandBerger, Think Act beyond Mainstream. The Industrie 4.0 Transition Quantified. Munich, Germany: Roland Berger. 2016.
60. Allwood, J., et al., Material efficiency: Providing material services with less material production. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 2013. 371: p. 20120496.
61. Gutowski, T., et al., The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 2013. 371: p. 20120003.
62. Schneider Electric, Global Digital Transformation Benefits Report. 2019.

63. Petit, V., *The Energy Transition. An Overview of the True Challenge of the 21st Century.* Springer publishing. 2017.
64. OECD/IEA, *Digitalization and Energy.* International Energy Agency. . 2017.
65. Philibert, C., *Renewable Energy for Industry. From Green Energy to Green Materials and Fuels.* Report, November. © International Energy Agency Insights series, November. . 2017.
66. Madeddu, S., et al., *The CO2 reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat).* Environmental Research Letters, 2020. 15(12): p. 124004.
67. Petit, V., *Road to a rapid transition to sustainable energy security in Europe.* 2022: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
68. AgoraEnergiewende&AFRY, *No-regret hydrogen: Charting early steps for H2 infrastructure in Europe.* 2021.
69. *Beyond Zero Emissions, Electrifying Industry.* 2018: Beyond Zero Emissions.
70. Hasanbeigi, A., *Industrial Electrification in U.S. States.* Global Efficiency Intelligence. 2023.
71. AMFG, "How Sustainable is Industrial 3D Printing?" March 10. . 2020.
72. Flaudi&VanSice, Flaudi J., Van Sice C. (2020). *State of Knowledge on the Environmental Impacts of Metal Additive Manufacturing.* 2020.
73. Gebler, M., A.J.M. Schoot Uiterkamp, and C. Visser, *A global sustainability perspective on 3D printing technologies.* Energy Policy, 2014. 74: p. 158-167.
74. Goodrich, M., *3 D Printing: The Greener Choice.* Michigan Technology University. 2013.
75. Gonzalez, C., *Is 3D Printing the Future of Manufacturing? American Society of Mechanical Engineers.* 2021.
76. Groot, A., "The Future At Nike: 3D Printing Customized Shoes At Home." Digital Initiative, last updated November 14. . 2018.
77. Jezard, A., "One-Quarter of Dubai's Buildings Will Be 3D Printed by 2025." World Economic Forum, May 15. 2018.
78. Reichental, A., *When it comes to 3D printing, how much sustainability is enough? TCT magazine.* . 2020.
79. Schwaar, C., *7 Ways 3D Printing Helps You Become Sustainable.* All 3DP Pro. . 2021.
80. Warren, T., "This Cheap 3D-Printed Home Is a Start for the 1 Billion Who Lack Shelter." The Verge, March 12. . 2018.
81. Ellen_Mac_Arthur_Foundation, *Towards the Circular Economy. Volume 1-3.* . 2013,2014.
82. Lacy et al., Lacy P., Long J., Spindler W. (2020). *The Circular Economy Handbook: Realizing the Circular Advantage.* London: Palgrave Macmillan. 2020.
83. Appolloni, L. and D. D'Alessandro, *Housing Spaces in Nine European Countries: A Comparison of Dimensional Requirements.* Int J Environ Res Public Health, 2021. 18(8).
84. *Odyssee-Mure, Passenger Mobility per Capita. 2025: Odyssee-Mure.*
85. BNamericas, 'Spotlight: The projected growth in Brazil's data center capacity'. 2025: BNamericas
86. EPE & MME, *Ten-Year Energy Expansion Plan 2031. 2022: Brasília: Empresa de Pesquisa Energética and Ministério de Minas e Energia.*
87. Ministério de Minas e Energia, *Plano Nacional de Energia 2050 - PNE 2050.* 2020, Ministério de Minas e Energia, Brazil: Ministério de Minas e Energia, Brazil.
88. Kwan, T.A., *Beyond grid dependency: Technical and economic case for new energy systems in green steel.* 2025, Schneider Electric Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade: Schneider Electric Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade.
89. Kolisnichenko, V., *Brazil exported 389 million tons of iron ore in 2024.* 2025: GMK Center.
90. OECD, *OECD Aço Outlook 2025.* 2025: OECD Publishing, Paris.
91. Kwan, T.A., *Decarbonization of Ammonia.* 2024: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
92. Petit, V., *The unexpected disruption: Distributed generation.* 2022, Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
93. Alves, E.P., et al. *Renewable Energy Potential and CO2 Performance of Main Biomasses Used in Brazil.* Energies, 2023. 16, DOI: 10.3390/en16093959.
94. Franklin, S. and R. Pindyck, *A Supply Curve for Forest-Based CO2 Removal.* Working paper series (National Bureau of Economic Research), 2024.
95. Bernal, B., L.T. Murray, and T.R.H. Pearson, *Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities.* Carbon Balance Manag, 2018. 13(1): p. 22.
96. *1.5 degrees national pathway explorer, What is Brazil's pathway to limit global warming to 1.5°C? LULUCF emissions profile trajectories.* 2022: 1.5 degrees national pathway explorer.
97. Kwan, T.A., *Carbon and Beyond: Mitigating Embodied Impacts Through Building Design and Material Selection Strategies.* 2024, Schneider Electric Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade: Schneider Electric Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade.

98. Petit, V., The untold potential and rationale of industrial electrification in the United States. 2024: Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider ElectricTM.
99. USDA, Biofuels Annual - Brazil. 2024: US Department of Agriculture.
100. Colussi, J., et al., Brazil Emerges as Corn-Ethanol Producer with Expansion of Second Crop Corn. 2023: Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign. Farmdoc Daily.
101. University of Nebraska, Bioenergy crops. n.d.: University of Nebraska - Lincoln.
102. Primrose, J., Spotlight on Brazil: Global Biofuels Powerhouse. 2024: Stillwater Associates Insights.
103. Statista, Volume of soybean oil used in biodiesel production in Brazil from 2010 to 2024. 2024: Statista.
104. Pinheiro, P., COMMODITIES 2025: Brazil boosts biodiesel production, eyes market growth. 2025: Standard & Pools.
105. Zimbres, B., et al., Improving estimations of GHG emissions and removals from land use change and forests in Brazil. Environmental Research Letters, 2024. 19.
106. Heinrich, V.H.A., et al., Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. Nature Communications, 2021. 12(1): p. 1785.
107. Garofalo, D., et al., Land-use change CO2 emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. Journal of Cleaner Production, 2022. 364: p. 132549.



Aviso legal

O conteúdo desta publicação é apresentado apenas para fins informativos e, embora tenham sido feitos esforços para garantir sua precisão, não deve ser interpretado como garantia de qualquer tipo, expressa ou implícita. Esta publicação não deve ser utilizada como base para aconselhamento de investimento ou outras decisões estratégicas.

As premissas, modelos e conclusões apresentados nesta publicação representam um cenário possível e dependem inerentemente de muitos fatores fora do controle de qualquer empresa, incluindo, entre outros, ações governamentais, evolução das condições climáticas, considerações geopolíticas e mudanças tecnológicas.

Os cenários e modelos não se destinam a ser projeções ou previsões para o futuro e não representam a estratégia ou o plano de negócios da Schneider Electric.

O logotipo da Schneider Electric é uma marca comercial e marca de serviço da Schneider Electric SE.

Quaisquer outras marcas permanecem propriedade de seus respectivos proprietários.

Autores

Schneider Electric

Vincent Petit, SVP de Pesquisa sobre Transição Climática e Energética, chefe do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Thomas Kwan, Vice President Global de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Enerdata

Quentin Bchini, Gerente de Projeto, de Previsão de Energia Global, Enerdata

Magali Mellon, Especialista em Projeto, Previsão de Energia Global, Enerdata

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às seguintes pessoas por seus valiosos insights, revisão dos primeiros rascunhos e envolvimento ativo no desenvolvimento e melhoria de nosso trabalho e colaboração com o MDIC do Brasil:

Gustavo Saboia Fontenele e Silva, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Luiz Camargo De Miranda, Ministério da Justiça

Leonardo Belvino Pova, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Demetrio Florentino de Toledo Filho, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Jorge Luis Ferreira Boeira, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

Karolina Gutiez, Schneider Electric

Fabrizio Sardelli Panzi, Amcham Brasil

André Luis Ribeiro Barbosa, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Juliana Tamanaha, Ministério dos Transportes


George Yun, Ministério dos Transportes

Isabella Scorzelli, E+

Simone Klein, E+

Rosana dos Santos, E+

Juliana Klas, UFRGS

Schneider
 Electric

Schneider Electric™

Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade

Estrutura de políticas de estímulo à demanda para indústrias com alta emissão

com o apoio do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços do Brasil

Schneider
Electric

Projetando ecossistemas industriais para a prosperidade, por meio de sustentabilidade



Prefácio

À medida que nossa evolução industrial continua rumo a uma economia mais sustentável e competitiva, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços reconhece que a transformação deve ser fundamentada em estruturas de políticas baseadas em evidências que aproveitem tanto nossas vantagens exclusivas quanto o imperativo global da descarbonização.

A parceria com o Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric representa uma colaboração para aprofundar nossa compreensão dos mecanismos de políticas que podem acelerar a transformação industrial. Este segundo relatório, com foco em Políticas de Estímulo à Demanda para indústrias com alta emissão, fornece insights críticos que complementam nossos esforços contínuos para elaborar a Política Nacional de Descarbonização Industrial e avançar as missões delineadas na iniciativa Nova Indústria Brasil.

A política industrial brasileira reconhece cada vez mais que alcançar nossos compromissos climáticos, mantendo a competitividade econômica, exige instrumentos de política sofisticados que vão além das intervenções tradicionais no lado da oferta. Os mecanismos de estímulo à demanda analisados neste relatório, desde contratos de carbono por diferença até compras públicas baseadas em desempenho, oferecem caminhos para criar mercados para tecnologias de baixo carbono, preservando a concorrência e os incentivos à inovação.

A matriz de energia renovável do nosso país, os abundantes recursos naturais e a crescente base industrial nos posicionam de forma única para nos beneficiarmos de políticas de estímulo à demanda bem elaboradas. Ao nos prepararmos para sediar a COP30, estamos comprometidos em demonstrar que a transformação industrial sustentável pode impulsionar simultaneamente o crescimento inclusivo, a liderança tecnológica e a competitividade das exportações.

A análise aqui apresentada enriquece nosso diálogo contínuo com a indústria, a academia e a sociedade civil sobre como as políticas públicas podem catalisar o investimento privado na escala e velocidade necessárias para uma descarbonização significativa. As experiências das primeiras implementações em outros países, combinadas com as oportunidades e os desafios específicos do Brasil, fornecem uma base valiosa para o desenvolvimento de políticas que atendam aos nossos objetivos de desenvolvimento nacional.

No MDIC, permanecemos dedicados a fomentar um ecossistema industrial que gere prosperidade por meio da sustentabilidade. As informações contidas neste relatório contribuem para o nosso esforço coletivo de elaborar políticas que sejam ambiciosas em seus objetivos ambientais e pragmáticas em sua implementação, garantindo que a transformação industrial do Brasil proporcione benefícios compartilhados para empresas, trabalhadores e comunidades em todo o país.

O caminho para uma economia industrial descarbonizada exige colaboração contínua entre instituições públicas, parceiros do setor privado e organizações de pesquisa comprometidas com soluções baseadas em evidências. Essa parceria exemplifica o tipo de cooperação técnica que fortalece nossa capacidade de desenvolvimento de políticas, mantendo a independência e o rigor essenciais para uma governança eficaz.

Julia Cortez da Cunha Cruz
Secretária de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria
Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC)
Brasília, Brasil

Seu parceiro em tecnologia de energia



Quando iniciamos nossa pesquisa sobre a descarbonização da indústria pesada, ficamos impressionados com a urgência, o debate acalorado e os modelos díspares de como as políticas públicas poderiam criar uma transformação industrial genuína na escala necessária. Na Schneider Electric, nosso grupo do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade se dedica há muito tempo ao diálogo intersetorial e ao estudo empírico, porém frequentemente nos deparávamos com a mesma questão: se a maioria dos caminhos tecnológicos já é conhecida e se as principais economias definiram suas ambições climáticas, por que tão pouco investimento chega ao cerne do desafio das emissões da indústria, aqueles setores considerados “difíceis de descarbonizar”?

Este relatório foi concebido a partir da crença de longa data do nosso grupo na importância da demanda como principal motor de mudança e, neste caso, em relação às políticas públicas. Nossa equipe reconheceu a necessidade de fornecer soluções concretas e viáveis para os formuladores de políticas que enfrentam questões em que estão em jogo nada menos que a competitividade futura e a credibilidade climática das principais economias, especialmente as emergentes.

O que você encontrará neste relatório não é uma visão idealizada para emissões líquidas zero na indústria, nem um compêndio de ciência ou engenharia inovadoras. Em vez disso, este relatório é uma ponte entre o conceitual e o operacional, o acadêmico e o prático. Concentramos a análise diretamente nos mecanismos de estímulo à demanda. Roteiros tecnológicos setoriais detalhados, modelos exaustivos de custo-benefício, políticas de pressão da oferta e cenários macroeconômicos estão praticamente ausentes, não por serem irrelevantes, mas porque inúmeras fontes excelentes já os abordaram. Nosso objetivo aqui é mais específico, mas, esperamos, extremamente útil: fornecer ao profissional e ao tomador de decisões bases sólidas para estruturar, sequenciar e implementar políticas de estímulo à demanda, com foco especial em contextos de economias emergentes.

Ao longo do processo de pesquisa, ficamos cada vez mais convencidos de que a transformação no mundo real depende menos de modelos de políticas “ideais” do que da sequência e adaptação criteriosas dos instrumentos às realidades institucionais e da infraestrutura. Grande parte do valor deste trabalho, em nossa opinião, deriva não do próprio conjunto de ferramentas, cujos componentes (contratos de carbono por diferença, compromissos avançados de mercado, compras verdes, normas) estão bem estabelecidos, porém de estrutura integrada.

Ao sintetizar e implementar instrumentos já consagrados, o relatório oferece orientações práticas para a construção das bases do mercado, a coordenação das partes interessadas e a sinalização de uma direção crível a longo prazo. Nossa ênfase em “a mensuração precede os mercados”, “as instituições precedem os instrumentos” e a cuidadosa transição entre as fases refletem lições aprendidas pelos formuladores de políticas, às vezes por meio de erros ou correções de rumo dispendiosas.

Nos apoiamos no trabalho de muitos, incluindo, entre outros, o conjunto de ferramentas da Agência Internacional de Energia e os estudos de demanda da RFF. Nossas perspectivas únicas oferecem regras de sequenciamento explícitas e objetivas, chamam a atenção para a complexa integração da precificação de carbono, padrões, comércio e P&D, e analisam francamente as falhas de políticas (desde a falência da Fulcrum BioEnergy à revogação federal do programa Buy Clean). Não é a novidade pela novidade que distingue este documento, mas a tradução de conhecimento fragmentado em um guia operacional que reconhece as difíceis escolhas, os desafios específicos de cada contexto e o raro alinhamento entre oportunidade e preparo.

Este documento não é prescritivo, e isso é intencional. Não prescrevemos “o que o país X deve fazer”, nem afirmamos uma única estratégia ideal para todos os mercados emergentes. Em vez disso, nosso objetivo é fornecer aos profissionais um conjunto de ferramentas, uma lógica de sequenciamento e uma compreensão tanto da necessidade quanto das limitações do estímulo à demanda em uma transição industrial mais ampla. A intenção do relatório é acelerar o aprendizado e o diálogo, servindo como referência para equipes de políticas, consultores e ministérios à medida que enfrentam escolhas difíceis sobre onde e como intervir. A esperança é que, no final, essas ideias não sejam apenas discutidas, mas implementadas, aprimoradas e superadas pelas próprias comunidades e governos que agora navegam por um dos pontos de virada mais profundos da política industrial.

Rafael Segrera – Presidente da zona América do Sul, da Schneider Electric

Vincent Petit, Vice-Presidente Sênior de Pesquisa em Transição Climática e Energética, chefe do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Thomas Kwan, Vice-Presidente Global de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais, Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™



Schneider Electric

Apresentação do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade

A conscientização global por um mundo mais inclusivo e com impacto climático positivo está em seu ponto mais alto. Isso inclui as emissões de carbono, bem como a prevenção de danos ambientais e da perda de biodiversidade. Estados-nação e corporações estão cada vez mais assumindo compromissos climáticos e incluindo temas de sustentabilidade em sua governança. Entretanto, o progresso está longe do ideal. Para que a sociedade global alcance esses objetivos, são necessárias mais ações e agilidade.

Como podemos transformar esse momentum em realidade? Alinhando as ações aos objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas. Aproveitando a pesquisa científica e a tecnologia. Ao obter uma melhor compreensão do futuro da energia e da indústria, e das mudanças sociais, ambientais, tecnológicas e geopolíticas que ocorrem ao nosso redor. Ao reforçar os fatores legislativos e financeiros que podem produzir mais ações. E, deixando claro o que os setores público e privado podem fazer para que tudo isso aconteça.

A missão do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ é examinar os fatos, as questões e as possibilidades, analisar os contextos locais e entender o que as empresas, as sociedades e os governos podem e devem fazer mais. Nosso objetivo é compreender as tendências atuais e futuras que afetam o cenário energético, empresarial e comportamental para antecipar desafios e oportunidades. Por meio dessa perspectiva, contribuimos com insights diferenciados e práticos.

Construímos nosso trabalho com base em intercâmbios regulares com especialistas institucionais, acadêmicos e de pesquisa, colaborando com eles em projetos de pesquisa, quando relevante. Nossas descobertas estão disponíveis publicamente online, e nossos especialistas participam regularmente de fóruns para compartilhar seus insights.

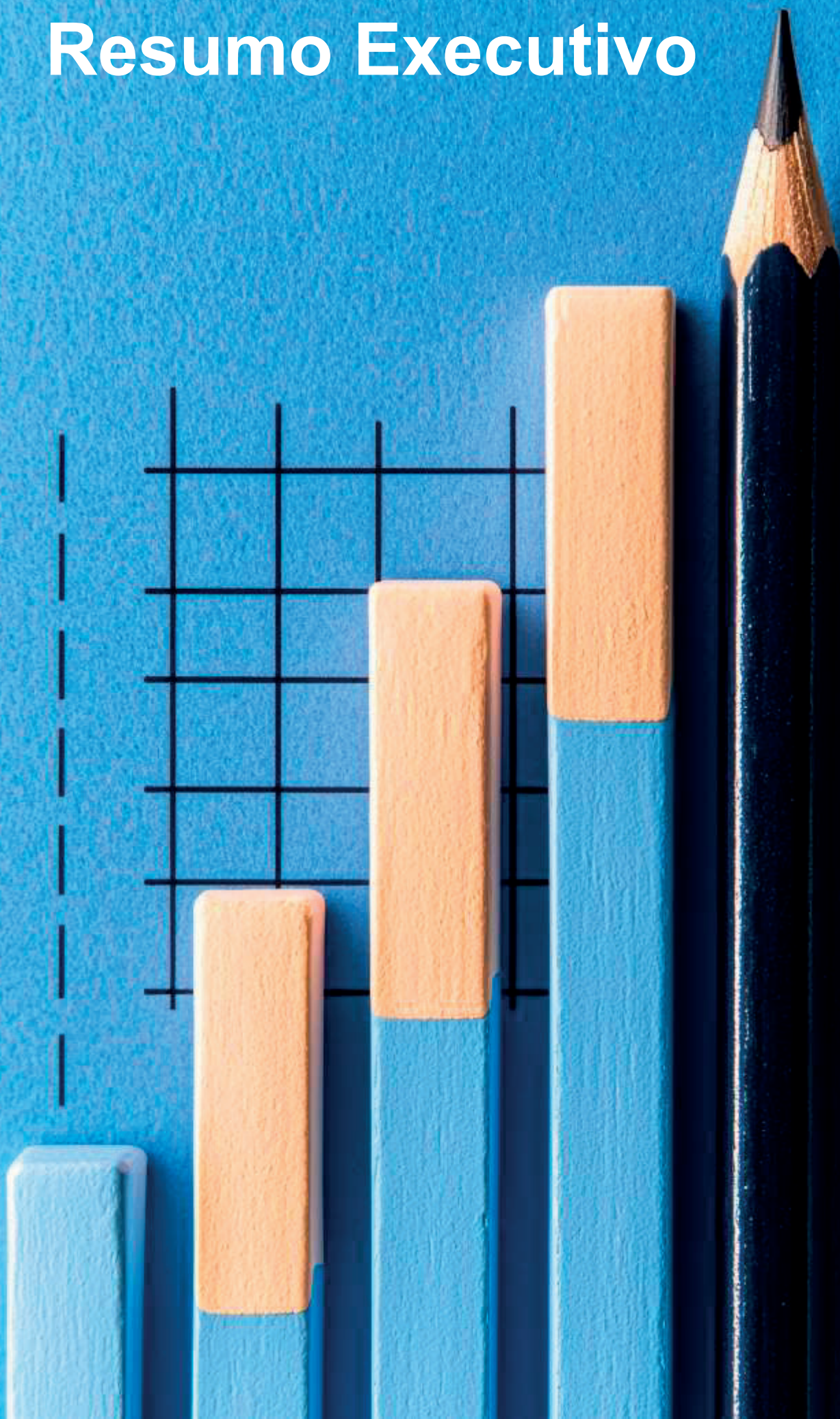
Criada em 2020, nossa equipe faz parte da Schneider Electric, líder na transformação digital da gestão de energia e automação, cujo propósito é unir progresso e sustentabilidade para todos.

Este relatório examina como políticas de estímulo à demanda podem acelerar a implantação de tecnologias de baixo carbono em setores de difícil descarbonização, criando, ampliando e estabilizando a demanda de mercado. A análise demonstra que políticas de pressão da oferta, por si só, se mostram insuficientes para superar a lacuna de comercialização enfrentada por processos industriais de capital intensivo. Mecanismos de estímulo à demanda, incluindo compras públicas com limites de carbono incorporado, contratos de carbono por diferença e compromissos antecipados de mercado, fornecem a certeza de receita e os sinais de mercado necessários para mobilizar aproximadamente os US\$ 30 trilhões em capital necessário para a transformação industrial até 2050.

Evidências de implementações iniciais revelam que instrumentos de estímulo à demanda bem projetados podem desbloquear investimentos privados substanciais, ao mesmo tempo em que impulsionam reduções de custos por meio de aprendizado e efeitos de escala. O relatório fornece orientações práticas para formuladores de políticas sobre o projeto de instrumentos, implementação de programas e integração de políticas, com base em casos de sucesso. Enfatiza a implantação coordenada de instrumentos complementares, sequenciados para criar mercados iniciais protegidos.



Resumo Executivo



Resumo Executivo

Setores de difícil descarbonização, incluindo aço, cimento, alumínio, produtos químicos, aviação, transporte marítimo e caminhões pesados, geram coletivamente aproximadamente 40% das emissões industriais globais, liberando cerca de 14 Gton. de CO₂ equivalente por ano. Sua transformação exige uma coordenação sem precedentes entre as diversas áreas de políticas públicas, necessitando de um investimento de capital estimado em US\$ 30 trilhões até 2050, com quase 70% necessários antes de 2040.

Em 2022, apenas 3% do investimento global em transição energética monitorado atingiu tecnologias industriais de baixo carbono nesses setores, apesar de sua contribuição substancial para as emissões. Essa lacuna reflete não apenas limitações tecnológicas, mas a ausência fundamental de uma demanda de mercado crível na escala e nos preços necessários para justificar a implantação de capital em larga escala em indústrias de capital intensivo e globalmente competitivas.

O desafio da comercialização

Políticas de pressão da oferta, por si só, não conseguem superar a lacuna de comercialização para tecnologias industriais de capital intensivo. A pressão da tecnologia cria prontidão no lado da oferta, mas não gera os sinais de demanda viáveis necessários para a implantação em larga escala, criando um persistente vale da morte que os mecanismos de demanda devem abordar.

Quatro limitações estruturais se materializam quando a promoção tecnológica opera isoladamente: descompassos de tempo entre a capacidade técnica e a prontidão do mercado, descompassos de escala em que as demonstrações não conseguem atingir a competitividade de custos sem demanda garantida, falhas de coordenação em cadeias de valor interdependentes e desvantagens para os pioneiros que impedem a adoção inicial. Essas falhas apontam para mecanismos de estímulo à demanda que criam, ampliam e estabilizam mercados, ao mesmo tempo que impulsionam a redução de custos por meio de aprendizado e de escala.

Essas falhas apontam para uma necessidade política fundamental: mecanismos de estímulo à demanda que criam, ampliam e estabilizam mercados para tecnologias de baixo carbono. Ao fornecer certeza de receita e sinais de mercado, esses instrumentos convertem a prontidão técnica em oportunidades de investimento viáveis, ao mesmo tempo que impulsionam a redução de custos por meio de aprendizado prático e de economias de escala.

O conjunto de ferramentas de estímulo à demanda

O relatório identifica cinco instrumentos principais, cada um abordando falhas de mercado específicas, operando com maior eficácia em conjunto. Os mecanismos de estímulo à demanda devem complementar, e não substituir, a precificação de carbono, os padrões de desempenho e as medidas comerciais para maximizar a eficácia. As compras públicas verdes com limites de carbono incorporado alavancam o poder de compra do governo para criar mercados iniciais protegidos para materiais de baixo carbono. As especificações baseadas em desempenho mantêm a neutralidade tecnológica, ao mesmo tempo que recompensam o desempenho de carbono verificado. A eficácia depende da implementação em fases, de licitações competitivas e da coordenação interjurisdicional para atingir escala suficiente.

Os contratos de carbono por diferença (CCfDs) abordam as falhas do mercado de capitais e as desvantagens dos pioneiros, garantindo preços fixos para emissões evitadas em prazos de 10 a 20 anos. O programa pioneiro da Alemanha oferece garantias de receita de 15 anos, pagando a diferença de custo verificada entre a produção de baixo carbono e a produção baseada em combustíveis fósseis, líquida dos preços do ETS da União Europeia. A estrutura de pagamento bidirecional aprimora a disciplina fiscal, recuperando o apoio quando os preços do carbono excedem os preços fixos. Os CCfDs mostram-se particularmente adequados para setores com opções de redução de emissões discretas e irregulares, onde a longa vida útil dos ativos e as trajetórias incertas dos preços do carbono desencorajam o investimento privado sem garantias de receita.

Os compromissos de mercado avançados superam as falhas de coordenação e o risco de contraparte, garantindo compras futuras em termos pré-acordados quando as tecnologias atendem a critérios de desempenho específicos. O mecanismo H2Global exemplifica isso por meio de uma estrutura de leilão duplo, na qual um intermediário com capital público celebra contratos de compra de longo prazo com produtores de hidrogênio limpo e revende por meio de leilões competitivos de curto prazo, com fundos públicos cobrindo a diferença de preço. Teoricamente, esse modelo cria contratos de fornecimento viáveis para os fornecedores, e preservando os testes de mercado no lado da demanda.

Os padrões de desempenho estabelecem limites mínimos de desempenho de carbono e exigem a divulgação, criando demanda por conformidade para tecnologias de baixo carbono, ao mesmo tempo que permitem a aquisição baseada em desempenho. Por exemplo, códigos de construção que especificam intensidades máximas de carbono incorporado para materiais de construção, juntamente com Declarações Ambientais de Produto obrigatórias, permitem que os compradores se diferenciem com base no desempenho de carbono.

Os mecanismos de precificação de carbono e ajuste de fronteira internalizam as externalidades climáticas e evitam a fuga de carbono, criando sinais de preço complementares que funcionam em conjunto com instrumentos de estímulo à demanda. Os CCfDs são complementares, garantindo preços de exercício para emissões evitadas em relação aos preços de referência do mercado de carbono, estabilizando as receitas sem prejudicar sinais de limite mais amplos.

Estrutura de implementação em três fases

Este relatório apresenta uma abordagem sistemática para a implementação de políticas de demanda. Ele está estruturado em torno de três fases sequenciais, cada uma caracterizada por objetivos, instrumentos e critérios de transição distintos.

Fase 1: Construção da base

A Fase 1: Fundação e preparação (anos 0-3) estabelece as pré-condições para a criação eficaz de mercados. Antes que as políticas de estímulo à demanda possam criar efetivamente mercados para materiais e tecnologias de baixo carbono, os governos devem estabelecer sistemas fundamentais e capacidade institucional. A Fase 1 concentra-se na construção de cinco pilares de infraestrutura críticos que permitem a implementação subsequente de políticas e a expansão do mercado.

Cinco linhas de trabalho principais

Sistemas de contabilização de carbono confiáveis

A base de qualquer estrutura de política baseada em desempenho depende de uma medição transparente e verificável do carbono.

O estabelecimento de protocolos operacionais para a Declaração Ambiental de Produto (EPD) e regras para categorias de produtos cria a infraestrutura de medição que permite aos formuladores de políticas e compradores distinguir produtos genuinamente de baixo carbono de alegações sem fundamento. As regras para categorias de produtos devem ser desenvolvidas por meio de processos técnicos consensuais.

A capacidade de verificação por terceiros deve ser expandida para auditar essas declarações nas principais regiões e setores produtores, garantindo a credibilidade dos dados nos quais fornecedores e compradores possam confiar.

Padrões da indústria e roteiros tecnológicos

Os agentes de mercado precisam de clareza sobre as expectativas de desempenho para orientar a alocação de capital a longo prazo. Comitês técnicos multissetoriais devem estabelecer parâmetros de intensidade de carbono específicos para cada produto, que reflitam as melhores práticas atuais, ao mesmo tempo que definem roteiros de redução de limites nas fases subsequentes. Esses padrões fornecem aos fornecedores horizontes de planejamento visíveis, sinalizando na prática o que o desempenho de baixo carbono significa hoje e qual será o padrão em três, cinco e dez anos, permitindo decisões de investimento informadas sem criar encargos de conformidade impossíveis.

Autoridade e governança dedicadas ao programa

As políticas de estímulo à demanda exigem continuidade institucional e coordenação que ultrapassem as fronteiras tradicionais dos ministérios. Os governos devem estabelecer autoridades programáticas com mandatos explícitos que abranjam estratégia de aquisição, administração de contratos, desenvolvimento de padrões e verificação de conformidade. Igualmente importante é uma arquitetura de governança que conecte política industrial, política energética, objetivos climáticos e instituições financeiras para garantir que as decisões de aquisição estejam alinhadas com metas mais amplas de descarbonização e que os ministérios da fazenda compreendam a lógica de investimento por trás dos mecanismos de apoio.

Projetos-piloto de aquisição governamental

Antes de expandir os mecanismos de estímulo à demanda para toda a economia, projetos-piloto na infraestrutura governamental geram aprendizado essencial. Os primeiros projetos-piloto devem abranger diversos tipos de projetos e bases de fornecedores, permitindo que as agências desenvolvam capacidade interna para especificar o desempenho de carbono incorporado, verificar as alegações dos fornecedores e gerenciar os processos de aquisição com base em critérios de carbono. Esses projetos fornecem dados quantificados sobre a prontidão dos fornecedores, os prêmios de custo reais para produtos de baixo carbono e os cronogramas de implementação viáveis. Essas evidências são essenciais para refinar as políticas antes de uma implementação mais ampla.

Validação de tecnologia de demonstração

Demonstrações paralelas de P&D nos níveis de prontidão tecnológica 7-8 comprovam que os caminhos de descarbonização podem atingir o desempenho necessário a um custo e escala (viáveis). Essas demonstrações geram os dados de desempenho técnico e a experiência operacional que reduzem o risco percebido para implantações comerciais subsequentes, aumentando a confiança entre investidores e potenciais empresas adotantes.

Critérios de transição para a Fase 2

Em vez de avançar com base em cronogramas fixos, a progressão para a Fase 2 deve começar

quando os critérios objetivos de capacidade forem atendidos:

- Os sistemas EPD estão operacionais, gerando dados verificados em nível de produto dos principais produtores nos setores-alvo.
- Os padrões da indústria alcançaram aceitação consensual, com roteiros de redução da intensidade de carbono acordados entre as partes interessadas do governo e da indústria.
- A autoridade do programa está funcionando efetivamente e demonstrou capacidade administrativa em aquisição, verificação e coordenação de padrões.
- Os projetos-piloto foram concluídos com evidências documentadas de viabilidade de implementação, impactos de custo e resposta do fornecedor.
- As demonstrações de tecnologia validaram que os caminhos de descarbonização atendem aos requisitos de desempenho e custo.

Essa abordagem permite que as ferramentas da Fase 2, particularmente os instrumentos de demanda, como mandatos de aquisição e mecanismos de contrato, entrem em um ambiente de mercado com infraestrutura fundamental suficiente para funcionar efetivamente em escala.

Fase 2: Criação de mercado

A Fase 2: Criação e expansão de mercado (anos 3 a 10) concentra-se na implementação em larga escala de instrumentos de políticas competitivas para mobilizar capital privado e estabelecer cadeias de suprimentos viáveis e de longo prazo para alternativas de baixo carbono. Ela abrange desde o desenvolvimento tecnológico até a implementação no mercado, alavancando instrumentos competitivos de estímulo à demanda para mobilizar capital privado e estabelecer cadeias de suprimentos viáveis. A fase é caracterizada pela construção sistemática de mercado, em vez de intervenções isoladas.

Estabelecendo infraestrutura de mercado por meio de liderança pública

O governo desempenha um papel fundamental ao expandir e ampliar as compras públicas. Este é o fator mais direto para criar uma demanda estável e previsível. Essa expansão deve abranger as principais categorias de infraestrutura com limites decrescentes de carbono incorporado que seguem roteiros transparentes e plurianuais. Fundamentalmente, a coordenação interjurisdicional de normas de aquisição agrega volumes de compras para atingir a escala necessária para a transformação no lado da oferta.

Essa abordagem coordenada evita a fragmentação e permite que os fornecedores justifiquem o investimento em instalações de produção de baixo carbono.

Criando condições de mercado competitivas

A alocação competitiva por meio de leilões reversos cumpre duas funções essenciais: revela os custos reais de redução de emissões enfrentados pelos fornecedores e ajuda a controlar os gastos públicos, recompensando soluções com custos competitivos. Essa pressão competitiva cria incentivos contínuos para a inovação e redução de custos, ao mesmo tempo que gera transparência sobre a economia da transição.

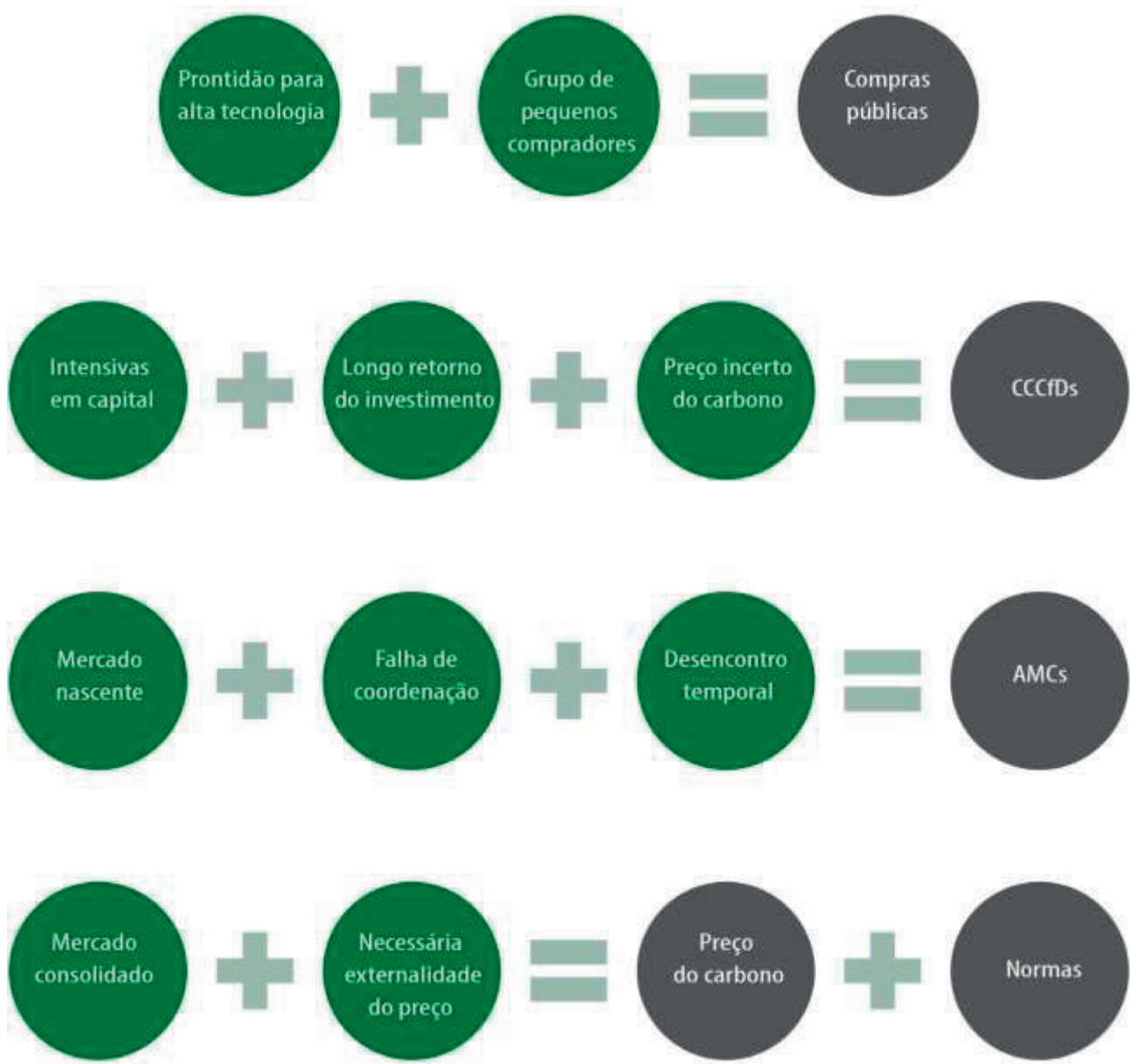


Figura EX1: Orientação geral sobre a adequação da seleção de instrumentos de política de estímulo à demanda.

Criando ativos produtivos compartilhados

A infraestrutura de agrupamentos industriais (ou seja, sistemas compartilhados de produção e distribuição de hidrogênio, redes de transporte e armazenamento de CO₂ e eletricidade renovável interconectada) acelera a redução de custos por meio do compartilhamento de ativos. Veículos ou consórcios especializados devem gerenciar a coordenação entre os produtores concorrentes, transformando a infraestrutura de uma barreira em uma vantagem competitiva. Esse modelo de ativos compartilhados é particularmente poderoso em regiões industriais concentradas, onde várias instalações podem acessar serviços públicos comuns.

Padronização das Expectativas de Desempenho

Os padrões de desempenho devem estabelecer requisitos de intensidade de carbono decrescentes entre os participantes do mercado, criando pressão sistemática para a transformação que se estende além dos pioneiros na adoção. Em vez de escolher vencedores por meio de subsídios, esses padrões criam condições de concorrência equitativas, onde os produtores devem atender a limites progressivamente mais rigorosos, recompensando tanto os participantes já estabelecidos que aprimoram seus processos quanto os novos entrantes com tecnologias superiores.

Sinalização de compromisso de longo prazo

Os compromissos antecipados de mercado para tecnologias emergentes preenchem a lacuna entre a escala piloto e a implantação comercial. Ao se comprometerem a comprar volumes específicos quando os critérios de desempenho forem atendidos, os governos transformam o desenvolvimento tecnológico em uma oportunidade de investimento com demanda viável. Isso reduz o risco de contraparte para provedores de capital privado e para as multidões em investimentos institucionais.

Crítérios de transição para a Fase 3

O mercado demonstra prontidão para a transição quando diversas condições se alinham: a diversidade de fornecedores surge com múltiplos produtores qualificados competindo, os prêmios de custo diminuem (aproximadamente abaixo de 20% em relação às alternativas convencionais), a densidade do mercado permite processos de seleção competitivos viáveis, mercados de conformidade se formam em torno de normas de desempenho e as cadeias de suprimentos demonstram padrões de aquisição estáveis que justificam o investimento privado contínuo sem apoio político.

Fase 3: Consolidação do mercado

Fase 3: Maturidade e transição do mercado (anos 10+) passa da fase do apoio direto para mecanismos baseados no mercado. À medida que as tecnologias amadurecem e as diferenças de custo diminuem, o apoio político transita sistematicamente de subsídios diretos para mecanismos baseados no mercado que incentivam a concorrência, mantendo a integridade ambiental.

Essa mudança reflete um princípio fundamental: à medida que as indústrias se aproximam da competitividade de custos, o apoio governamental deve diminuir gradualmente, permitindo que as forças de mercado impulsionem ainda mais a inovação e os ganhos de eficiência.

Eliminação Gradual de Subsídios e Dinâmica

Competitiva Os mecanismos de apoio iniciais, incluindo preços de exercício garantidos e níveis de apoio premium, devem ser gradualmente reduzidos à medida que as curvas de aprendizado progredem e a produção aumenta.

Em vez de eliminar abruptamente o apoio, os governos podem implementar uma redução gradual escalonada que crie cronogramas previsíveis para a indústria. Isso permite que os produtores planejem roteiros de redução de custos, garantindo, ao mesmo tempo, o surgimento de dinâmicas competitivas.

A transição de subsídios diretos para leilões competitivos de prêmios para o apoio restante reforça essa lógica: somente as tecnologias com caminhos genuínos de redução de custos podem competir por orçamentos de apoio decrescentes. As cláusulas de extinção anexadas a todos os mecanismos de apoio estabelecem datas de expiração claras, eliminando a ambiguidade sobre as trajetórias políticas de longo prazo e forçando uma convergência genuína em direção à viabilidade do mercado.

Estrutura de Precificação de Carbono Reforçada

Concomitantemente, a precificação de carbono torna-se um fator determinante da política, à medida que a convergência de custos reduz a dependência do apoio com destinação específica. Os governos podem fortalecer os mercados de carbono por meio de reduções de licenças que apertam os limites de emissões e aumento de impostos que elevam o preço mínimo efetivo do carbono. Igualmente importante, a alocação gratuita, inicialmente fornecida para proteger a competitividade durante a formação do mercado, é implementada em

fases à medida que a produção limpa se torna competitiva em termos de custos. Os mecanismos de ajuste de carbono na fronteira podem, simultaneamente, evitar a desvantagem competitiva das importações produzidas sob padrões climáticos mais fracos, garantindo que os investimentos domésticos em descarbonização não sejam prejudicados por vazamentos de carbono.

Juntos, esses mecanismos de precificação de carbono criam incentivos persistentes para a melhoria contínua além da transição tecnológica inicial, motivando os setores a buscar ganhos de eficiência e soluções de próxima geração, em vez de simplesmente consolidar tecnologias maduras de baixo carbono.

Integração de compras verdes

As compras governamentais integram simultaneamente os critérios de carbono incorporado às regras padrão de compras em todas as agências, indo além de programas especiais de “compras verdes” para tornar o desempenho de carbono um requisito padrão. Essa integração deve ocorrer juntamente com a eliminação gradual dos suplementos orçamentários e pagamentos adicionais para materiais de baixo carbono. À medida que os preços convergem, a justificativa econômica para orçamentos suplementares desaparece; em vez disso, o desempenho de carbono torna-se um critério de desempenho incorporado às especificações padrão de compras, semelhante aos requisitos de qualidade ou durabilidade.

Descoberta de preços orientada pelo mercado

Finalmente, os mecanismos secundários baseados no mercado podem apoiar a descarbonização contínua além das atividades dirigidas pelo governo. Os mercados secundários de créditos de desempenho, transações voluntárias de carbono e produtos financeiros verdes especializados permitem a descoberta de preços quando se desenvolve liquidez de mercado suficiente. Esses mecanismos promovem a transição de preços definidos pelo governo para preços transparentes determinados pelo mercado, sinalizando um valor de escassez genuíno e alocando capital para as oportunidades de redução de emissões restantes da maneira mais eficiente. Esta fase final representa o ápice da política de estímulo à demanda: o estímulo governamental não é mais necessário porque existe infraestrutura de mercado sustentável para financiar a descarbonização adicional.



Evidências da implementação inicial

Cinco estudos de caso foram fundamentais para o desenvolvimento da estrutura, tanto em termos de eficácia quanto de controles sobre como mecanismos de estímulo à demanda bem projetados podem mobilizar investimentos privados e impulsionar a redução de custos.

A H2Global aborda os problemas de coordenação do tipo "ovo e galinha" por meio de um intermediário que contrata em ambos os lados dos mercados nascentes. O mecanismo de leilão duplo fornece contratos de compra de longo prazo viáveis para produtores de hidrogênio limpo, enquanto realiza leilões de revenda competitivos para compradores europeus, criando descoberta de preços e preservando os testes de mercado.

Os Contratos por Diferença (CFDs) do Reino Unido corrigiram a volatilidade da receita e o risco de investimento para ampliar tecnologias de energia renovável com uso intensivo de capital. O esquema garante preços de exercício reais fixos por prazos de quinze anos, com uma contraparte central adicionando credibilidade e reduzindo os custos de transação.

Estudos atribuem grande parte da queda nos custos da energia eólica offshore à interação de grandes volumes previsíveis de leilão com melhores condições de financiamento de projetos.

O HYBRIT demonstra mecanismos coordenados de estímulo à demanda, contratos de longo prazo e investimento público conjunto para reduzir os riscos de processos industriais inovadores. A redução direta baseada em hidrogênio, combinada com a produção de aço em forno elétrico a arco, pode reduzir as emissões em mais de 90% em relação às rotas convencionais quando alimentada por eletricidade renovável. A estrutura de parceria entre uma produtora de aço estabelecida e duas empresas estatais que controlam eletricidade e minério de ferro criou um alinhamento da cadeia de valor.

A Iniciativa Buy Clean dos EUA avançou compras federais para criar mercados iniciais para materiais de construção com baixo carbono incorporado, vinculando o financiamento de projetos que atendem a limites mais baixos com o desenvolvimento da infraestrutura de medição. As especificações baseadas em desempenho mantiveram a neutralidade tecnológica, ao mesmo tempo que recompensavam resultados verificados. A rescisão do programa em nível federal em janeiro de 2025 criou um experimento natural, com nove estados continuando e expandindo seus programas.

Os combustíveis de aviação sustentáveis ilustram combinações de políticas que incluem créditos de produção, mandatos de mistura, compras públicas e compromissos antecipados de mercado. A União Europeia adotou mandatos de mistura vinculativos que aumentam gradualmente ao longo do tempo no âmbito do ReFuelEU Aviation, criando trajetórias de demanda previsíveis. Entretanto, a falência da Fulcrum BioEnergy em setembro de 2024, apesar de ter garantido acordos significativos de fornecimento para companhias aéreas, ilustra que os compromissos de demanda por si só não podem superar todos os riscos de desenvolvimento de projetos.

Sete princípios de projeto da política de demanda atraente para setores de difícil redução de emissões

Sete princípios de projeto essenciais emergiram da análise:

1. Implementar políticas sequencialmente, desde as bases até a escala. A mensuração precede os mercados, pois as políticas baseadas no desempenho não funcionam sem uma contabilização de carbono confiável. As instituições precedem os instrumentos porque mecanismos sofisticados

exigem capacidades administrativas que as agências tradicionais normalmente não possuem.

2. Equilibrar a neutralidade tecnológica com direcionamento estratégico. A neutralidade ampla beneficia tecnologias consolidadas próximas da paridade, enquanto instrumentos direcionados são mais adequados para rotas inovadoras que enfrentam riscos específicos, onde os benefícios sociais superam a captura privada.

3. Estrutura dos contratos para garantir previsões financeiras e disciplina fiscal. Os contratos bidirecionais de compensação de carbono por diferença (CCfDs), que pagam a diferença entre os preços de exercício e as referências transparentes de carbono ou commodities, oferecem proteção contra preços baixos, ao mesmo tempo que recuperam o apoio durante períodos de preços altos, limitando os custos fiscais e melhorando a acessibilidade social ao evitar ganhos inesperados.

4. Utilizar uma seleção competitiva para revelar custos e controlar os gastos. Mecanismos de leilão reverso demonstram eficácia quando as condições de mercado apresentam múltiplos fornecedores especializados e resultados mensuráveis claramente definidos.

5. Incorporar sistemas robustos de mensuração e avaliação. A mensuração de desempenho deve vincular os resultados aos impactos por meio de indicadores adequados à específica, projetos de avaliação contrafactual e processos de aprendizagem adaptativa.

6. Coordenar instrumentos entre os domínios da política. Os CCfDs (Créditos de Compensação por Diferença) e a precificação do carbono criam mecanismos complementares de segurança, com os CCfDs fornecendo metas mínimas de receita, enquanto a precificação do carbono estabelece metas mínimas de custo para as emissões.

7. Manter uma política de durabilidade por meio de um projeto transparente. Instrumentos bidirecionais que limitam ganhos extraordinários, estruturas orçamentárias plurianuais e benefícios geograficamente distribuídos aumentam a legitimidade e a sustentabilidade.

Implicações

A transformação de setores de difícil descarbonização representa tanto um desafio sem precedentes quanto uma oportunidade crucial para alcançar as metas climáticas globais. A necessidade de capital de aproximadamente US\$ 30 trilhões até 2050, o orçamento de carbono cada vez mais restrito para evitar os piores danos climáticos e os longos ciclos de investimento na indústria pesada deixam pouca margem para atrasos.

Políticas de estímulo à demanda como ferramentas para superar a lacuna de negociações enfrentadas pelas tecnologias de baixo carbono, convertendo a prontidão técnica em oportunidades de investimento viáveis na escala e na velocidade permitida. Isso requer atenção ao projeto dos instrumentos, ao alinhamento com o estágio de mercado, à integração em estruturas políticas mais amplas e ao desenvolvimento da capacidade institucional. A estrutura de três fases apresentada aqui oferece um roteiro para implementação, permitindo que a formulação eficaz de políticas deva considerar as situações nacionais específicas, as capacidades institucionais e as condições de mercado.

A urgência dos objetivos climáticos e econômicos exige uma expansão rápida em todas as jurisdições e setores, com a implantação coordenada de instrumentos complementares sequenciados para criar mercados iniciais protegidos que impulsionem as curvas de aprendizado e as reduções de custos, preservando a dinâmica competitiva. Os formuladores de políticas devem ir além dos programas piloto e partir da criação sistemática de mercados, aproveitando as lições aprendidas com as implementações iniciais e adaptando as abordagens aos contextos e capacidades locais.

Índice

Prefácio	2	Referências do Capítulo 4	33
Resumo executivo	6	5. Estudos de caso: O que está funcionando	34
Índice	12	Resumo do Capítulo 5	35
Lista de tabelas	13	H2Global: Fazer marketing de leilão duplo	35
1. Por que setores difíceis de descarbonizar e estímulo à demanda?	14	Contratos por diferença no Reino Unido: Estabilização de receita	35
Resumo do Capítulo 1	15	HYBRIT: Aço livre de combustíveis fósseis com contratos de compra	36
O imperativo da descarbonização	15	EUA Buy Clean: Aquisições federais/estaduais	37
Escopo setorial e barreiras compartilhadas	15	Combustíveis de aviação sustentáveis: Mandatos, créditos, AMCs	37
Por que o estímulo à demanda é eficaz (e o que é isto?)	16	Referências do Capítulo 5	38
Referências do Capítulo 1	17	6. Desenvolver programas que mobilizam capital privado	34
2. Panorama das emissões e instantâneos do setor	18	Resumo do Capítulo 6	41
Resumo do Capítulo 2	19	Escopo e público-alvo	41
Emissões e tendências atuais	19	Estrutura e duração do contrato	41
Aço: Emissões e rotas de transição	19	Seleção competitiva: Leilões e solicitações de propostas (RFPs)	42
Cimento, alumínio e produtos químicos primários	21	Medição e avaliação	43
Transporte: Aviação, transporte marítimo, transporte rodoviário pesado	22	Referências do Capítulo 6	43
Referências do Capítulo 2	23	7. Integrando o estímulo à demanda a um mix de políticas mais amplas	44
3. Por que a pressão da oferta por si só não é suficiente	24	Resumo do Capítulo 7	45
Resumo do Capítulo 3	25	Alinhamento com precificação de carbono, padrões e comércio	45
Emissões e tendências atuais	25	Governança e capacidade institucional	45
Os limites da pressão da tecnologia	25	Equidade e transição justa	46
Falhas que o estímulo à demanda pode corrigir	26	Referências do Capítulo 7	47
Referências do Capítulo 3	27	8. Roteiro e sequência de implementação	48
4. Ferramentas de estímulo à demanda e Manual de criação de mercado	28	Resumo do Capítulo 8	49
Resumo do Capítulo 4	29	Cronograma e sequenciamento: De nichos à escala	49
Instrumentos essenciais e quando usá-los	29	Primeiros movimentos específicos do setor	49
Criação, desenvolvimento e crescimento de mercado	30	Referências do Capítulo 8	51
Perspectiva e coordenação sistêmica	31		



9. Teoria da mudança e estrutura geral 52

Resumo do Capítulo 9 53

Livro de referência 59

Aviso legal 60

Autores 61

Agradecimentos 61

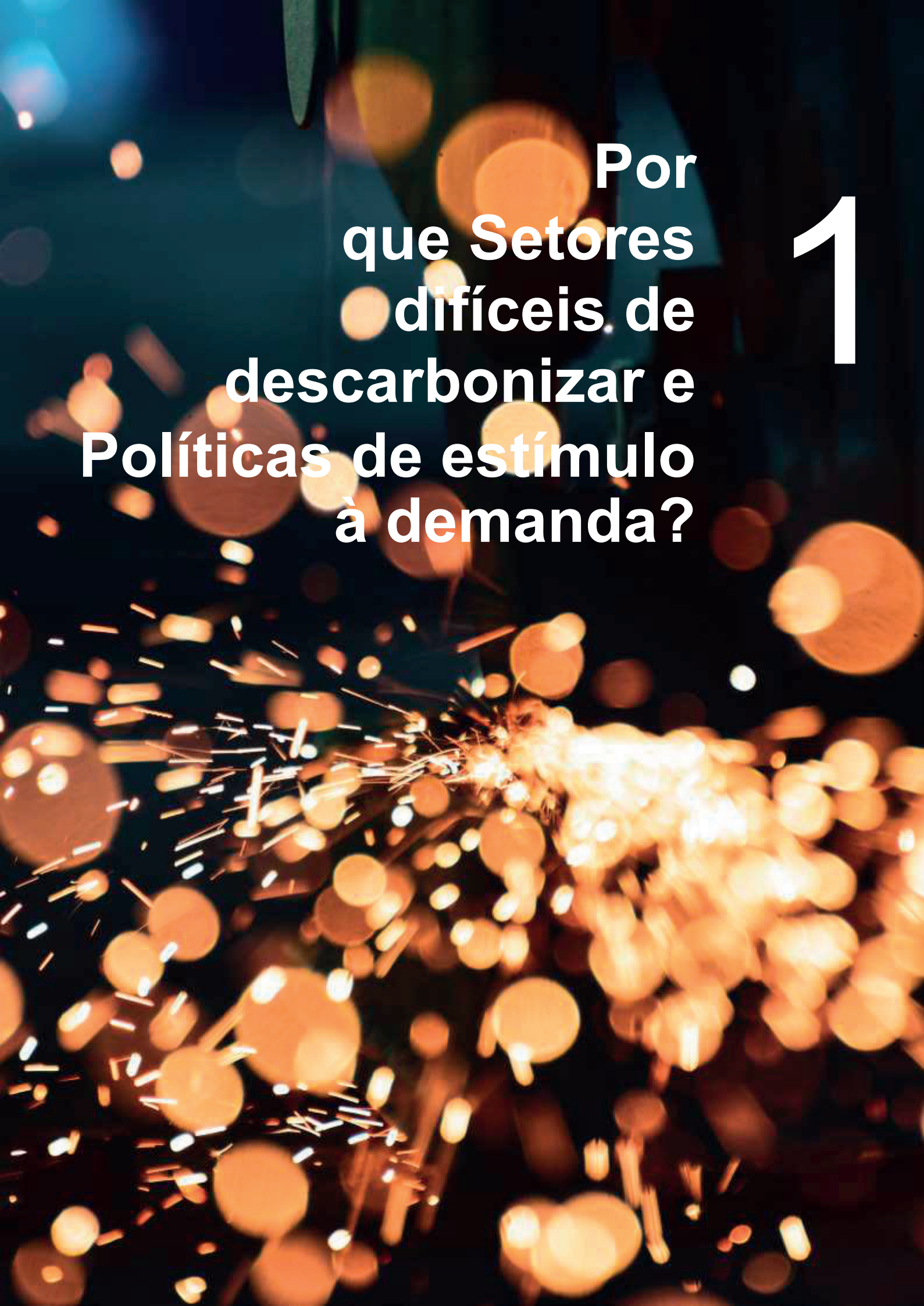
Lista de figuras e tabelas

Figura EX1: Orientações gerais sobre a adequação da seleção de instrumentos da política de estímulo à demanda 9

Tabela 4.1: Instrumentos de estímulo à demanda e alinhamento com falhas do mercado 31

Tabela 9.1: Estrutura geral de implementação de políticas de estímulo à demanda 54

Tabela 9.2: Estrutura geral de integração e coordenação de políticas de estímulo à demanda 56

The background of the slide features a close-up of a lit sparkler. The central part of the sparkler is in sharp focus, showing a bright, intense orange and yellow flame with numerous fine sparks radiating outwards. The rest of the scene is filled with soft, out-of-focus bokeh lights in shades of orange, yellow, and blue, creating a festive and celebratory atmosphere. The overall lighting is warm and dynamic.

**Por
que Setores
difíceis de
descarbonizar e
Políticas de estímulo
à demanda?**

1

1. Por que setores difíceis de descarbonizar e Por que políticas de estímulo à demanda

Resumo do Capítulo 1

Os setores de difícil descarbonização geram 40% das emissões industriais globais, mas receberam apenas 3% do investimento em transição energética em 2022, apesar de necessitarem de US\$ 30 trilhões em capital até 2050. Os setores de aço, cimento, produtos químicos, aviação e transporte marítimo enfrentam barreiras específicas: extrema intensidade de capital, criando um aprisionamento de várias décadas; competição global por commodities, que penaliza os pioneiros; emissões intrínsecas dos processos de reações químicas; e potencial limitado de eletrificação devido aos requisitos de temperatura ou densidade energética.

Políticas de pressão da tecnologia, por si só, são insuficientes, pois geram prontidão no lado da oferta sem criar os sinais de demanda necessários para a implantação em escala industrial. Quatro limitações estruturais foram identificadas: descompassos temporais, nos quais a capacidade técnica precede a prontidão do mercado; descompassos de escala, nos quais as demonstrações não conseguem atingir a competitividade de custos sem uma demanda garantida; falhas de coordenação, nas quais atores interdependentes precisam investir simultaneamente sem incentivos alinhados; e desvantagens para os pioneiros, que impedem a adoção quando os concorrentes se aproveitam indevidamente da disseminação do conhecimento.

Políticas de estímulo à demanda superam essa lacuna de comercialização, criando, ampliando ou estabilizando mercados por meio de compras públicas, contratos de carbono por diferença que garantem receitas a longo prazo, compromissos antecipados de mercado que prometem compras futuras, padrões de desempenho que exigem melhorias graduais e precificação de carbono com ajustes de fronteira. O precedente histórico da energia renovável, onde os custos da energia solar caíram 90% por meio do aprendizado orientado pela implementação, demonstra o potencial transformador quando adequadamente projetado para contextos industriais.

1.1 O imperativo da descarbonização

A ciência climática contemporânea não deixa dúvidas de que a indústria global deve passar por uma transformação profunda se a meta de 1,5 °C do Acordo de Paris quiser permanecer ao nosso alcance. A síntese mais recente de inventários setoriais mostra que os setores de aço, cimento, alumínio, produtos químicos, aviação, transporte marítimo e transporte rodoviário de longa distância, juntos, liberam cerca de 40% das emissões antropogênicas diretas de gases do efeito estufa, o equivalente a aproximadamente 15 Gton. de dióxido de carbono equivalente por ano (IEA, 2023b; IPCC, 2022). Esses setores também representam um quarto do consumo final de energia e cerca de um quinto das emissões totais de carbono quando incluídas as emissões indiretas relacionadas à eletricidade. As tendências de trajetória agravam o desafio. Na ausência de uma forte intervenção política, as emissões relacionadas a processos e energia de atividades difíceis de reduzir podem crescer mais de 50% até meados do século, impulsionadas pelo aumento da demanda por materiais, pelo crescimento da aviação em economias emergentes e pela aceleração dos fluxos de fretes de carga (IRENA, 2024). Essa trajetória de crescimento colide diretamente com o orçamento de carbono cada vez menor identificado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. De acordo com a sexta avaliação do painel, o orçamento global restante compatível com uma probabilidade igual de limitar o aquecimento a 1,5 °C se esgotará antes de 2030 se as tendências atuais persistirem.

Os últimos relatórios setoriais preparados pela Agência Internacional de Energia confirmam que nenhuma das principais indústrias de difícil descarbonização está alinhada com uma trajetória de emissões líquidas zero. No setor de ferro e aço, por exemplo, a atual implementação de tecnologias coloca o setor a caminho de uma redução de apenas dez por cento até 2030, em vez dos 30% necessários. A dimensão do desafio de investimento se mostra igualmente assustadora. A análise da Agência Internacional de Energia estima que será necessário um investimento de capital cumulativo de cerca de trinta trilhões de dólares americanos entre agora e 2050 para modernizar os ativos existentes, implementar tecnologias inovadoras, como fornos de redução direta de hidrogênio, agrupamentos de captura de carbono e usinas de combustíveis sintéticos, e modernizar as redes elétricas para fornecer energia de baixo carbono aos locais industriais. Quase setenta por cento desse montante deve ser mobilizado antes de 2040, ressaltando a urgência da transição necessária.

Os padrões de investimento atuais revelam uma alocação inadequada crítica. Em 2022, aproximadamente 97% do investimento global em transição energética monitorado foi direcionado para segmentos mais maduros, como energias renováveis, veículos elétricos, aquecimento limpo e armazenamento, restando menos de 3% para tecnologias industriais de baixo carbono em setores de difícil descarbonização, apesar de sua contribuição substancial para as emissões (BloombergNEF, 2023). Essa lacuna de investimento reflete não apenas desafios tecnológicos, mas também a ausência de uma demanda de mercado crível por produtos industriais de baixo carbono na escala e nos preços necessários para justificar a alocação de capital em larga escala.

1.2 Escopo setorial e barreiras comuns

Os setores de difícil descarbonização são caracterizados por grandes emissões relacionadas a processos, dependência de calor em alta temperatura ou combustíveis de alta densidade energética, intensidade de capital substancial e mercados globalmente integrados que expõem as empresas a preocupações com a competitividade. Sete setores atendem a esses critérios e constituem o foco da análise: aço, cimento, alumínio, produtos químicos primários, aviação, transporte marítimo e transporte rodoviário de cargas pesadas.

As características estruturais subjacentes à sua dificuldade coletiva mostram-se particularmente relevantes para a formulação de políticas.

Essas indústrias compartilham características que criam barreiras distintas à descarbonização. Primeiro, elas exibem extrema intensidade de capital, com siderúrgicas integradas, fornos de cimento ou navios de longo curso que exigem investimentos de bilhões de dólares e operam por quarenta anos ou mais, criando fortes efeitos de dependência. Segundo, elas atendem a mercados de commodities negociados globalmente, onde diferenciais de custo de até mesmo alguns pontos percentuais podem redirecionar a produção e as emissões geograficamente, expondo os pioneiros a desvantagens competitivas. Terceiro, muitos processos liberam carbono intrinsecamente por meio de reações químicas, portanto, a descarbonização exige uma reengenharia fundamental em vez de melhorias incrementais de eficiência. Quarto, as opções para eletrificação direta permanecem limitadas pela necessidade de temperaturas extremas ou por requisitos de alcance e densidade de energia baseados em combustível.

Para fins desta análise, os setores de difícil descarbonização são, portanto, definidos como aqueles cujas tecnologias de produção dominantes ou tecnologias de propulsão combinam emissões de processo inevitáveis ou restrições de combustível com alta intensidade de capital e mercados globalmente competitivos.

A análise reconhece ligações intersetoriais críticas: o aço de baixo carbono se mostra fundamental para uma construção naval mais limpa, enquanto a amônia verde pode abastecer embarcações futuras e fornecer um transportador de hidrogênio para fábricas de fertilizantes. Reconhecer essas interconexões continua sendo essencial, mas limites setoriais claros são preservados para garantir precisão analítica e relevância política.

Essas características compartilhadas criam um desafio político singular. Ao contrário de setores onde existem soluções tecnológicas a custos competitivos, as indústrias de difícil descarbonização enfrentam uma lacuna fundamental de comercialização. As tecnologias necessárias para a descarbonização profunda, produção de aço à base de hidrogênio, químicas alternativas de cimento, combustíveis de aviação sustentáveis, permanecem tecnicamente viáveis, mas economicamente não competitivas sem intervenção política. Essa lacuna não pode ser superada apenas por meio do apoio à inovação no lado da oferta, mas requer a criação ativa de mercado por meio de mecanismos de estímulo à demanda.

1.3 Por que políticas de estímulo à demanda (e o que é isto)

Políticas de estímulo à demanda são intervenções públicas que criam, ampliam ou estabilizam a demanda de mercado por tecnologias e produtos de baixo carbono, acelerando assim sua adoção comercial e catalisando investimento privado para inovação e capacidade complementares. Na literatura sobre políticas de inovação, elas se distinguem das medidas de pressão da oferta, que reduzem o custo da invenção e do desenvolvimento inicial por meio de subsídios, créditos fiscais e outras formas de apoio à P&D (Resources for the Future, 2023). As ferramentas de pressão da oferta fomentam ideias; ferramentas de estímulo à demanda cultivam mercados.

A distinção se mostra particularmente relevante para setores de difícil descarbonização, onde a intensidade de capital, a vida útil longa dos ativos e as margens de lucro reduzidas suprimem a adoção de opções emergentes de baixo carbono sem uma demanda futura crível. Políticas de estímulo à demanda convertem a prontidão técnica em viabilidade econômica, garantindo as vendas iniciais ou exigindo a adoção, abordando o vale da morte entre a demonstração e a escala comercial. A Seção 3 examina por que a pressão da tecnologia por si só se mostra insuficiente e detalha as falhas específicas que os mecanismos de estímulo à demanda resolvem.

Abordagens de pressão da tecnologia por si só se mostram insuficientes porque geram prontidão no lado da oferta sem criar sinais de demanda duradouros e viáveis que justifiquem a reestruturação multibilionária de ativos industriais integrados. Na indústria pesada, as decisões de adoção estão inseridas em cadeias de valor complexas, dependem da disponibilidade sincronizada de infraestrutura e são tomadas por empresas avessas ao risco que operam com margens reduzidas em mercados de commodities negociados globalmente. Sem um estímulo crível, os projetos-piloto permanecem isolados, o aprendizado prático é prejudicado e as curvas de custo não se ajustam.

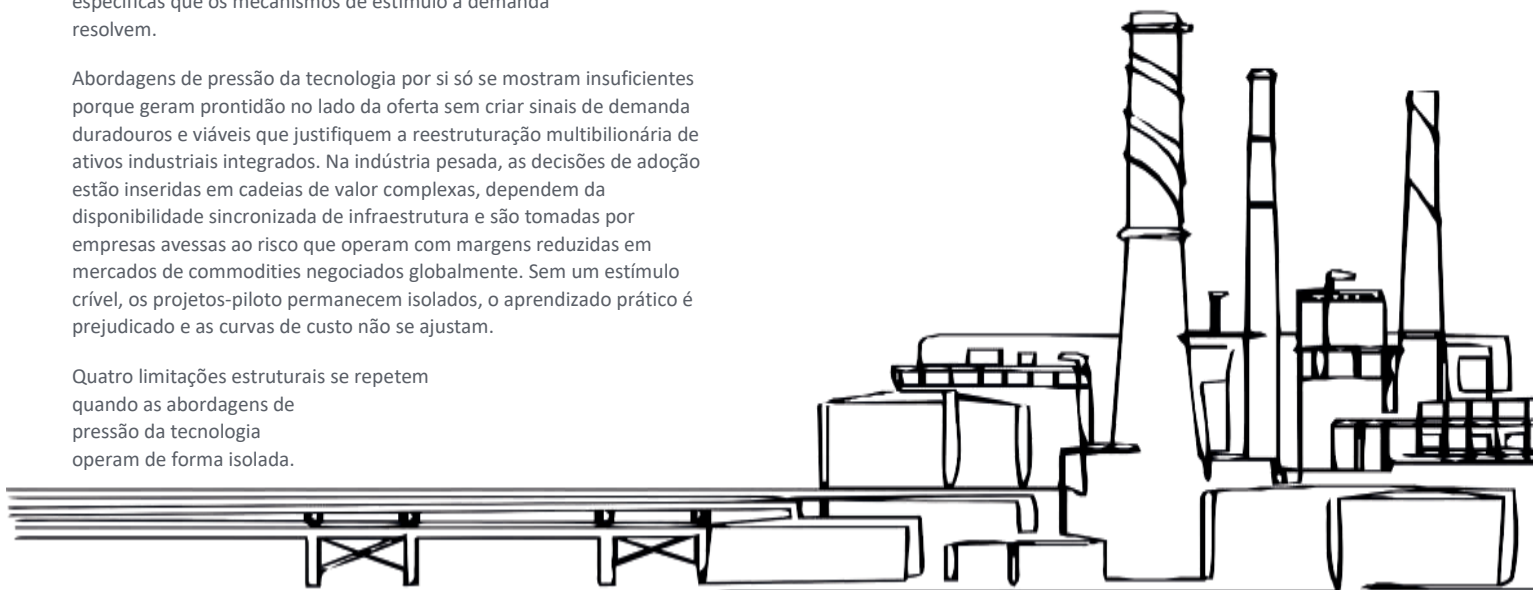
Quatro limitações estruturais se repetem quando as abordagens de pressão da tecnologia operam de forma isolada.

Descompassos temporais surgem quando a capacidade no lado da oferta precede a prontidão no lado da demanda — o aço de hidrogênio verde em escala piloto não consegue garantir financiamento para o projeto sem compradores comprometidos a jusante. Descompassos de escala surgem porque as demonstrações comprovam a viabilidade técnica sem ultrapassar os limites de competitividade de custos, na ausência de uma demanda confiável. Falhas de coordenação persistem quando siderúrgicas, fornecedores de eletrolisadores, fornecedores de energia renovável e operadores de gasodutos precisam investir simultaneamente sem incentivos alinhados. Desvantagens de pioneirismo impedem a adoção quando os primeiros participantes enfrentam custos mais altos, enquanto os concorrentes se beneficiam indevidamente da disseminação de conhecimento ou importam alternativas convencionais mais baratas. A Seção 3 fornece evidências detalhadas para cada limitação e explica como instrumentos específicos de estímulo à demanda abordam essas falhas.

O conjunto de mecanismos de estímulo à demanda relevantes para setores de difícil descarbonização abrange diversos instrumentos complementares. Uma contratação pública com especificações de desempenho aumenta o poder de compra do governo para criar mercados iniciais, ao mesmo tempo que normaliza a contabilização de carbono em toda a cadeia de suprimentos. Contratos de carbono por diferença remuneram os produtores pela diferença entre o custo de redução de emissões e o preço do carbono vigente, garantindo fluxos de receita para tecnologias como hidrogênio verde ou fornos equipados com captura de carbono.

Compromissos de mercado antecipados prometem comprar volumes específicos de commodities de baixo carbono assim que atingirem limites de desempenho predefinidos, permitindo que os projetos garantam financiamento com base em fluxos de caixa futuros. Padrões de desempenho exigem reduções graduais nas emissões de processos ou produtos, incentivando as empresas a adotarem opções mais limpas e, ao mesmo tempo, oferecem aos inovadores um mercado de conformidade previsível.

Mecanismos de precificação de carbono e ajuste de fronteira internalizam as externalidades climáticas e previnem a fuga de carbono, nivelando o campo competitivo para produtos de baixo carbono em mercados de commodities negociados globalmente.



A experiência histórica das transições para energias renováveis demonstra o poder transformador de mecanismos de estímulo à demanda bem projetados. Tarifas de incentivo criaram fluxos de receita estáveis e de longo prazo para a geração de eletricidade renovável, impulsionando investimentos e implantação sem precedentes. Entre 2010 e 2020, o custo nivelado médio ponderado global da eletricidade proveniente de energia solar fotovoltaica caiu 90%, em grande parte como resultado dos efeitos de aprendizagem impulsionados pela implantação, estimulados por políticas de incentivo à demanda em mercados-chave, incluindo Alemanha, China e Califórnia. Essa experiência fornece um modelo, embora não um plano definitivo, para setores industriais que enfrentam complexidades adicionais, incluindo transações entre empresas, especificações técnicas rigorosas e exposição ao comércio global.

Referências do Capítulo 1

BloombergNEF. (2023). Greener Heavy Industry Is Possible, But Only With Smart Policy Support. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/industry-and-buildings/greener-heavy-industry-is-possible-but-only-with-smart-policy-support/>

IEA (2023b), Steel and aluminium, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/steel-and-aluminium>, Licence: CC BY 4.0

IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Cambridge: Cambridge University Press.

IRENA (2024) Decarbonising Hard-to-Abate Sectors with Renewables: Perspectives for the G7. Abu Dhabi: IRENA.

Resources for the Future (2023) Demand-pull tools for innovation in the cement and iron and steel sectors. Washington, DC: RFF.





**Panorama
das emissões e
instantâneos
setoriais**

2

2. Panorama das emissões e instantâneos setoriais

Resumo do Capítulo 2

Oito setores de difícil descarbonização geraram coletivamente 14 GTon. de CO₂ equivalente em 2023, representando 40% das emissões industriais. Apesar de alcançar uma redução de 4,1% na intensidade de emissões entre 2019 e 2023, as emissões absolutas permaneceram estáveis, uma vez que os ganhos de eficiência foram compensados pelo crescimento da produção, particularmente em economias emergentes.

A produção de aço foi de 1,9 bilhão de toneladas, gerando 3,6 Gigaton. de CO₂. Existem 3 caminhos para a descarbonização: Redução direta baseada em hidrogênio, que reduz as emissões em mais de 90%, mas custa de 15 a 30% a mais do que as instalações convencionais; A captura de carbono em alto-forno atinge taxas de captura de 90% a um custo de US\$ 80-110 por tonelada; e a eletrólise de óxido fundido permanece em escala laboratorial. Padronizar as medições é crucial, com metodologias de contabilização concorrentes dificultando o estímulo à demanda baseado em compras.

Cimento, alumínio e produtos químicos emitiram coletivamente 4,4 GTon., cada setor com desafios distintos. As emissões inevitáveis do processo de fabricação de cimento exigem abordagens diversificadas, incluindo aglomerantes alternativos e captura de carbono. A alta intensidade de eletricidade na produção de alumínio significa que o carbono da rede elétrica domina a pegada de carbono do produto, e o setor químico requer hidrogênio limpo a um custo estimado abaixo de US\$ 2/kg, embora esses preços permaneçam inatingíveis sem subsídios.

Os setores de aviação, transporte marítimo e rodoviário enfrentam restrições de densidade energética, tornando as soluções com baterias impraticáveis para aplicações de longa distância no momento da redação deste documento. Combustíveis de aviação sustentáveis representam o principal caminho a curto prazo, apesar de produzirem menos de 0,2% da demanda atual. Cada setor requer abordagens políticas únicas que reflitam as estruturas técnicas e de mercado.

2.1 Emissões e tendências atuais

Os oito setores de difícil descarbonização geraram coletivamente pouco mais de 14 GTon. de emissões diretas equivalentes de dióxido de carbono em 2023, o que representa cerca de 40% da produção global de CO₂ industrial e relacionada à energia (Fórum Econômico Mundial, 2024). Essa contribuição substancial para as emissões globais ocorre apesar desses setores terem alcançado modestas melhorias de eficiência nos últimos anos.

No intervalo mais longo de 2019 a 2023, os setores alcançaram uma redução de 4,1% na intensidade média de emissões, mas essa melhoria na eficiência foi compensada por uma expansão quase equivalente na produção física, deixando as emissões absolutas essencialmente estáveis (IEA, 2025). Essa dinâmica revela o desafio fundamental enfrentado pelos formuladores de políticas: as abordagens tradicionais de eficiência se mostram insuficientes para impulsionar reduções absolutas de emissões quando os volumes de produção continuam crescendo, particularmente em economias emergentes onde a demanda por materiais básicos e serviços de frete se expande rapidamente.

Os padrões regionais complicam ainda mais o desafio da descarbonização. Em 2024, as emissões das economias avançadas

diminuíram 1,1%, mas aumentaram mais de 4% nas economias emergentes e em desenvolvimento fora da China, refletindo um crescimento mais rápido da demanda por materiais básicos e frete nessas regiões (IEA, 2025). O crescimento das emissões industriais da China desacelerou, mas ainda adicionou 50 milhões de toneladas de CO₂, enquanto os setores de indústria pesada e frete da Índia aumentaram as emissões em uma margem semelhante. Essa divergência sugere que o ambiente político e a estrutura industrial em cada região influenciam fortemente as trajetórias de transição.



As implicações para as futuras trajetórias de emissões são preocupantes. Em cenários de políticas climáticas que não contemplam medidas abrangentes de controle da demanda, as emissões industriais residuais em 2050 variam de 30% a 83% dos níveis de referência, enquanto as emissões do setor de transportes, como aviação e navegação, permanecem entre 70% e 91% dos níveis de referência. Em contrapartida, a combinação da implementação de tecnologia com estratégias ambiciosas no lado da demanda, incluindo eficiência de materiais, circularidade, mudanças modais e mudança comportamental, poderia limitar as emissões residuais a uma pequena fração dos valores de referência, ao mesmo tempo que reduz a dependência de tecnologias de remoção de dióxido de carbono (Edelenbosch et al., 2024).

Essas trajetórias de emissões ressaltam a urgência estabelecida na Seção 1.1: sem intervenção política sustentada e as estruturas de mobilização de capital mencionadas nos capítulos subsequentes, os setores de difícil descarbonização correm o risco de se tornarem a restrição vinculativa para o alcance dos objetivos do Acordo de Paris.

2.2 Aço: Emissões e rotas de transição

A produção global de aço bruto atingiu 1,9 bilhão de toneladas em 2023, gerando aproximadamente 3,6 GTon. de emissões de dióxido de carbono, ou entre sete e nove por cento do CO₂ antropogênico total (Global Efficiency Intelligence, 2022). A base técnica desse perfil de emissões reside no papel duplo do carvão coqueificável em alto-forno: fornecer energia térmica e monóxido de carbono que reduz quimicamente o minério de ferro em ferro metálico. Este processo gera CO₂ que é inerentemente termodinâmico e não pode ser eliminado apenas por meio de medidas convencionais de eficiência.

O setor enfrenta três principais caminhos de descarbonização, cada um com características técnicas e econômicas distintas. A redução direta baseada em hidrogênio combinada com a produção de aço por arco elétrico, exemplificada por projetos como HYBRIT e H2 Green Steel no norte da Europa, poderia reduzir as emissões em mais de 90% em relação ao BF-BOF se alimentada por eletricidade renovável, mas os custos de capital atuais são de 15 a 30%.

percentualmente superior às instalações existentes e as despesas operacionais permanecem sensíveis aos preços do hidrogênio e da eletricidade (Buznitsky et al., 2024). Entretanto, essa redução se aplica às emissões do processo somente quando se utiliza hidrogênio 100% verde e eletricidade com zero emissões de carbono. As reduções reais dependem do método de produção de hidrogênio e, portanto, a condição de “alimentação por eletricidade renovável” é crucial. A segunda via envolve a modernização de altos-fornos existentes com captura de carbono pós-combustão, que pode atingir taxas de captura acima de 90%, mas adiciona aproximadamente US\$ 80-110 por tonelada de aço bruto em custos nivelados. A terceira abordagem, a eletrólise de óxido fundido, permanece em escala laboratorial, mas poderia eventualmente eliminar completamente as entradas de carbono por meio da redução eletrolítica direta do minério de ferro. Essas características exemplificam a intensidade de capital mais ampla e os efeitos de dependência identificados na Seção 1.2 como características definidoras de setores difíceis de descarbonizar.

A transparência dos dados representa uma barreira adicional à ação coordenada no setor siderúrgico. O relatório do G7 da AIE sobre medição de emissões destaca a proliferação de metodologias concorrentes de contabilização em nível de planta que dificultam a comparação direta entre países (IEA, 2023). Sem protocolos de relatório comuns, as medidas de estímulo à demanda baseadas em compras têm dificuldade em identificar aço genuinamente de baixa emissão, e os investidores não têm confiança de que as alegações correspondam ao desempenho.

O desafio da padronização se estende por várias estruturas. Os esforços atuais abrangem a ISO 14404 para cálculo da pegada de carbono, o ResponsibleSteel para certificação de produção sustentável e os protocolos emergentes de Declaração Ambiental de Produto conforme norma EN 15804. Entretanto, esses sistemas variam significativamente em seu tratamento dos limites do sistema, métodos de contabilização de eletricidade e

requisitos de verificação de dados. A metodologia de Pegada Ambiental do Produto da UE e a estrutura de coleta de dados do Global Steel Climate Council oferecem caminhos para uma maior consistência, mas a implementação requer coordenação contínua entre órgãos de padronização, associações industriais e entidades de verificação. Políticas voltadas para a demanda podem acelerar esse alinhamento condicionando o apoio à participação em sistemas de medição harmonizados, criando assim incentivos de mercado para a padronização.

A concentração geográfica agrava esses desafios, com a China produzindo quase 60% da produção global de aço sob estruturas políticas que atualmente priorizam a segurança energética e o emprego industrial juntamente com os objetivos de descarbonização. Essa concentração cria pressões competitivas para outros produtores e desafios de coordenação para a política climática internacional, particularmente dada a natureza globalmente comercializada dos produtos de aço.

O desafio de implementação vai além dos custos da tecnologia, abrangendo falhas de coordenação em cadeias de valor interdependentes. O aço à base de hidrogênio requer não apenas novos fornos, mas também suprimentos confiáveis de hidrogênio de baixo carbono, eletricidade renovável e aplicações de aço potencialmente modificadas. Essas mudanças em nível de sistema não podem ser alcançadas apenas por meio do desenvolvimento de tecnologia no lado da oferta, mas exigem mecanismos no lado da demanda que criem incentivos de mercado para a adoção coordenada em toda a cadeia de valor.



2.3 Cimento, alumínio e produtos químicos primários

Esses três setores emitiram coletivamente aproximadamente 4,4 Gton. de CO₂ em 2023, apresentando desafios distintos de descarbonização que exigem abordagens personalizadas no lado da demanda, refletindo suas diferentes fontes de emissões e opções de redução.

O cimento representa o caso paradigmático de emissões de processo inevitáveis. A produção de cimento Portland comum depende da calcinação do calcário que libera CO₂ à medida que o carbonato de cálcio se decompõe em óxido de cálcio a aproximadamente 1450 °C. As emissões do processo representam cerca de sessenta por cento da produção anual de CO₂ do setor, que é de 2,4 Gton., enquanto os combustíveis dos fornos geram a maior parte do restante (IEA, 2024). Como a transformação molecular é intrínseca à química do cimento, a simples troca de combustível não consegue gerar reduções significativas.

As opções de descarbonização para o cimento incluem aglomerantes alternativos, como cimentos à base de silicato de cálcio ou magnésio, substituição extensiva do clínquer por materiais cimentícios suplementares, concretos curados com carbono e captura de carbono pós-combustão. Cada caminho enfrenta obstáculos de implementação: as químicas alternativas levantam questões de desempenho e padronização; a substituição do clínquer é limitada pela oferta restrita de cinzas volantes e escória de alta qualidade; a cura por carbonatação é adequada para aplicações de pré-moldados, mas não para concreto prêmisturado a granel; e a captura de carbono adiciona de 20 a 30% aos custos de capital das fábricas de cimento. (Gross, 2021).

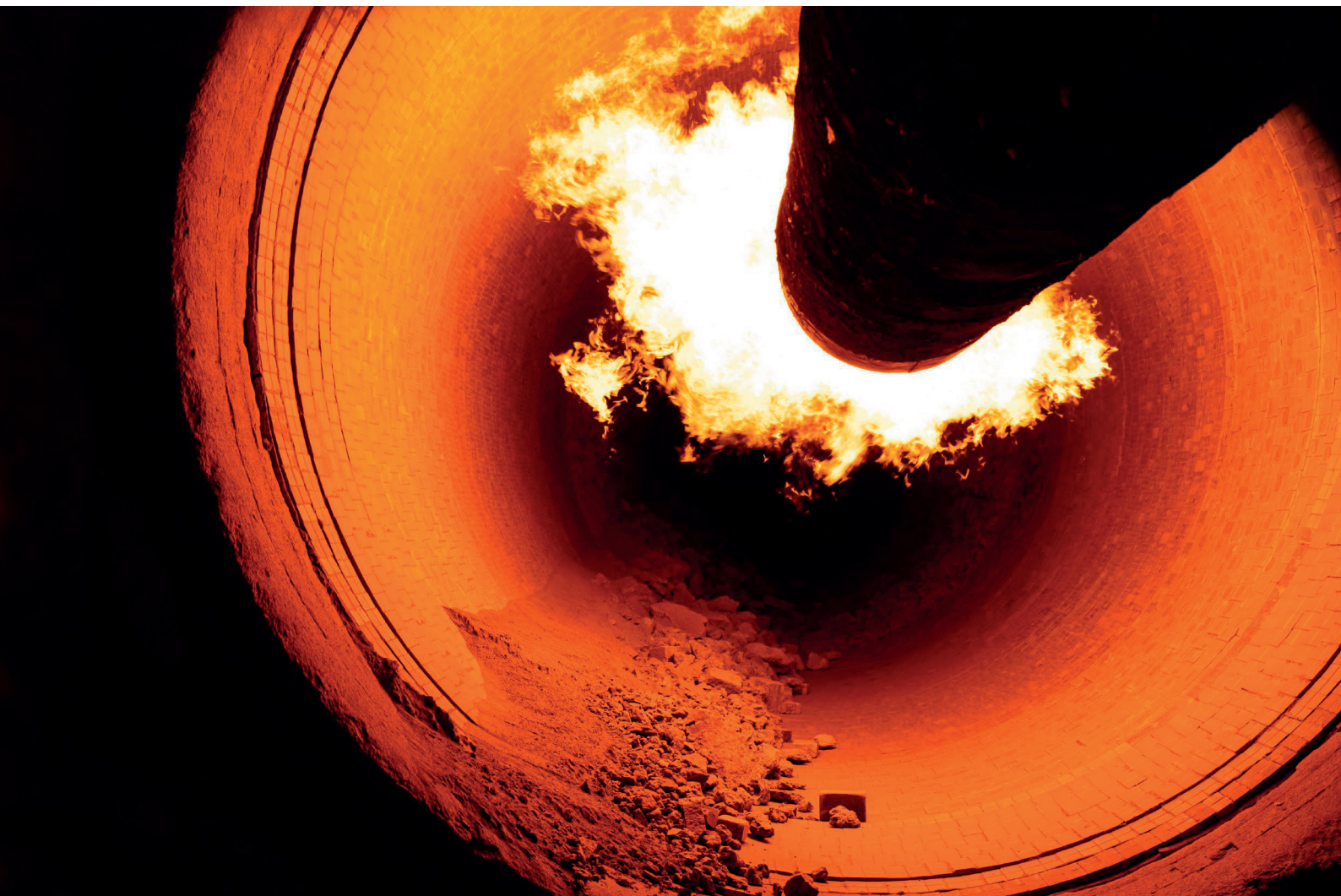
O setor do alumínio ilustra a interseção entre intensidade energética e emissões de processo. A fundição primária pelo processo Hall-Héroult consome de 13 a 15 MWh de eletricidade por tonelada de metal, de modo que a eletricidade representa indiretamente mais de sessenta por cento das emissões do setor (IEA, 2023b).

Onde a intensidade de carbono da rede elétrica excede 600 g CO₂/kWh, as emissões incorporadas do alumínio se aproximam de dez toneladas de CO₂ por tonelada de metal. Os ânodos de carbono consumidos durante a eletrólise contribuem com emissões adicionais do processo e gases perfluorocarbonados potentes.

Dois fatores de descarbonização influenciam a produção de alumínio. O fornecimento de eletricidade com baixo teor de carbono representa a oportunidade mais imediata, como demonstrado pela Islândia, Canadá e Noruega, que alcançam pegadas de carbono inferiores a 4 t CO₂/t de alumínio utilizando energia hidrelétrica. Ânodos inertes poderiam praticamente eliminar as emissões do processo, mas a implantação comercial atualmente permanece limitada a plantas-piloto (IEA, 2023b). A produção secundária por meio da reciclagem oferece uma redução de 95% nas emissões, mas enfrenta restrições devido à disponibilidade de sucata e aos requisitos de qualidade para muitas aplicações.

O setor de produtos químicos primários, dominado por amônia, metanol, etileno, propileno e aromáticos, emitiu aproximadamente 1 gigatonelada de CO₂ em 2023, ou cerca de três por cento do total global (IEA, 2025). As emissões resultam da reforma ou craqueamento de matérias-primas fósseis para produzir hidrogênio e gás de síntese, juntamente com a combustão para geração de calor de processo em alta temperatura. As estratégias de mitigação incluem craqueadores a vapor eletrificados, síntese de amônia e metanol a partir de hidrogênio verde, rotas de eletroconversão de biomassa ou CO₂ e captura generalizada de carbono em processos convencionais. Entretanto, a diversidade de processos, a integração com complexos de refinarias e as fontes heterogêneas de matéria-prima complicam o planejamento da transição (Buznitsky et al., 2024).

A disponibilidade de hidrogênio limpo a preços competitivos, acredita-se que esteja abaixo de US\$ 2/kg em geral,



é fundamental para a descarbonização da indústria química, assim como a abundância de eletricidade renovável para a eletrificação de unidades de craqueamento. Entretanto, o hidrogênio limpo próximo a esses preços ainda não foi alcançado na prática. A integração do setor com complexos petroquímicos cria oportunidades de coordenação por meio de agrupamentos industriais e desafios decorrentes das interdependências da cadeia de valor. Deve-se notar que o valor de US\$ 2/kg representa uma meta política (meta provisória do programa Hydrogen Shot do Departamento de Energia dos EUA para 2026) e não um consenso de mercado sobre a viabilidade comercial. Até o momento da redação deste documento, o valor de US\$ 2/kg só é concebível com subsídios significativos (por exemplo, crédito tributário US 45V de até US \$ 3/kg).

Esses três setores demonstram como os mecanismos no lado da demanda devem ser adaptados às emissões específicas, perfis e caminhos de redução de emissões. Para o cimento, padrões de desempenho e compras públicas de concreto de baixo carbono podem ampliar o uso de ligantes alternativos e justificar o investimento em infraestrutura de captura de carbono. Para o alumínio, a implantação de eletricidade renovável por meio de contratos de compra de energia de longo prazo e rotulagem diferenciada de produtos pode impulsionar as escolhas de localização e tecnologia. Para produtos químicos, o desenvolvimento de infraestrutura de hidrogênio, mercados de matérias-primas de carbono circular e a divulgação obrigatória de emissões ao longo das cadeias de valor são cruciais para a transformação.

2.4 Transporte: Aviação, transporte marítimo, transporte rodoviário pesado

Os setores de transporte dentro das categorias de difícil redução de emissões enfrentam restrições únicas de descarbonização relacionadas a requisitos de densidade energética, regulamentações de segurança e estruturas de governança internacional que moldam as opções de políticas no lado da demanda.

A aviação produziu quase 0,8 Gton. de CO₂ em 2022, equivalente a cerca de dois por cento das emissões globais,

porém seu impacto no forçamento radiativo sobe para perto de quatro por cento quando os efeitos não relacionados ao CO₂ são incluídos (IEA, 2025). A densidade energética cria a principal restrição: o combustível de aviação armazena 43 MJ/kg, enquanto as baterias de íon-lítio de última geração fornecem menos de 0,25 MJ/kg. Combinado com a vida útil de 25 anos das frotas e regulamentações de segurança rigorosas, essa disparidade significa que é improvável que aeronaves elétricas a bateria ou a hidrogênio dominem as viagens de longa distância antes de meados do século.

Os combustíveis de aviação sustentáveis oferecem o principal caminho de descarbonização a curto prazo, mas a produção atual representa menos de 0,2% da demanda de combustível de aviação, e os custos adicionais excedem US\$ 300/t de CO₂ reduzido (Comissão Europeia, 2024). O Conselho Internacional de Transporte Limpo alerta que as emissões ao longo da vida útil das frotas atuais e projetadas podem esgotar a parcela da aviação em um orçamento global de emissões líquidas zero até meados da década de 2030 sem uma substituição acelerada do combustível (ICCT, 2024).

O transporte marítimo foi responsável por cerca de três por cento das emissões globais em 2023, ou 0,86 Gton. de CO₂, com tendências acompanhando os volumes do comércio global (IEA, 2025). A diversidade de embarcações do setor, as dimensões, a duração das viagens e a infraestrutura portuária criam desafios de coordenação para as transições de combustível. A amônia e o metanol derivados do hidrogênio verde são vistos como opções promissoras de baixo carbono, com densidades de energia volumétrica aceitáveis para o transporte em alto-mar, mas exigem novos motores, sistemas de abastecimento e protocolos de segurança.

A estratégia revisada da Organização Marítima Internacional para gases do efeito estufa visa emissões líquidas zero até 2050, o que implica a produção em larga escala de combustíveis à base de hidrogênio equivalente a 5-10% da produção global atual de amônia até 2030. Essa exigência de escala requer investimento coordenado em centros de produção e rotas piloto de corredores verdes que demonstrem cadeias de suprimento de combustível integradas.



O transporte rodoviário de cargas pesadas registrou o crescimento de emissões mais rápido de qualquer modalidade de transporte de carga, com um aumento de 83% entre 1990 e 2021 nos Estados Unidos (DOT, 2024). Os caminhões de longa distância exigem autonomia, velocidade de reabastecimento e peso de carga que desafiam a tecnologia atual de baterias. Os caminhões elétricos à bateria estão progredindo rapidamente para entregas urbanas e regionais, mas as rotas de longa distância exigem soluções diferentes, como sistemas de catenária aérea, químicas de bateria avançadas ou células de combustível de hidrogênio.

Todas as opções de eletrificação exigem infraestrutura extensa, incluindo carregadores de escala de megawatt, rodovias eletrificadas ou redes de reabastecimento de hidrogênio, cuja implantação deve ser alinhada em várias jurisdições e operadores privados. O desafio de coordenação se assemelha ao da implantação inicial de veículos elétricos, mas em uma escala e com requisitos de energia muito maiores.

Esses setores de transporte ilustram vários requisitos comuns no lado da demanda. A coordenação internacional torna-se essencial, dadas as estruturas de governança global e as operações transfronteiriças. As falhas na coordenação da infraestrutura exigem intervenção governamental para alinhar a produção de combustível, as redes de distribuição e a adoção de veículos/embarcações. Compromissos antecipados de mercado e contratos de fornecimento de longo prazo fornecem sinais cruciais de investimento para a produção de combustíveis alternativos, dados os altos requisitos de capital e os longos prazos de implementação. Ao contrário dos setores industriais estacionários, o transporte enfrenta fragmentação regulatória em jurisdições nacionais e internacionais, o que complica o desenvolvimento de políticas no lado da demanda.

Referências do Capítulo 2

Buznitsky, K., Verma, S. & Nitzsche, M. P. (2024) Decarbonizing industry: Policy approaches to eliminate hard-to-abate emissions. MIT Science Policy Review, 5, 58-70.

DOT (2024) Decarbonizing U.S. transportation: Report to Congress. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

Edelenbosch, O.Y., Hof, A.F., van den Berg, M., de Boer, H.S., Chen, H.H., Daioglou, V., Dekker, M.M., Doelman, J.C., den Elzen, M.G., Harmsen, M. and Mikropoulos, S. (2024) Reducing sectoral hard-to-abate emissions to limit reliance on carbon dioxide removal. Nature Climate Change, 14(7), pp.715-722.

European Commission (2024) Reducing emissions from aviation. Brussels: Directorate-General for Climate Action.

Global Efficiency Intelligence (2022) Steel climate impact: International benchmarking of energy and CO2 intensities. GEI Research Report.

Gross, S. (2021) The challenge of decarbonizing heavy industry. Washington, DC: Brookings Institution.

ICCT (2024) Lifetime emissions from aircraft under a net-zero carbon budget. Washington: International Council on Clean Transportation.

IEA (2023) Emissions Measurement and Data Collection for a Net Zero Steel Industry. Paris: International Energy Agency.

IEA (2023b) Steel and aluminium. Paris: International Energy Agency.

IEA (2024a) Cement - analysis and forecast to 2050. Paris: International Energy Agency.

IEA (2025) Global Energy Review 2025. Paris: International Energy Agency.

World Economic Forum (2024) Net-Zero Industry Tracker 2024. Geneva: World Economic Forum and Accenture.



Por que a pressão
da oferta por si só
não é suficiente

3



3. Por que a pressão da oferta por si só não é suficiente

Resumo do capítulo 3

A política de pressão da tecnologia gera prontidão no lado da oferta, mas não consegue criar sinais de demanda duradouros que justifiquem transformações multibilionárias. As evidências mostram que 97% do investimento na transição energética flui para tecnologias maduras, deixando 3% para a descarbonização industrial, apesar de esses setores representarem 13% das emissões globais de CO₂.

As quatro limitações estruturais são analisadas:

1) Surgem desalinhamentos de tempo quando tecnologias em escala piloto não conseguem garantir financiamento sem compradores comprometidos a jusante. 2) Surgem desalinhamentos de escala porque as demonstrações comprovam a viabilidade técnica sem ultrapassar os limites de competitividade de custos na ausência de uma demanda confiável. 3) Persistem falhas de coordenação onde siderúrgicas, fornecedores de eletrolisadores, fornecedores de energia renovável e operadores de gasodutos precisam investir simultaneamente sem mecanismos que alinhem os incentivos. 4) As desvantagens de pioneirismo dificultam a adoção quando os participantes pioneiros enfrentam custos mais elevados, enquanto os concorrentes importam alternativas convencionais mais baratas.

Além disso, a descarbonização industrial deve abordar três tipos de falhas: A) falhas de mercado convencionais, incluindo externalidades negativas e assimetrias de informação; B) falhas do sistema de inovação que impedem a criação e difusão de conhecimento; e C) falhas transformacionais que prendem os sistemas sociotécnicos em trajetórias de alto carbono por meio de dependências de trajetória tecnológicas, institucionais e econômicas.

Diferentes instrumentos de política abordam falhas específicas. As compras públicas combatem as falhas de coordenação agregando a demanda. Os contratos de carbono por diferença reduzem as falhas do mercado de capitais por meio de receitas previsíveis. Os padrões de desempenho mitigam as assimetrias de informação por meio de medições codificadas. Os compromissos de mercado avançados visam a incerteza do investimento, garantindo volumes de compra quando as tecnologias atendem os critérios de desempenho.

3.1 Os limites da pressão da tecnologia

As medidas de pressão da tecnologia geram prontidão no lado da oferta, mas não criam sinais de demanda duradouros e viáveis que justifiquem a reestruturação multibilionária de ativos industriais integrados. Na indústria pesada, as decisões de adoção estão inseridas em cadeias de valor complexas, dependem da disponibilidade sincronizada de infraestrutura e são tomadas por empresas avessas ao risco que operam com margens reduzidas em mercados de commodities negociados globalmente. No sistema mais amplo, nem a demanda privada nem o estímulo da oferta, por si só, levarão as tecnologias de capital intensivo e acopladas ao sistema à maturidade no ritmo necessário (Hart, 2024). Sem uma demanda crível, os projetos-piloto permanecem isolados, o aprendizado prático é prejudicado e as curvas de custo não se ajustam.

As evidências dos padrões globais de investimento na transição energética reforçam esse desafio de comercialização. Em 2022, aproximadamente 97% do investimento global monitorado na transição energética foi direcionado para segmentos mais consolidados, como energias renováveis, veículos elétricos, aquecimento limpo e armazenamento, deixando menos de 3% para tecnologias industriais de baixo carbono em setores de difícil descarbonização, apesar do aço, cimento e os produtos petroquímicos representarem 13% das emissões globais de CO₂ (BloombergNEF, 2023).

Essa distorção ressalta o “vale da morte” estrutural na indústria, onde a pressão da tecnologia cria opções sem garantir a adoção em larga escala pelo mercado.

Quatro limitações estruturais se repetem quando as abordagens de pressão da tecnologia operam isoladamente em setores de difícil descarbonização.

Primeiro, surgem descompassos de tempo quando a capacidade no lado da oferta precede a prontidão dos mercados, instituições e infraestrutura no lado da demanda. Por exemplo, a redução direta de ferro com hidrogênio verde em escala piloto pode produzir ferro esponja de baixa emissão, mas os compradores a jusante podem não ter especificações, protocolos de certificação ou disposição para pagar por produtos de aço de baixo carbono, atrasando os contratos de fornecimento e restringindo o financiamento do projeto.

Em segundo lugar, surgem desajustes de escala porque as demonstrações fornecem provas técnicas sem ultrapassar o limite da competitividade de custos na ausência de uma demanda confiável; os custos unitários permanecem elevados até que a alta utilização impulse o aprendizado e distribua os custos fixos. Entretanto, tal utilização requer fornecimento a longo prazo, o que a pressão da tecnologia não proporciona.

Em terceiro lugar, persistem falhas de coordenação onde múltiplos atores interdependentes devem investir simultaneamente. O aço verde ilustra esse desafio: as siderúrgicas exigem um fornecimento confiável de hidrogênio antes de se comprometerem com fornos de redução direta, mas os fornecedores de eletrolisadores não podem justificar o investimento em capacidade sem clientes âncora.

Fornecedores de energia renovável, empresas de gasodutos, operadores de armazenamento e compradores de aço enfrentam dependências circulares semelhantes. Sem mecanismos para alinhar esses investimentos interdependentes, os problemas clássicos de garantia permanecem sem solução, e as empresas individuais não podem justificar a iniciativa.

Quarto, as desvantagens de ser o primeiro a agir podem impedir a adoção, onde os primeiros entrantes enfrentam custos mais altos, padrões incertos e riscos de reputação, enquanto os rivais podem se beneficiar indevidamente da disseminação de conhecimento ou importar alternativas de alto carbono mais baratas.

Essas limitações se mostram particularmente agudas em contextos industriais onde a aquisição é regida por especificações técnicas, padrões e garantias de desempenho que devem ser estabelecidos e harmonizados em todas as cadeias de suprimentos antes que os pedidos de compra possam ser feitos. Os ativos de produção operam por décadas, portanto, as decisões de modernização ou substituição dependem de expectativas de preço e política de longo prazo, em vez da prontidão tecnológica de curto prazo. Os clientes a jusante devem validar se os insumos de baixo carbono atendem aos critérios de forma, ajuste e função dentro de suas próprias estruturas de certificação e garantia, criando ciclos de adoção de vários anos que os programas de pressão da tecnologia em escala experimental não coordenam.

Os agrupamentos industriais destacam ainda mais o contraste entre o que a pressão da tecnologia pode proporcionar e o que permanece não satisfeito sem complementos no lado da demanda. O Agrupamento da Costa Leste do Reino Unido, o Porto de Rotterdam na Holanda e as iniciativas de Antuérpia-Bruges na Bélgica mostram que os fundos de incentivo à oferta e os planos de infraestrutura devem ser combinados com contratos de fornecimento, padrões e compras para converter gasodutos e centros de armazenamento em resultados de descarbonização. Onde os agrupamentos se basearam principalmente em subsídios para projetos-piloto e planejamento de infraestrutura, os projetos tiveram dificuldades para chegar à decisão final de investimento porque os riscos de demanda permaneceram sem solução. Por outro lado, onde instrumentos de demanda como

contratos de carbono por diferença ou compras públicas verdes foram introduzidos, os agentes privados puderam montar conjuntos financiáveis para captura, hidrogênio ou materiais alternativos, permitindo o progresso rumo à operação comercial

Certas políticas de pressão da tecnologia também podem, inadvertidamente, reforçar a dependência de fornecedores estabelecidos, privilegiando melhorias incrementais de eficiência em processos consolidados em vez de permitir mudanças disruptivas para paradigmas de produção alternativos. No setor siderúrgico, o financiamento para otimização do desempenho energético de alto-fornos pode prolongar a vida útil dos ativos e adiar as transições para rotas de redução direta ou eletrolítica baseadas em hidrogênio, principalmente se não houver condições complementares no lado da demanda que recompensem a mudança radical no desempenho

3.2 Falhas que o estímulo à demanda pode corrigir

A descarbonização industrial deve considerar um amplo conjunto de questões que bloqueiam mudanças transformadoras. Três classes são particularmente relevantes em setores de difícil descarbonização: falhas de mercado convencionais enraizadas em sinais e informações de preços, falhas do sistema de inovação que impedem a criação e difusão de conhecimento e falhas transformacionais que prendem os sistemas sociotécnicos em trajetórias de alto carbono e frustram mudanças coordenadas (Weber e Rohracher, 2012).

As falhas de mercado tradicionais permeiam a indústria pesada. As externalidades negativas das emissões de gases do efeito estufa permanecem precificadas de forma imperfeita, com muitas jurisdições carecendo de precificação abrangente de carbono ou enfrentando trajetórias de preços voláteis e contestadas. Isso reduz o incentivo privado para a descarbonização e enfraquece a justificativa comercial para o investimento em processos de baixo carbono. A disseminação positiva de conhecimentos levam as empresas a desinvestir em inovação porque elas não conseguem apropriar-se totalmente dos benefícios do aprendizado prático, da otimização de processos e da modernização da cadeia de suprimentos que os concorrentes podem emular.

Externalidades de rede surgem quando o valor de uma inovação depende de investimentos complementares de terceiros, como é o caso da oferta e demanda de hidrogênio, redes de transporte e armazenamento de CO₂ e especificações padronizadas de materiais de baixo carbono, criando uma dinâmica do tipo “ovo e galinha”.

Falhas no mercado de capitais vêm à tona quando novas tecnologias enfrentam altos riscos percebidos, longos períodos de retorno e valores residuais incertos, dificultando a obtenção de financiamento acessível, mesmo quando os retornos sociais esperados são altos. As assimetrias de informação atrasam ou interrompem as transações quando os compradores não conseguem verificar facilmente os perfis de emissões, a durabilidade ou o desempenho de novos materiais e processos, desencorajando pagamentos premium e retardando a formação de mercado.

Falhas no sistema de inovação restringem ainda mais o progresso. Infraestruturas de conhecimento inadequadas, incluindo instalações de teste, plataformas piloto e de ampliação de escala, laboratórios de certificação e repositórios de dados abertos, retardam o aprimoramento e a difusão de processos de baixo carbono. Redes fracas entre atores de pesquisa e empresas industriais, e entre empresas em toda a cadeia de valor, limitam a interação usuário-produtor que é essencial para alinhar os atributos tecnológicos às necessidades operacionais. Os sistemas de normas e metrologia estão atrasados em relação aos avanços tecnológicos, deixando lacunas na medição, na comunicação e na verificação, o que impede a diferenciação e a aquisição confiáveis de produtos com base no carbono incorporado.

As falhas de transformação incluem barreiras sistêmicas resultantes da estrutura e da política dos regimes sociotécnicos. O aprisionamento tecnológico é pronunciado onde os sistemas de produção integrados e de uso intensivo de capital têm longos ciclos de vida e forte acoplamento entre as unidades de processo.



Na rota do alto-forno de aço-forno de oxigênio básico, por exemplo, várias unidades e sistemas auxiliares são otimizados em torno de redutores à base de carvão e fluxos de alta temperatura, tornando a substituição parcial complexa e arriscada. O aprisionamento institucional se manifesta em estruturas regulatórias, normas de produtos e regimes de licenciamento projetados para tecnologias convencionais que penalizam implicitamente as alternativas, excluindo-as dos códigos ou impondo vias de conformidade onerosas.

O aprisionamento econômico decorre de modelos de negócios construídos sobre emissões de baixo custo, preços comoditizados e estratégias de liderança de custos que deixam pouco espaço para prêmios verdes sem uma demanda explícita.

A interação dessas categorias de falhas em setores de difícil descarbonização aponta para a necessidade de combinações de políticas com múltiplos instrumentos. A precificação do carbono aborda a externalidade, mas não cria redes, normas ou capacidades, nem supera o aprisionamento quando as opções de descarbonização necessárias são pré-comerciais, infraestruturais ou sujeitas a problemas de coordenação. A descarbonização profunda exige complementar os preços com apoio à inovação, investimento em infraestrutura e padrões regulatórios adaptados a contextos setoriais específicos (Tvinnereim e Mehling, 2018).

Diferentes categorias de falhas se alinham a diferentes tipos de instrumentos, e as políticas no lado da demanda são ideais para abordar várias das falhas mais críticas na indústria. Para combater as externalidades de rede e as falhas de coordenação, as compras públicas e os mecanismos de escoamento de energia podem agregar a demanda entre agências públicas e compradores privados, criando compromissos de volume financiáveis que alinham o investimento de múltiplos atores. Contratos de carbono por diferença reduzem as falhas do mercado de capitais, fornecendo fluxos de receita previsíveis vinculados à redução verificada, diminuindo assim o custo de capital para os pioneiros e superando a desvantagem de serem os primeiros a agir.

Padrões de desempenho e limites de intensidade de carbono do produto mitigam as assimetrias de informação, codificando a medição e a verificação, permitindo que os compradores discriminem com base nas emissões incorporadas e recompensando os fornecedores que investem em processos mais limpos. Compromissos de mercado antecipados visam a incerteza do investimento, garantindo volume de compra em termos pré-acordados quando as tecnologias atendem os critérios de desempenho, atraindo financiamento privado e a expansão da cadeia de suprimentos.

Referências do Capítulo 3

BloombergNEF. (2023). Greener Heavy Industry Is Possible, But Only With Smart Policy Support. Available at: <https://about.bnef.com/insights/industry-and-buildings/greener-heavy-industry-is-possible-but-only-with-smartpolicy-support/>

Hart, D.M. (2024) To Boost Energy Innovation, Pull Technologies Into the Market. *Issues in Science & Technology*, 41(1).

Mazzucato, M., 2018. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. *Industrial and corporate change*, 27(5), pp.803-815.

Tvinnereim, E. and Mehling, M. (2018) Carbon pricing and deep decarbonisation. *Energy policy*, 121, pp.185-189.

Weber, K.M. and Rohracher, H. (2012) Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive 'failures' framework. *Research policy*, 41(6), pp.1037-1047.





The image features a dark blue background with a glowing orange line chart at the top. The chart is labeled 'ENERGY' and 'TTON/2000' on the left, and 'ADAO 122,1200' and '3.500' on the right. Below the chart, the text 'Kit de ferramentas de estímulo à demanda e manual de criação de mercado' is displayed in white. To the right of this text is a large white number '4'. At the bottom, a wireframe model of an industrial facility, including a drilling rig and various processing units, is shown in a glowing blue color, appearing to be projected from a tablet device.

Kit de ferramentas de estímulo à demanda e manual de criação de mercado

4

4. Kit de ferramentas de estímulo à demanda e manual de criação de mercado

Resumo do Capítulo 4

O kit de ferramentas de estímulo à demanda abrange cinco instrumentos principais que abordam falhas de mercado específicas.

As compras públicas verdes alavancam o poder de compra do governo para criar mercados iniciais por meio de limites de carbono incorporado.

Os contratos de carbono por diferença proporcionam certeza de receita em prazos de 10 a 20 anos, com o programa da Alemanha oferecendo garantias de 15 anos que cobrem as lacunas de custo verificadas com estruturas bidirecionais que recuperam o apoio quando os preços do carbono excedem os preços de exercício. Os compromissos de mercado avançados superam as falhas de coordenação por meio de compras futuras prometidas, exemplificado pela estrutura de leilão duplo da H2Global, onde um intermediário público conclui compras de hidrogênio de longo prazo e revende por meio de leilões competitivos mais curtos. Os padrões de desempenho estabelecem limites mínimos, criando demanda por conformidade. A precificação do carbono e os ajustes de fronteira internalizam as externalidades, evitando vazamentos.

Uma política eficaz deve diferenciar os objetivos em três estágios de mercado. A criação de mercado estabelece novos mercados que exigem mecanismos de mitigação de riscos e coordenação.

O desenvolvimento de mercado se aplica quando os mercados nascentes já existem, enfatizando a padronização e a aquisição, aprofundando a demanda e intensificando a concorrência.

O crescimento do mercado caracteriza as fases de difusão, priorizando sinais e mandatos para toda a economia, institucionalizando os mercados.

Nossa perspectiva sistêmica reconhece que tecnologias, instituições, redes, mercados e infraestruturas evoluem em conjunto por meio de feedbacks complexos. Os sistemas de produção conectam matérias-primas a processos e usuários por meio de interdependências com operações de rede, transporte de hidrogênio, gasodutos de CO₂ e sistemas de medição, onde falhas de interface podem paralisar tecnologias viáveis. Assim, recomendamos pacotes de políticas adaptativas com intervenção coordenada entre instrumentos e estratégias de agrupamentos locais.

4.1 Instrumentos essenciais e quando usar

O conjunto de mecanismos de estímulo à demanda relevantes para setores de difícil descarbonização vai além dos subsídios tradicionais, abrangendo instrumentos de criação de mercado que abordam falhas específicas, preservando a dinâmica competitiva. Cada instrumento visa barreiras de mercado distintas e opera com maior eficácia quando combinado com a tecnologia e as condições de mercado apropriadas.

O conjunto de mecanismos de estímulo à demanda descrito na Seção 3.2 aborda falhas de mercado distintas identificadas nessa análise.

A Tabela 4.1 relaciona instrumentos específicos a categorias primárias de falhas, orientando os profissionais para a seleção de ferramentas apropriadas com base nas características setoriais e nas condições de mercado.

A compra pública verde com limites de carbono incorporado representa o instrumento de criação de demanda mais direto, alavancando o substancial poder de compra do governo para criar mercados iniciais protegidos para materiais de baixo carbono. Ao especificar intensidades máximas de carbono incorporado em materiais de construção usados em projetos públicos, os programas de compras podem garantir a demanda inicial, ao mesmo tempo que normalizam as declarações ambientais de produtos em toda a cadeia de suprimentos.

A iniciativa federal dos EUA Buy Clean demonstrou essa abordagem ao estabelecer limites baseados em desempenho para concreto, aço, asfalto e vidro, juntamente com financiamento para o desenvolvimento da infraestrutura de medição (Industrial Innovation Initiative, 2024). A eficácia depende da implementação em fases que permite aos fornecedores aumentar a capacidade de licitações competitivas que impulsionam a convergência de custos e da coordenação entre países para atingir escala suficiente, evitando a fragmentação.

Os contratos de carbono por diferença (CCfD) proporcionam segurança de receita para investimentos industriais de capital intensivo, garantindo um preço fixo para as emissões evitadas durante os prazos contratuais, que normalmente variam de 10 a 20 anos. O programa pioneiro de CCfD da Alemanha oferece garantias de receita de 15 anos para projetos nos setores de processamento de metais, papel e vidro, pagando a diferença de custo verificada entre a produção baseada em combustíveis fósseis e a produção de baixo carbono, líquida dos preços do Sistema de Comércio de Emissões da UE, Preços ETS (BloombergNEF, 2024). As estruturas de pagamento bidirecionais aprimoram a disciplina fiscal, recuperando o apoio quando os preços do carbono excedem os preços de exercício, enquanto a alocação competitiva por meio de leilões reversos revela os custos de redução de emissões e controla os gastos públicos. Os CCfDs se mostram particularmente adequados para setores com opções de redução de emissões discretas e irregulares, como a redução direta de hidrogênio no aço ou a captura de carbono em fornos de cimento. Ao abordar as desvantagens dos pioneiros e as falhas do mercado de capitais discutidas na Seção 3, as garantias de receita permitem o investimento privado, apesar das trajetórias incertas dos preços do carbono e da vida útil longa dos ativos.

Os compromissos de mercado antecipados visam solucionar falhas de coordenação, garantindo compras futuras em termos pré-acordados, quando as tecnologias atenderem a critérios de desempenho específicos. O mecanismo H2Global exemplifica essa abordagem por meio de uma estrutura de leilão duplo, na qual um intermediário com capital público celebra contratos de compra de longo prazo com produtores de hidrogênio limpo e revende os produtos por meio de leilões competitivos de curto prazo, com fundos públicos cobrindo a diferença de preço (Bollerhey et al., 2023). Os AMCs (Acordos de Gestão de Ativos) provam ser mais eficazes para mercados nascentes, onde as assimetrias temporais e de contraparte impedem as decisões de investimento, fornecendo compromissos de compra viáveis que atraem capital privado, preservando, ao mesmo tempo, os testes de mercado por meio de mecanismos competitivos de revenda.

Padrões de desempenho e requisitos de divulgação criam demanda ao estabelecer limites mínimos de desempenho de carbono e tornam as emissões incorporadas visíveis e comparáveis entre os produtos. Códigos de construção que especificam intensidades máximas de carbono incorporado para materiais de construção, juntamente com Declarações Ambientais de Produto (DAPs) obrigatórias, permitem que os compradores se diferenciem com base no desempenho de carbono, ao mesmo tempo que recompensam os fornecedores que investem em processos mais limpos. O futuro Mecanismo de Ajuste de Carbono nos limites da União Europeia funciona como um padrão de desempenho ao precificar as emissões incorporadas nas importações, criando, assim, incentivos para que produtores nacionais e estrangeiros reduzam a intensidade de carbono para manter o acesso ao mercado, (European Commission, 2024).

A escolha entre os instrumentos deve refletir falhas de mercado específicas e características da tecnologia. As assimetrias de informação e a escassez de compradores favorecem programas de aquisição que geram dados de desempenho e instalações de referência. As falhas do mercado de capitais e as desvantagens dos pioneiros exigem CCfDs ou AMCs que forneçam certeza de receita e compartilhamento de risco.

Tabela 4.1: Instrumentos de estímulo à demanda e alinhamento das falhas do mercado

Instrumento	Mercado primário Falha abordada	Melhor aplicação	Principais Características de Projeto
Compras Públicas Verdes	Assimetrias de informação, pequenos compradores	Materiais de construção com limites de carbono incorporados	Especificações baseadas em desempenho, implementação em fases, licitação competitiva
Contratos de Carbono por Diferença	Falhas no mercado de capitais, desvantagem do pioneiro	Processos industriais de capital intensivo	Prazos de 10 a 20 anos, pagamentos bilaterais, alocação competitiva
Compromissos avançados de mercado	Falhas de coordenação, risco de contraparte	Mercados nascentes com desajustes temporais	Compromissos de volume, critérios de desempenho, desembolso em fases
Normas de desempenho	Externalidades, falta de métricas comuns	Transformação em todo o mercado, categorias de produtos	Limites decrescentes, protocolos de verificação, disposições de extinção
Precificação de Carbono/CBAM	Externalidades ambientais, vazamento de carbono	Setores expostos ao comércio, cobertura em toda a economia	Ajuste de fronteira, eliminação gradual da alocação livre, reciclagem de receitas

Falhas de coordenação em cadeias de valor se beneficiam de AMCs ou abordagens baseadas em agrupamentos que alinham o investimento de múltiplos atores. Externalidades de rede e requisitos de padronização apontam para padrões de desempenho e regimes de divulgação que criam definições comuns e protocolos de medição.

O momento e a sequência são cruciais para a eficácia do instrumento. As intervenções em estágio inicial devem se concentrar em projetos-piloto de aquisição e desenvolvimento de padrões para construir infraestrutura de medição e preparar os compradores. A implantação em estágio intermediário se beneficia da alocação competitiva de CCfDs e da implementação de padrões de desempenho, juntamente com Desenvolvimento de infraestrutura em agrupamentos industriais. A difusão em estágio final pode depender cada vez mais da precificação de carbono e do endurecimento dos padrões à medida que os mercados amadurecem e as diferenças de custo diminuem, com o apoio do estímulo à demanda reduzindo-se à medida que mercados competitivos emergem.

4.2 Criação, desenvolvimento e crescimento do mercado

Uma política eficaz de estímulo à demanda deve distinguir os objetivos e a lógica de projeto ao longo do ciclo de vida dos mercados. Essa distinção se mostra essencial para adequar os instrumentos às condições de mercado e evitar o bloqueio prematuro ou a duração excessiva do apoio. Uma tipologia de três estágios distintos – criação de mercado, desenvolvimento de mercado e crescimento de mercado – fornece uma estrutura para a criação de políticas que se baseia na estrutura de avaliação do World Bank Group e nas orientações da Corporação Financeira Internacional (World Bank, 2019; IFC, 2021).

A criação de mercado refere-se ao estabelecimento de novos mercados onde nenhum existia funcionalmente para o produto, serviço ou modelo de negócio em foco. Neste estágio, os atores enfrentam falta de regras ou regras não confiáveis, demanda latente ou não articulada, capacidades subdesenvolvidas e ausência de infraestrutura facilitadora. A criação de mercado se mostra relevante para novos produtos industriais de baixo carbono, como aço à base de hidrogênio, combustíveis de aviação sustentáveis em segmentos de longa distância e cimentos que utilizam ou armazenam carbono. Esses fatores exigem componentes de inovação significativos, educação e conscientização para compradores industriais, identificação ou criação de demanda latente por meio de especificações de carbono do produto, gerenciamento de risco deliberado para ativos pioneiros, governança adaptativa à medida que os dados de desempenho surgem e o estabelecimento de canais de distribuição e redes logísticas adequados à finalidade.

O desenvolvimento de mercado se aplica quando um mercado nascente existe, mas permanece pequeno, fragmentado ou geograficamente limitado. O objetivo passa a ser fortalecer e expandir a participação, melhorar a confiabilidade e a qualidade, reduzir os custos de busca e transação e codificar as expectativas de desempenho. A política nesta fase enfatiza a facilitação da entrada, a padronização e os compromissos de aquisição que aprofundam a demanda, ao mesmo tempo que intensificam a concorrência no lado da oferta.

O crescimento do mercado caracteriza a fase de difusão, na qual as ofertas comprovadas são aumentadas para alcançar ampla adoção. O objetivo muda para alcançar compressão de custos, ampla disponibilidade, qualidade estável e concorrência robusta, ao mesmo tempo em que se salvaguardam os resultados ambientais e sociais. 3As escolhas de instrumentos nesta fase priorizam sinais e mandatos em toda a economia que institucionalizam o mercado,



apóiam a descoberta eficiente de preços e evitam a refragmentação.

O alinhamento das políticas com os estágios do mercado decorre dessas características. A criação de mercado geralmente requer mecanismos de mitigação de riscos e coordenação capazes de garantir receita inicial e sincronizar investimentos na cadeia de valor. Contratos por diferença (CFDs), compromissos de mercado avançados (AMCs), instrumentos de financiamento misto personalizados e assistência técnica em nível de plataforma abordam os riscos de receita, contraparte e coordenação, ao mesmo tempo que possibilitam o aprendizado e o estabelecimento de padrões. O desenvolvimento do mercado se beneficia de padrões de desempenho, normas de divulgação de carbono do produto e especificações de compras públicas que aumentam a demanda, reduzem as assimetrias de informação e apóiam a comparabilidade.

O crescimento do mercado é reforçado por políticas de preços, regras de acesso aberto e mandatos regulatórios que internalizam externalidades e incorporam expectativas em escala.

A criação de mercado industrial difere substancialmente dos mercados de consumo em vários aspectos importantes. As compras entre empresas (B2B) concentram a demanda em um número limitado de compradores, elevando o papel das especificações técnicas, procedimentos de qualificação, garantias e sistemas de certificação. As interdependências de infraestrutura em matérias-primas, armazenamento, transporte e monitoramento digital aumentam o custo de entrada, mas, uma vez resolvidas, geram padrões de escoamento mais previsíveis em contratos de longo prazo. O efeito de demonstração torna-se particularmente importante quando um único comprador âncora pode validar o desempenho, reduzir o risco percebido e catalisar a imitação rápida entre os pares.

A criação de mercado raramente ocorre como um evento isolado, mas tende a exigir engajamento sustentado, aprendizado iterativo e coordenação das partes interessadas em políticas, finanças e capacidades.

As intervenções devem evoluir à medida que os gargalos mudam do desempenho tecnológico para a logística, os padrões ou a proficiência da força de trabalho. Uma cautela crítica surge em relação à fixação prematura em soluções inferiores. Os instrumentos no lado da demanda podem, inadvertidamente, favorecer melhorias incrementais em processos estabelecidos, em vez de permitir mudanças descontínuas para paradigmas de produção alternativos.

O projeto de políticas deve preservar a flexibilidade por meio de especificações funcionais de aquisição, instrumentos com prazo determinado e revisões periódicas, e abordagens de portfólio que apóiem caminhos concorrentes nos estágios iniciais, ao mesmo tempo que restringem o foco à medida que as evidências se acumulam.

4.3 Perspectiva sistêmica e coordenação

A elaboração de políticas voltadas para a demanda em setores de difícil descarbonização se mostra mais eficaz quando concebida como parte de um sistema sociotécnico, em vez de instrumentos isolados. Essa perspectiva sistêmica reconhece que as opções tecnológicas, as instituições, as redes de atores, os mercados e as infraestruturas evoluem conjuntamente por meio de mecanismos complexos de retroalimentação que moldam tanto a eficácia das políticas quanto os resultados de mercado. A abordagem sistêmica revela interdependências críticas que instrumentos individuais não podem abordar isoladamente.

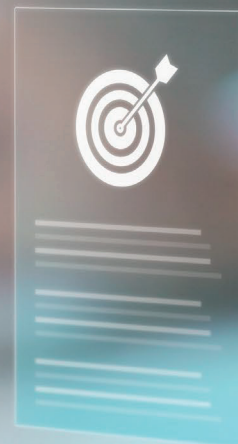
Os sistemas de produção conectam matérias-primas a montante, processos intermediários e usuários a jusante por meio de logística, redes de infraestrutura e padrões. Os desafios de coordenação detalhados na Seção 3.1 se manifestam aqui como interdependências com operações de rede, transporte de hidrogênio, gasodutos e armazenamento de CO₂ e sistemas de medição digital onde falhas em qualquer interface podem paralisar tecnologias que, de outra forma, seriam viáveis.

Portanto, os conjuntos de políticas devem abordar explicitamente a coordenação por meio de instrumentos que alinhem o cronograma de investimentos de múltiplos atores.

Pacotes de políticas adaptativos e iterativos se mostram essenciais para gerenciar essas interdependências. Pacotes de políticas adaptativos e iterativos provam ser essenciais para gerenciar essas interdependências. Os conjuntos de políticas devem evoluir em conjunto com os sistemas à medida que os instrumentos alteram os fluxos de recursos, as expectativas e as coalizões, que, por sua vez, remodelam a viabilidade política e a eficácia das políticas subsequentes. Essa dinâmica exige uma direção crível de longo prazo, aliada a mecanismos que ajustem os níveis e o projeto em resposta ao aprendizado, evitando tanto a fixação prematura em projetos inferiores quanto ciclos instáveis de avanço e retrocesso que corroem a confiança dos investidores.

As categorias de falhas estabelecidas na Seção 3.2 se manifestam distintamente em contextos sistêmicos. Falhas de coordenação surgem quando os atores não conseguem alinhar investimentos e cronogramas em cadeias de valor interdependentes. Falhas de infraestrutura ocorrem quando faltam ativos ou plataformas compartilhadas, como gasodutos de hidrogênio ou redes de transporte de CO₂. Falhas de capacidade surgem quando empresas e órgãos públicos não possuem as habilidades e o conhecimento para adotar, regulamentar ou adquirir soluções inovadoras.

Falhas institucionais se manifestam quando regras e normas impedem novas configurações ou carecem de credibilidade entre os participantes do mercado. Falhas institucionais se manifestam quando regras e normas impedem novas configurações ou carecem de credibilidade entre os participantes do mercado. Para os profissionais, a perspectiva sistêmica se traduz em diversos princípios operacionais. Abordagens de portfólio que coordenam instrumentos de pressão da oferta e de estímulo à demanda ao longo do ciclo de inovação podem abordar múltiplas categorias de falhas simultaneamente. Estratégias de agrupamentos locais podem superar falhas de infraestrutura e coordenação, localizando atividades interdependentes em conjunto e compartilhando a infraestrutura necessária. A criação iterativa de programas com pontos de revisão integrados e mecanismos de ajuste de parâmetros permite a gestão adaptativa à medida que as condições do sistema evoluem. Mecanismos de coordenação interinstitucional ajudam a alinhar intervenções em diferentes domínios de políticas e níveis de governança. Processos de engajamento de partes interessadas que incluem inovadores de nicho, empresas estabelecidas, provedores de infraestrutura e usuários finais podem revelar necessidades de coordenação e criar coalizões para implementação sustentada ao longo dos ciclos políticos.



Referências do Capítulo 4

BloombergNEF (2024) Industry decarbonization market outlook 1H 2024. New York: BloombergNEF.

Bollerhey, T., Exenberger, M., Geyer, F. and Westphal, K. (2023) H2Global -Idea, Instrument and Intentions. 2nd edn. Hamburg: H2Global Foundation.

Edmondson, D.L., Kern, F. and Rogge, K.S. (2019) The co-evolution of policy mixes and socio-technical systems: Towards a conceptual framework of policy mix feedback in sustainability transitions. *Research Policy*, 48(10), p.103555.

Elzen, B., Geels, F.W. and Green, K. eds. (2004) *System innovation and the transition to sustainability: theory, evidence and policy*. Edward Elgar Publishing.

European Commission (2024) *European Green Deal industrial plan*. Brussels: European Commission.

Hart, D.M. (2024) To boost energy innovation, pull technologies into the market. *Issues in Science and Technology*, 41(1), pp. 91-94.

Industrial Innovation Initiative (2024) *Decarbonizing industry by 2050: A federal and state policy blueprint*.

Washington, DC: Great Plains Institute and World Resources Institute.

IFC (2021) *Promoting impact by creating markets: Management and measurement considerations for development finance institutions*. EM Compass Note. Washington, DC: IFC.

Industrial Innovation Initiative (2024) *Decarbonizing industry by 2050: A federal and state policy blueprint*. Washington, DC: Great Plains Institute and World Resources Institute.

Resources for the Future (2023) *Demand-pull tools for innovation in the cement and iron and steel sectors*. Washington, DC: RFF.

van der Loos, A., Elzinga, R., Negro, S. and Hekkert, M. (2024) *The rise of technological innovation systems in sustainability transitions*. Cambridge Open Engage. doi: 10.33774/coe-2024-t859z.

World Bank Group (2019) *'Creating Markets' to Leverage the Private Sector for Sustainable Development and Growth - An Evaluation of the World Bank Group's Experience Through 16 Case Studies (Vol. 1 of 2) (English)*. Sector or thematic evaluation Washington, D.C.: World Bank Group.



A man with short brown hair, wearing a blue and red plaid shirt, is seen from the back and side. He is looking at a laptop screen and a document with a bar chart. In the background, several large sheets of paper with various charts and graphs are pinned to a wall. The scene is dimly lit, suggesting an office or meeting room environment.

Estudios de casos: O que está funcionando

5

5. Estudos de casos: O que está funcionando

Resumo do Capítulo 5

Cinco casos bem estudados informam a criação de políticas e mecanismos-chave, ao mesmo tempo que revelam desafios de implementação. Os estudos de caso são:

1) A H2Global aborda problemas de coordenação por meio de intermediários que contratam ambos os lados do mercado, fornecendo compras de hidrogênio de longo prazo viáveis e realizando vendas competitivas, embora a complexidade administrativa e a magnitude fiscal desafiem a implementação inicial.

2) Os Contratos por Diferença (CFDs) do Reino Unido fornecem evidências sólidas, garantindo preços fixos para a eletricidade por quinze anos. Estudos atribuem a queda de custo da energia eólica offshore de £140/MWh para £40/MWh em grande parte a volumes de leilão previsíveis com financiamento de projetos aprimorado. Estruturas de pagamento bidirecionais oferecem benefícios fiscais quando os preços de mercado excedem os preços de exercício.

3) A HYBRIT é líder na produção de aço livre de combustíveis fósseis, demonstrando redução direta baseada em hidrogênio e cortando emissões em mais de 90%. A estrutura de parceria entre produtora de aço e empresas estatais criou alinhamento na cadeia de valor, enquanto a compra inicial pela indústria automotiva validou a disposição de pagar. O efeito de demonstração influenciou propostas europeias.

4) A Iniciativa Federal Buy Clean dos EUA alavancou as compras governamentais antes de sua revogação em janeiro de 2025. Nove estados mantiveram os programas, demonstrando a durabilidade do compromisso em nível estadual, mas também a necessidade de que as políticas sejam concebidas para resistir aos ciclos políticos.

5) Os combustíveis de aviação sustentáveis ilustram combinações de políticas que incluem créditos, mandatos e aquisições. Entretanto, a falência da Fulcrum BioEnergy em setembro de 2024, apesar da significativa demanda das companhias aéreas, ilustra que os compromissos de demanda por si só não podem superar todos os riscos do projeto, incluindo atrasos na obtenção de licenças, problemas técnicos e recuo de investidores, ressaltando a importância de políticas complementares de apoio.

5.1 H2Global: Criação de mercado por leilão duplo

A H2Global exemplifica a criação de mercado (aço verde) por meio de um intermediário que contrata em ambos os lados de um mercado nascente para superar falhas de coordenação e risco de receita.

O mecanismo central é um leilão duplo no qual um intermediário com capital público celebra contratos de compra de longo prazo com produtores de derivativos de hidrogênio limpo e, em seguida, vende esses produtos nos mercados europeus por meio de leilões de vendas de curto prazo, sendo a Hintco a entidade operacional que implementa o mecanismo.

Ao interpor um intermediário com credibilidade que fornece contratos de compra de longo prazo viáveis para fornecedores e leilões de venda competitivos para compradores, a H2Global reduz o risco de contraparte, cria descoberta de preços e acelera as decisões de investimento, preservando ao mesmo tempo a avaliação de mercado no lado da demanda, por meio de venda competitiva (Bollerhey et al., 2023). O mecanismo aborda um problema clássico do ovo e da galinha em mercados iniciais, onde os pioneiros no lado da oferta não conseguem obter financiamento sem visibilidade da demanda, e os pioneiros no lado da demanda não podem se comprometer sem garantia de fornecimento e qualidade de produto e cronogramas de entrega confiáveis.

O projeto incorpora vários princípios políticos críticos. Primeiro, cria um mercado líder convertendo a direção pública em contratos viáveis que atraem capital privado onde os preços do carbono e a demanda voluntária seriam insuficientes. Segundo, usa a alocação competitiva para revelar os custos de redução e controlar os gastos públicos por meio da descoberta de preços. Terceiro, acelera o aprendizado comprometendo-se com volumes plurianuais que apóiam a expansão dos fornecedores e geram dados operacionais para o futuro estabelecimento de padrões e certificação. A estrutura de leilão duplo esclarece a diferença entre o custo inicial e o valor de mercado é reduzida pelos subsídios e permite que essa diferença diminua à medida que a produção aumenta e a demanda do mercado amadurece.

O mecanismo opera dentro de uma arquitetura política mais ampla que aumenta sua eficácia. A Estratégia Nacional de Hidrogênio atualizada da Alemanha sinalizou um papel significativo para as importações como complemento à produção doméstica

e criou uma base legal e orçamentária para contratos no estilo da H2Global. As decisões europeias sobre auxílio estatal autorizaram esse apoio sob as diretrizes climáticas e energéticas, sujeitas a salvaguardas de proporcionalidade e concorrência. As parcerias internacionais expandiram o alcance por meio de acordos de cooperação com potenciais países fornecedores para alinhar certificação, logística e modelos contratuais.

Os desafios de implementação se concentraram na complexidade administrativa, na necessidade de garantir a compatibilidade da certificação de sustentabilidade entre jurisdições e na magnitude fiscal da diferença de custo nos primeiros anos. Contratos de longo prazo correm o risco de fixar derivativos ou rotas de produção específicos se as licitações não forem projetadas com revisão periódica e abertura tecnológica. A mitigação requer licitações em etapas, definições de produto flexíveis consistentes com a evolução da certificação e uma lógica clara de extinção à medida que a demanda privada se aprofunda e os padrões se harmonizam.

5.2 Contratos por diferença no Reino Unido: Estabilização de receitas

Os Contratos por Diferença (CFDs) de eletricidade do Reino Unido fornecem um exemplo consolidado e bem estudado de um instrumento no lado da demanda que corrigiu a volatilidade da receita e o risco de investimento para aumentar tecnologias de capital intensivo. Os CFDs garantem um preço de exercício real fixo para a eletricidade durante o prazo do contrato, tipicamente quinze anos, com a contraparte pagando a diferença ao gerador quando os preços de mercado caem abaixo do preço de exercício e recebendo a diferença quando os preços de mercado sobem acima dele.



O esquema é financiado por meio de uma taxa sobre os fornecedores de eletricidade e administrado por uma contraparte central, o que aumenta a credibilidade e reduz os custos de transação em relação à proteção bilateral. A alocação ocorre por meio de leilões competitivos que revelam os custos e orientam as ofertas, com fundos tecnológicos que equilibram a competição com objetivos de aprendizado específicos da tecnologia. Estudos atribuem grande parte da redução de custos à interação de grandes e previsíveis volumes de leilão com melhores condições de financiamento de projetos e turbinas maiores, com os CfDs reduzindo o custo de capital ao diminuir o risco de preço no atacado e o risco de restrição, o que, para tecnologias de capital intensivo cuja viabilidade econômica onde a predominância das despesas iniciais é fundamental (Đukan, 2025; Beiter et al., 2024).

O esquema aborda diversas falhas de mercado simultaneamente. O risco de receita e a volatilidade dos preços no atacado criam obstáculos ao investimento que a exposição comercial padrão não consegue proteger eficientemente para ativos de construção nova com longos ciclos de vida e sem flexibilidade no custo do combustível. Os CfDs substituem as receitas comerciais incertas por fluxos de caixa contratados estáveis, reduzindo o custo médio ponderado do capital e tornando os projetos financiáveis em larga escala. A alocação competitiva corrige as assimetrias de informação, revelando custos e estabelecendo expectativas para as trajetórias de aprendizado.

O instrumento evoluiu com as condições de mercado. As primeiras rodadas apresentaram preços de exercício administrativos e leilões específicos de tecnologia para impulsionar a energia eólica offshore quando a capacidade da indústria e a experiência doméstica eram limitadas.

As rodadas posteriores passaram para a alocação totalmente competitiva com envelopes orçamentários, preservando os fundos para tecnologia. A importância da calibração de parâmetros emergiu quando uma rodada de alocação não produziu lances bem-sucedidos para energia eólica offshore, destacando como a indexação, a inflação, os custos da cadeia de suprimentos e as restrições da rede devem ser refletidos nos limites dos leilões e nos envelopes orçamentários para sustentar a participação.

A estrutura de pagamento bidirecional proporcionou benefícios fiscais significativos. Quando os preços de mercado excedem os preços de exercício, os geradores pagam a diferença de volta ao sistema, protegendo os consumidores de lucros inesperados, ao mesmo tempo que demonstra a resiliência fiscal de mecanismos de estabilização de receita bem projetados. O esquema apoiou o desenvolvimento da cadeia de suprimentos doméstica e a capacidade de exportação via energia eólica offshore, com a fabricação localizada de componentes e serviços emergindo como substanciais benefícios adicionais.

5.3 HYBRIT: Aço livre de combustíveis fósseis com contrato de compra

A iniciativa HYBRIT na Suécia é pioneira na produção primária de aço livre de combustíveis fósseis e demonstra como mecanismos coordenados no lado da demanda, contratos de compra de longo prazo e investimento público podem reduzir os riscos de processos industriais inovadores. O núcleo tecnológico é a redução direta de minério de ferro com base em hidrogênio, seguida pela produção de aço em forno elétrico a arco usando energia de baixo carbono.

A modelagem de processos e os primeiros resultados piloto indicam que essa rota pode reduzir as emissões do processo em mais de 90% em relação às rotas convencionais quando alimentada por eletricidade adicional de baixo carbono e quando o hidrogênio na origem é produzido com baixas emissões (Vogl et al., 2021; Kwan et al., 2025). O modelo de negócios para usinas pioneiras depende de uma demanda crível e capital paciente. A HYBRIT foi estruturada como uma parceria entre uma produtora de aço já estabelecida e duas empresas estatais que controlam eletricidade e minério de ferro, criando alinhamento em toda a cadeia de valor.

Acordos iniciais de fornecimento com compradores industriais nos setores automotivo e outros validam a disposição de pagar por aço de baixo carbono e reduzem o risco de compra no comissionamento. Tais acordos afastam o risco de mercado para longe do produtor e sinalizam aos financiadores que as receitas do projeto não dependem totalmente dos mercados de commodities. Eles também transmitem os requisitos de fornecimento a jusante de volta para o projeto, alinhando as especificações do produto e os processos de garantia de qualidade com as necessidades do usuário final, abordando falhas de informação e coordenação que, de outra forma, impedem a difusão em mercados B2B com procedimentos de qualificação rigorosos (Hybrit, 2023; European Commission, 2023).

O papel do Estado sueco expandiu-se para além dos subsídios, abrangendo a coordenação estratégica. As empresas estatais promoveram o alinhamento no fornecimento de eletricidade e no processamento de minério. O ambiente de licenciamento e os planos de desenvolvimento da rede elétrica foram adaptados para acomodar novas e grandes cargas para eletrólise de hidrogênio e siderurgia elétrica. Os formuladores de políticas promoveram práticas de divulgação e aquisição que tornam o carbono incorporado um atributo relevante em obras públicas, apoiando mercados líderes em materiais de baixo carbono.



O efeito demonstrativo do projeto catalisou uma transformação mais ampla. Ele gerou diversas propostas para redução direta baseada em hidrogênio na Europa e em outros lugares, ao mesmo tempo que contribuiu para o desenvolvimento de padrões em toda a indústria para certificação de aço verde e contabilização da pegada de carbono do produto. Os sinais de demanda dos setores automotivo e da construção civil ampliaram-se por meio de iniciativas voluntárias e alianças de compradores que se comprometem com volumes de aço de baixo carbono até datas específicas.

5.4 A iniciativa dos EUA Buy Clean: Aquisições federais/estaduais

Os Estados Unidos utilizaram as aquisições federais para criar mercados iniciais para materiais de construção com baixo carbono incorporado. A Iniciativa Federal Buy Clean baseou-se no substancial poder de compra do governo federal e no papel central das obras públicas no consumo de concreto, aço, asfalto e vidro. O programa associou o financiamento de projetos que utilizam materiais com menor emissão de carbono incorporado ao desenvolvimento de infraestrutura de medição e verificação, notadamente as Declarações Ambientais de Produto e as regras de categoria de produto.

A lógica da política era definir limites baseados em desempenho para o carbono incorporado no nível do produto, premiar projetos que atingissem ou superassem esses limites e atualizar os limites ao longo do tempo à medida que o fornecimento melhorasse e a qualidade da medição aumentasse. O mecanismo abordou as falhas de informação, tornando o carbono incorporado visível e comparável, e ajudou a mitigar os riscos de pioneirismo, garantindo a demanda por produtos que atendessem aos critérios de desempenho verificados (Council on Environmental Quality, n.d.).

As especificações baseadas em desempenho mantiveram a neutralidade tecnológica no nível do processo, ao mesmo tempo que recompensavam a inovação que alcançava resultados superiores. A implementação em fases permitiu que as agências testassem os limites, refinassem a coleta de dados e desenvolvessem a capacidade dos fornecedores antes de implementá-los em portfólios mais amplos. O apoio orçamentário durante as primeiras fases cobriu os custos incrementais de produtos com menor emissão de carbono e protegeu os orçamentos das agências.

A rescisão do programa em nível federal em janeiro de 2025 criou um experimento natural de coordenação de políticas federais e estaduais. Embora a liderança federal tenha terminado, nove estados continuaram e expandiram seus respectivos programas Buy Clean, demonstrando a durabilidade do compromisso em nível estadual e o potencial para difusão de políticas de baixo para cima. A continuidade estadual destaca tanto as oportunidades quanto os desafios para manter o ímpeto do mercado sem coordenação federal.

Alianças de compradores federais e estaduais surgem como uma solução prática para manter a escala e a coordenação, preservando a flexibilidade de implementação em nível estadual. Cooperativas de compras multiestaduais poderiam agregar pedidos em diferentes jurisdições, melhorando a descoberta de preços e reduzindo a volatilidade para os fornecedores, ao mesmo tempo que reduzem os custos unitários para os compradores públicos. Especificações padronizadas e cláusulas contratuais modelo poderiam reduzir os custos de transação e permitir que os fornecedores reutilizassem a documentação em diferentes licitações.

5.5 Combustíveis de aviação sustentáveis: Mandatos, Créditos, AMCs

A aviação apresenta um desafio distinto no lado da demanda, onde as restrições de densidade energética e os prazos regulatórios de segurança limitam as opções de descarbonização de curto prazo além dos combustíveis de substituição direta. As políticas combinam créditos de produção, mandatos de mistura, compras públicas de viagens aéreas com critérios de SAF (Combustível de Aviação Sustentável) e compromissos antecipados de mercado por parte de companhias aéreas e clientes corporativos.

A União Europeia adotou mandatos vinculativos de mistura que aumentam gradualmente ao longo do tempo no âmbito do programa ReFuelEU Aviation, criando trajetórias de demanda previsíveis para SAF e proporcionando visibilidade de investimento para os produtores. Os Estados Unidos introduziram créditos fiscais que recompensam a menor intensidade de carbono em todos os combustíveis, enquanto as diretrizes do Tesouro estabelecem a elegibilidade com base nas emissões, que pode apoiar os e-combustíveis quando produzidos com hidrogênio de baixo carbono e eletricidade.

Sua eficácia depende de uma avaliação robusta do ciclo de vida e de uma certificação confiável para garantir a integridade ambiental.



O desenvolvimento de sistemas de registro e reivindicação busca expandir o alcance do mercado além do fornecimento físico direto, permitindo que os clientes reivindiquem os benefícios da redução de emissões de SAF mesmo quando a logística da cadeia de suprimentos impede a entrega direta de combustível em aeroportos específicos. Entretanto, os formuladores de políticas devem garantir que tais sistemas evitem a dupla contagem e se integrem aos inventários nacionais e às estruturas contábeis internacionais da OACI.

Os compromissos de mercado antecipados surgiram como complementos importantes, garantindo compras futuras em termos acordados, condicionados à entrega de SAF (Combustível de Aviação Sustentável) que atenda a critérios de sustentabilidade específicos. Acordos de fornecimento de combustível com companhias aéreas, com produtores específicos e alianças de compradores que reúnem a demanda corporativa, agregam volumes e proporcionam certeza de receita. Entretanto, o caso da Fulcrum BioEnergy ilustra que os compromissos de demanda por si só não podem superar todos os riscos de desenvolvimento de projetos.

Apesar de garantir acordos de fornecimento significativos com as principais companhias aéreas e levantar mais de US\$ 1 bilhão em financiamento, a empresa entrou com pedido de recuperação judicial (Chapter 11) em setembro de 2024, alegando atrasos na obtenção de licenças, problemas técnicos e recuo de investidores (Bettenhausen, 2024).

Referências do capítulo 5

Azarova, V., Singh, H. and Shams, A. (2024) Unraveling Willingness to Pay for Sustainable Aviation Fuel. Rocky Mountain Institute.

Bauen, A., Bitossi, N., German, L., Harris, A. and Leow, K. (2020) Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(3), pp. 263-278.

Beiter, P., Guillet, J., Jansen, M., Wilson, E. and Kitzing, L. (2024) The enduring role of contracts for difference in risk management and market creation for renewables. *Nature*



Energy, 9(1), pp.20-26.

Bettenhausen, C. (2024) 'Fulcrum BioEnergy abandons trash-to-fuel plant in Nevada', Chemical & Engineering News, 5 June.

Bollerhey, T., Exenberger, M., Geyer, F. and Westphal, K. (2023) H2Global -- Idea, Instrument and Intentions. 2nd edn. Hamburg: H2Global Foundation.

Council on Environmental Quality (n.d.) Federal Buy Clean Initiative. Available at: <https://www.sustainability.gov/archive/biden46/buyclean/index.html>

Đukan, M., Keles, D. and Kitzing, L. (2025) The impact of two-sided contracts for difference on debt sizing for offshore wind farms. The Energy Journal, p.01956574251331942.

European Commission (2023) 'The HYBRIT story: unlocking the secret of green steel production', Directorate-General for Climate Action - Climate Action, 20 June.

Hybrit Development AB (2023) 'Positive decision on support for LKAB and HYBRIT', Hybrit, 14 December.

Kwan, T., Roulier, A., Eckelman, M.J. (2025) Beyond Grid Dependency: Technical and Economic Case for New Energy Systems in Green Steel. Sustainability Research Institute, Schneider Electric.

Staples, M.D., Malina, R. and Barrett, S.R. (2017) The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels. Nature Energy, 2(2), pp.1-8.

Vogl, V., Olsson, O. and Nykvist, B. (2021) Phasing out the blast furnace to meet global climate targets. Joule, 5(10), pp.2646-2662.

World Economic Forum (2025) Financing Sustainable Aviation Fuels: Case Studies and implications for Investment. In collaboration with Kearney, Geneva, Switzerland.



Desenvolver programas que mobilizam capital privado

6



6. Desenvolver programas que mobilizam capital privado

Resumo do Capítulo 6

Programas de estímulo à demanda exigem atenção cuidadosa ao escopo, estruturas contratuais, seleção competitiva e sistemas de mensuração. Esses elementos, em conjunto, determinam se os instrumentos mobilizam investimentos com sucesso, mantendo a disciplina fiscal. A primeira decisão crítica diz respeito a optar por uma ampla neutralidade tecnológica ou por abordagens direcionadas. Enquanto a neutralidade permite que a competição de mercado revele as soluções de menor custo, o apoio direcionado se mostra mais apropriado para tecnologias inovadoras que enfrentam desafios específicos de coordenação e infraestrutura especialmente quando os benefícios sociais superam o que as empresas individuais podem obter por meio de mercados privados.

A elaboração de um contrato influencia fundamentalmente a viabilidade financeira e a sustentabilidade fiscal. Contratos bilaterais de carbono por diferença têm se destacado como particularmente eficazes, pois garantem fluxos de receita para a produção de baixo carbono, ao mesmo tempo que prevêm mecanismos de recuperação quando os preços do carbono aumentam, limitando a exposição fiscal e evitando lucros extraordinários que comprometem a legitimidade pública. A duração deve normalmente abranger de 10 a 20 anos, o suficiente para justificar os investimentos de capital, mantendo-se flexível o bastante para acomodar a evolução tecnológica.

A seleção competitiva por meio de leilões reversos ou solicitações estruturadas de propostas revela os custos reais de redução de emissões, controlando gastos públicos. Quando implementados de forma criteriosa, esses mecanismos preservam a competição mesmo em mercados concentrados. Sistemas robustos de medição, vinculados a resultados de desempenho verificados, e não apenas a produtos, permitem uma gestão adaptativa. A avaliação regular em pontos de verificação predeterminados permite o aprimoramento do programa sem sacrificar a confiança do investidor ou a credibilidade da política por meio da volatilidade intermitente.

6.1 Escopo e direcionamento

A escolha fundamental de projeto que os arquitetos de programas enfrentam diz respeito a se devem criar esquemas amplos e tecnologicamente neutros que permitam que a competição de mercado revele as soluções de menor custo, ou concentrar o apoio em setores, tecnologias ou regiões geográficas específicas onde as falhas de mercado são mais pronunciadas. Essa escolha tem implicações profundas para a eficácia do programa, a complexidade administrativa e a sustentabilidade política.

Uma lógica híbrida se mostra digna de forte consideração, onde a neutralidade ampla é vantajosa para tecnologias maduras que se aproximam da paridade, enquanto instrumentos direcionados são apropriados para rotas inovadoras, especialmente em setores de difícil descarbonização que enfrentam riscos distintos e onde os benefícios sociais provavelmente não serão capturados por investidores individuais.

O direcionamento setorial é particularmente convincente onde os custos de carbono representam uma parcela significativa dos custos de produção e onde as soluções de descarbonização são discretas e fragmentadas (singulares, de grande escala e com alto custo inicial), como a redução direta de hidrogênio no aço e a captura de carbono em fornos de cimento.

A aquisição a longo prazo proporciona segurança por meio de instrumentos como contratos de carbono por diferença ou compromissos antecipados de mercado, o que ajuda a reduzir o risco

de investimentos irreversíveis. Ao mesmo tempo, minimizam os lucros inesperados por meio de estruturas de pagamento bidirecionais e mecanismos de recuperação durante períodos de preços elevados do carbono (Gangotra et al., 2023).

A neutralidade tecnológica proporciona importantes benefícios de eficiência, permitindo que a concorrência revele os custos reais de redução de emissões, evitando erros administrativos que podem surgir quando os agentes públicos tentam prever trajetórias tecnológicas antes dos eventos. Entretanto, a neutralidade estrita pode ser insuficiente para tecnologias inovadoras que enfrentam riscos de implantação inéditos, exigem investimentos coordenados em infraestrutura ou confrontam externalidades de rede que impedem as empresas individuais de capturar benefícios sociais. Pesquisas demonstram que as estratégias de direcionamento de políticas devem levar em conta a complexidade tecnológica e a maturidade do mercado, sendo o apoio direcionado necessário em setores de alta complexidade que enfrentam transições tecnológicas fundamentais (Hughes e Meckling, 2018).

Dentro de programas direcionados, os projetistas ainda enfrentam questões de neutralidade nos níveis de produto e processo. Contratos específicos para determinados tipos de aço simplificam a seleção e verificação de referências, mas podem restringir a participação e limitar a concorrência entre fornecedores. Janelas setoriais mais amplas aumentam a concorrência, ao mesmo tempo que exigem estruturas de medição mais complexas para evitar a supercompensação entre os setores. Processos de produção heterogêneos. O direcionamento geográfico levanta considerações adicionais sobre os objetivos de desenvolvimento industrial, com o direcionamento a agrupamentos existentes potencialmente maximizando os resultados de implantação a curto prazo, enquanto estratégias baseadas no local, em regiões pós-industriais podem gerar maiores benefícios colaterais para o desenvolvimento econômico.

Os riscos de captura exigem atenção explícita em programas direcionados, pois os benefícios concentrados podem atrair lobby e diluir a eficácia do programa. Critérios de elegibilidade claros, processos de premiação transparentes e mecanismos de seleção competitivos ajudam a disciplinar os resultados do programa, mantendo a legitimidade. Estruturas de pagamento baseadas em desempenho que vinculam os desembolsos à entrega verificada e aos resultados de carbono reduzem o risco moral, garantindo a adicionalidade. As estruturas de avaliação devem ir além das métricas de preço imediatas para capturar resultados de inovação, efeitos no desenvolvimento da cadeia de suprimentos e indicadores de transformação do sistema.

6.2 Estrutura e duração do contrato

O desenho do contrato molda fundamentalmente a alocação de riscos, a viabilidade financeira do projeto e a exposição fiscal em programas de estímulo à demanda, exigindo uma estruturação cuidadosa da duração, dos mecanismos de pagamento, das obrigações de desempenho e das disposições de ajuste. O desafio reside em fornecer certeza suficiente para atrair investimento privado, preservando a flexibilidade para se adaptar às mudanças nas condições de mercado.

As estruturas de preços podem ser fixos, indexados ou flutuantes em relação aos mercados de referência, sendo que os contratos bidirecionais por diferença (CFDs) que pagam a diferença entre um preço de exercício e uma referência transparente de carbono ou de commodities são atualmente preferidos porque oferecem proteção contra preços baixos, ao mesmo tempo que recuperam o apoio durante períodos de preços altos, o que limita os custos fiscais e melhora a aceitação social, evitando lucros inesperados. A duração do contrato deve estar alinhada com a vida útil dos ativos e as necessidades de financiamento, sendo que compromissos de 10 a 20 anos

são normalmente necessários para investimentos industriais de capital intensivo.

A seleção do benchmark é o ponto crucial do projeto de CCfD, pois os pagamentos geralmente se aplicam a um benchmark acordado de emissões evitadas por unidade de produto em comparação com uma linha de base existente. A heterogeneidade do produto exige consideração cuidadosa, pois benchmarks diferenciados para diferentes classes de produtos podem evitar a supercompensação, ao mesmo tempo que podem reduzir os incentivos à substituição, onde materiais alternativos poderiam oferecer funcionalidade equivalente.

Os requisitos de desempenho devem traduzir os objetivos públicos em obrigações verificáveis que condicionem os pagamentos às quantidades entregues e ao desempenho de carbono validado. Isso pode incluir fatores de carga mínimos, prazos de comissionamento, métricas de disponibilidade, normas de medição de carbono e relatórios padrão e direitos de intervenção quando o risco de fornecimento estiver concentrado. Mecanismos de fiscalização robustos criam responsabilidade, garantindo que os contratados enfrentem penalidades financeiras por baixo desempenho e potencial perda de controle por meio de direitos de intervenção quando não cumprirem o contrato.

Os mecanismos de ajuste em políticas de estímulo à demanda permitem a adaptabilidade política necessária, mantendo a certeza do investimento. Os contratos alcançam esse equilíbrio incorporando janelas de revisão pré-anunciadas que permitem a renegociação do preço de exercício somente quando ocorrem mudanças estruturais específicas, como novos ajustes de carbono na fronteira, mudanças significativas nos índices de custo de insumos ou grandes avanços tecnológicos. Essas cláusulas de reabertura, definidas de forma restrita, preservam a viabilidade financeira do contrato, limitando a incerteza a circunstâncias predeterminadas, evitando, assim, prêmios de risco político mais elevados associados a mudanças políticas discricionárias.

A interação com os sistemas de precificação de carbono exige atenção explícita ao projeto para evitar dupla compensação. Os preços de exercício do CCfD devem refletir os benefícios líquidos após a contabilização da precificação de carbono, das eliminações progressivas da alocação gratuita e dos mecanismos de ajuste na fronteira. As estruturas de pagamento bidirecionais tornam-se particularmente importantes nesse contexto, pois permitem a recuperação de valores quando os preços do carbono sobem acima dos preços de exercício, evitando lucros extraordinários durante períodos de preços de carbono elevados, ao mesmo tempo que mantêm a proteção contra perdas.

6.3 Seleção competitiva: Leilões e solicitações de propostas (RFPs)

O mecanismo de seleção determina fundamentalmente a eficácia do programa, revelando os custos reais, garantindo a seleção justa das contrapartes e mantendo a disciplina fiscal. Os mecanismos de leilão reverso demonstram eficácia particular na descoberta de preços quando as condições de mercado apresentam múltiplos fornecedores confiáveis e resultados claramente definidos e mensuráveis que podem ser submetidos a processos de licitação competitivos. Entretanto, o planejamento de leilões reversos eficazes exige uma análise cuidadosa dos critérios de adjudicação, que vão além da simples competição de preços, incorporando avaliações de capacidade financeira e técnica entre os fornecedores em potencial.

Essa abordagem multifacetada ajuda a mitigar dois riscos significativos: o fenômeno da maldição do vencedor, em que os licitantes vencedores podem ter superestimado sistematicamente sua capacidade de entregar pelo preço da proposta vencedora, e o risco relacionado de não entrega ou falhas de desempenho que podem prejudicar os objetivos do programa (Attia et al., 2020; Bergman et al., 2023).

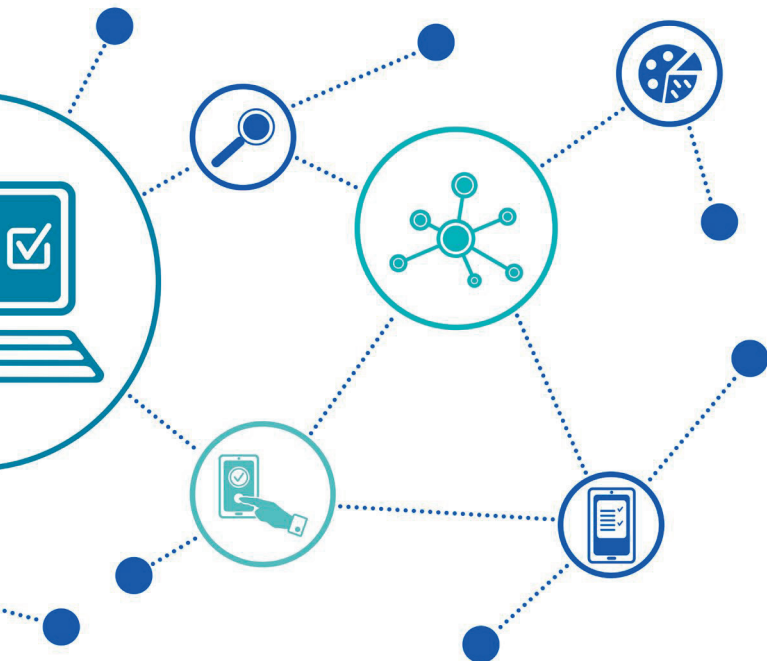


Para aplicações industriais complexas, processos estruturados de RFP que incorporam elementos negociados e procedimentos de avaliação iterativos podem se mostrar mais apropriados do que mecanismos puramente de leilão. Essas abordagens de aquisição mais sofisticadas permitem que os avaliadores de projetos realizem avaliações abrangentes de perfis de risco técnico, restrições de viabilidade de integração e contribuições de valor geral do sistema, em vez de reduzir o processo de seleção de fornecedores a uma única métrica de preço.

O projeto de processos competitivos deve levar em conta a estrutura de mercado e as características dos fornecedores em setores de difícil desregulamentação. Um número reduzido de fornecedores com altos riscos correlacionados pode produzir competição insuficiente ou dispersão excessiva de propostas que prejudica a descoberta de preços. A avaliação multi critério torna-se essencial quando a complexidade técnica, os requisitos de integração ou os objetivos políticos mais amplos vão além da minimização de custos. Estruturas de elegibilidade devem manter a competitividade, garantindo ao mesmo tempo a capacidade de execução e a integridade dos programas por meio de limiares mínimos de prontidão técnica e requisitos de solidez financeira.

6.4 Medição e avaliação

Os mecanismos no lado da demanda exigem sistemas robustos de medição de desempenho que vinculem os resultados aos impactos e sejam apoiados por indicadores adequados, modelos de avaliação contrafactual e processos de aprendizagem adaptativos que permitam a correção de rumo e a expansão em tempo hábil. Seguindo os princípios de avaliação da OCDE e as metodologias da Comissão Europeia, as estruturas de medição e



avaliação podem ser entendidas como uma estrutura de três níveis: produto, resultado e impacto (IEA, 2023; OECD, 2011). As métricas de produtos devem capturar os resultados imediatos do programa, incluindo os volumes contratados e entregues de materiais de baixo carbono, os diferenciais de preço de exercício, a redução unitária entregue por contrato e evidências de reduções de custos ao longo das curvas de aprendizado. As métricas de resultados devem refletir objetivos políticos mais amplos, como reduções de emissões verificadas em relação às linhas de base, mudanças nos padrões de investimento setorial em direção a rotas de baixo carbono, valor agregado doméstico e empregos em agrupamentos apoiados e medidas de competitividade industrial.

A avaliação do impacto deve incorporar análises contrafatuais para avaliar a adicionalidade e evitar atribuições que tenham ocorrido de qualquer maneira. As métricas de custo-eficácia devem ser relacionadas de forma transparente, incluindo o custo por tonelada reduzida, líquido de recuperações, índices de alavancagem do capital privado em relação ao capital público mobilizado e comparações com instrumentos políticos alternativos. O momento da avaliação é importante porque as medidas de resultados iniciais podem orientar correções de implementação, as medidas de resultados a médio prazo revelam o desenvolvimento do mercado e a mudança comportamental, e as medidas de impacto a longo prazo avaliam as trajetórias de emissões sustentadas.

As práticas de gestão adaptativa devem ser institucionalizadas,

conectando as conclusões da avaliação aos pontos de revisão do programa pré-anunciado, onde os critérios de elegibilidade, as fórmulas de preço de exercício, as linhas de base de referência e os critérios de desempenho do carbono estejam disponíveis para melhoria contínua.

Referências do capítulo 6

Attia, B., Kann, S. and Bazilian, M. (2020) 'PART I: How Auctions Helped Solar Become the Cheapest Electricity in the World', *Georgetown Journal of International Affairs*, 24 February.

Bergman, A., Krupnick, A., Haerle, D., Bioret, L., Zhu, Y. and Shih, J.-S. (2023) Demand-Pull Tools for Innovation in the Cement and Iron and Steel Sectors, *Resources for the Future Report 23-01*, Washington, DC: RFF.

BloombergNEF (2024) Industry decarbonization market outlook 1H 2024. New York: BloombergNEF.

Cozzi, P. (2012) Assessing Reverse Auctions as a Policy Tool for Renewable Energy Deployment, *Energy, Climate, and Innovation Program Report*, Medford, MA: Tufts University Fletcher School.

Gangotra, A., Carlsen, W., Kennedy, K. and Lebling, K. (2023) How Advance Market Commitments and Contracts for Difference Can Help Create a Market for Green Industrial Products, *World Resources Institute*, Washington, DC.

Hughes, L. and Meckling, J. (2018) 'Policy Competition in Clean Technology: Scaling Up or Innovating Up?', *Business and Politics*, 20(4), pp. 588-614.

IEA (2023) Demand-Side Data and Energy Efficiency Indicators: A Guide to Designing a National Roadmap, Paris: International Energy Agency, CC BY 4.0.

IRENA (2025) Renewable Power Generation Costs in 2024. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

OECD (2011) Demand-side Innovation Policies, Paris: OECD.



**Integrando o estímulo
à demanda em um mix
de políticas mais
amplas**

7

7. Integrando o estímulo à demanda em um mix de políticas mais amplas

Resumo do capítulo 7

As políticas de estímulo à demanda funcionam com maior eficiência quando integradas em estruturas abrangentes que englobam precificação de carbono, padrões de desempenho, medidas comerciais e arquitetura institucional. A precificação do carbono cria incentivos para a redução de emissões em toda a economia, porém enfrenta resistência política e incerteza de preços, o que limita sua eficácia para investimentos industriais de capital intensivos com períodos de retorno de várias décadas. Os contratos de carbono por diferença complementar a precificação, garantindo pisos de receita com base em referências do mercado de carbono. Essa complementaridade é essencial. Os instrumentos de estímulo à demanda podem fornecer certeza em nível de projeto, enquanto a precificação do carbono mantém incentivos marginais para melhoria contínua além das transições tecnológicas iniciais.

Padrões de desempenho também são importantes, pois estabelecem limites de intensidade de carbono do produto e criam segurança regulatória e mercados de conformidade. Quando implementados com trajetórias transparentes e decrescentes anunciadas com bastante antecedência, os padrões garantem visibilidade de planejamento que permite às empresas coordenar investimentos com confiança. Os ajustes de carbono na fronteira, teoricamente, previnem a fuga de carbono ao precificar as emissões incorporadas nas importações, protegendo os produtores nacionais da concorrência desleal e criando incentivos para que os fornecedores estrangeiros reduzam a intensidade de carbono.

Em consonância com a confiança pública e do mercado, as estruturas de governança são importantes para determinar a qualidade da implementação. Autoridades de programa dedicadas, com mandatos claros, expertise técnica e capacidade de coordenação interinstitucional, mostram-se mais eficazes do que arranjos para fins específicos. Considerações sobre equidade e transição justa devem ser incorporadas ao projeto do programa desde o início, incluindo a distribuição distribuída dos benefícios, o apoio à transição da força de trabalho e os acordos de benefícios comunitários que fortalecem a sustentabilidade política, garantindo, ao mesmo tempo, florestas compartilhadas. Esses processos de alocação transparentes e de divulgação de desempenho protegem contra a captura indevida, ao mesmo tempo que desenvolvem confiança pública.

7.1 Alinhamento com precificação, normas e comércio de carbono

As ferramentas de gestão da demanda e a precificação do carbono devem ser tratadas como complementares, e não como substitutas, porque os sinais de preço internalizam as externalidades, enquanto os contratos de demanda criam a certeza de receita necessária para desbloquear capital para usinas pioneiras e de uso intensivo de capital. Os contratos de carbono por diferença (CCfD) podem formalizar essa complementaridade, garantindo um preço de exercício para as emissões evitadas em relação a um valor de referência, ao mesmo tempo que permitem que o mercado de carbono forneça o preço de referência, estabilizando assim as receitas sem prejudicar o sinal mais amplo do limite máximo.

Em jurisdições de comércio de emissões, os CCfDs bilaterais que incorporam cláusulas de recuperação quando os preços das licenças excedem o preço de exercício reduzem o risco de projetos iniciais e limitam os ganhos inesperados, melhorando a legitimidade e a disciplina orçamentária para programas plurianuais. A escolha dos valores de referência não é trivial, uma vez que os valores de referência em nível de produto para clínquer de cimento, ferro-gusa e

hidrogênio introduzem diferentes propriedades de repasse e devem estar alinhados com medidas de fronteira ou rotulagem pública para evitar vazamentos e manipulação (FSR, 2025; IEA, 2025).

Padrões baseados em desempenho para carbono incorporado em concreto e aço permitem inovação em rotas de processo, garantindo que as declarações ambientais de produtos e os protocolos de verificação sejam robustos o suficiente para que compradores públicos e privados confiem neles. Regras de compras podem ser sobrepostas aos padrões de desempenho, estabelecendo limites decrescentes de carbono incorporado em licitações para edifícios, estradas e pontes, criando assim mercados iniciais que ancoram decisões de investimento em cimento e aço de baixa emissão, ao mesmo tempo que recompensam melhorias comprovadas ao longo do tempo (EPA, 2025; Bergman et al., 2023; White House CEQ, 2023).

A coordenação internacional é crucial, pois o aço e o cimento são comercializados globalmente e o apoio da demanda doméstica pode ser prejudicado pelas importações, a menos que os padrões, rótulos ou ajustes de fronteira sejam interoperáveis, transparentes e consistentes com as regras comerciais. A IEA propõe compromissos coletivos para participações de mercado próximas de zero e definições, certificação e compras públicas que agrupam a demanda além-fronteiras para reduzir os riscos de grandes investimentos em suprimentos, ao mesmo tempo que lidam com os riscos de excesso de capacidade. Lições de casos de integração bem-sucedidos mostram que os países que combinaram compras antecipadas com padrões de desempenho claros, medição robusta e infraestrutura de agrupamentos mobilizaram investimentos mais rapidamente do que aqueles que dependeram de subsídios fragmentados sem regras de mercado ou clareza de compra (IEA, 2025; OECD, 2019).

Os mecanismos de ajuste de carbono na fronteira fornecem proteção comercial essencial para programas domésticos de estímulo à demanda, ao mesmo tempo que estendem os sinais de precificação de carbono a fornecedores internacionais. O Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira da UE demonstra como as medidas comerciais podem complementar os programas domésticos de CCfD e de compras, precificando as emissões incorporadas nas importações para os setores abrangidos. Entretanto, a implementação do CBAM requer coordenação com programas domésticos para evitar dupla regulamentação, garantindo que as medidas de fronteira apoiem, em vez de prejudicar, os esforços de criação de mercado doméstico.

7.2 Governança e capacidade institucional

Uma política eficaz no lado da demanda requer instituições que combinem conhecimento técnico, econômico, jurídico e de contratação com inteligência de mercado e capacidades de engajamento das partes interessadas que as agências tradicionais de P&D muitas vezes não possuem. Compradores e agências públicas devem operacionalizar especificações baseadas em desempenho, contabilidade de carbono, avaliação do ciclo de vida, desenho de leilões e licitações, avaliação de risco de crédito e de contraparte e gestão de contratos de longo prazo para instrumentos como CCfDs e contratos antecipados de fornecimento.

Os facilitadores em nível de sistema incluem unidades de programa dedicadas, próximas às autoridades de compras ou agências econômicas, com mandatos claros e autoridade orçamentária, enquanto as agências técnicas contribuem com protocolos de medição e verificação, e os reguladores setoriais alinham normas e relatórios (OCDE, 2019). Uma autoridade de programa único deve ser fortemente considerada para deter a visão do portfólio em todos os instrumentos e etapas, com a responsabilidade de evitar conflitos, reduzir a carga administrativa para os candidatos e manter uma plataforma de dados unificada para elegibilidade, contratação e monitoramento.

Os comitês diretivos interinstitucionais devem aprovar os planos de compras anuais, concordar com definições de produtos compartilhadas e regras de EPD e sincronizar os calendários do programa com as chamadas de P&D, marcos de demonstração e investimentos em infraestrutura, enquanto as avaliações conjuntas de impacto aplicam métricas e contrafactuais comuns para apoiar a gestão adaptativa. A governança do programa deve equilibrar previsibilidade e flexibilidade, formalizando pontos de revisão e regras de atualização de parâmetros em contratos e regulamentos, de modo que os preços de exercício, os índices de referência e os limites sejam ajustados aos custos da tecnologia e às condições de mercado sem desestabilizar as expectativas dos investidores.

A transparência e a responsabilização são fundamentais para a legitimidade pública e incluem a publicação proativa dos critérios de aquisição, das justificativas de seleção, dos termos contratuais, dos dados de desempenho e dos resultados de recuperação de custos, com órgãos de avaliação independentes incumbidos de analisar a adicionalidade, a relação custo-benefício e os impactos na equidade em intervalos predefinidos. A durabilidade política exige a incorporação de programas em estruturas institucionais que possam resistir aos ciclos eleitorais, utilizando instrumentos bidirecionais que limitem os ganhos inesperados, estruturas orçamentárias plurianuais e a distribuição dos benefícios geograficamente e ao longo das cadeias de abastecimento através de um projeto competitivo, porém inclusivo.

7.3 Equidade e transição justa

Os mecanismos do lado da procura devem ser concebidos para estender os benefícios às comunidades desfavorecidas e apoiar os objetivos de uma transição justa, uma vez que a descarbonização industrial remodela os mercados de trabalho locais e as exposições ambientais de forma desigual. A justiça ambiental enfatiza o tratamento justo e o envolvimento significativo de todas as pessoas na tomada de decisões sobre políticas ambientais, enquanto a transição justa centra-se no trabalho decente, na proteção social e nos percursos de competências para os trabalhadores e comunidades afetados pela mudança estrutural.

Os contratos públicos e as estruturas de CCfD podem incluir disposições de benefícios locais, como desenvolvimento da força de trabalho, acordos de benefícios comunitários e regras de conteúdo local direcionadas a comunidades desfavorecidas, com orientações transparentes para a candidatura e resultados mensuráveis vinculados a cronogramas de pagamento. O envolvimento da comunidade deve ser processual e substancial, e não meramente consultivo, com participação significativa na definição das categorias de benefícios, critérios de elegibilidade e métricas de desempenho.

A integração do desenvolvimento da força de trabalho exige requisitos de aprendizagem, normas trabalhistas e caminhos de requalificação incorporados em contratos de fornecimento e aquisição, para que os projetos criem bons empregos locais e apoiem os trabalhadores



a fazer a transição das atividades baseadas em combustíveis fósseis.

A participação de pequenas empresas pode ser aumentada por meio de reservas de mercado, modelos de mentoria e assistência técnica que reduzam as barreiras de entrada nas cadeias de suprimentos de materiais verdes, enquanto sistemas comuns de dados e verificação reduzem os custos de conformidade para fornecedores menores.

A mensuração e a avaliação dos resultados de equidade devem acompanhar a criação de empregos desagregada por localização e características demográficas, a participação de pequenas empresas e empresas pertencentes a minorias, os multiplicadores econômicos locais e as melhorias na saúde ambiental, e esses indicadores devem orientar mudanças adaptativas nas regras do programa e nos critérios de aquisição ao longo do tempo. Os programas devem lidar com potenciais conflitos entre metas de equidade e rápida expansão, definindo metas realistas, fornecendo fundos para capacitação e requisitos de implementação gradual para acompanhar as capacidades dos fornecedores.

Referências do Capítulo 7

Bergman, A., Krupnick, A., Haerle, D., Bioret, L., Zhu, Y. and Shih, J. (2023) Demand-pull tools for innovation in the cement and iron and steel sectors. Washington DC: Resources for the Future.

EPA (2025) Labeling of construction materials and products. Washington DC: United States Environmental Protection Agency.


FSR (2025) Carbon contracts for difference: Integration with emissions trading systems. Florence: Florence School of Regulation.

IEA (2025) Demand and supply measures for the steel and cement transition: The case for international co-ordination. Paris: International Energy Agency.

OECD (2019) Innovation ecosystems in the bioeconomy: Policy alignment and coordination challenges. Paris: OECD Publishing.

White House Council on Environmental Quality (2023) Federal Buy Clean Initiative: Progress and path forward. Washington DC: Executive Office of the President.





**Roteiro e
sequência de
implementação**

8

8. Roteiro e sequência de implementação

Resumo do Capítulo 8

O cronograma e a sequência da política de demanda não podem ser negligenciados, pois a implementação prematura sem a infraestrutura fundamental leva ao fracasso do programa e à desilusão das partes interessadas. A lógica de implementação deve refletir princípios fundamentais: a mensuração precede os mercados, porque as políticas baseadas em desempenho não podem funcionar sem uma contabilização de carbono confiável; as instituições precedem os instrumentos, porque mecanismos sofisticados exigem capacidades administrativas que as agências tradicionais não possuem; e os projetos-piloto precedem os programas, porque a aquisição em estágio inicial gera aprendizado essencial sobre a prontidão dos fornecedores e os custos adicionais.

A estrutura básica da política progride por meio de três fases sequenciais, desencadeadas por indicadores objetivos de mercado, em vez de cronogramas predeterminados. A fase de construção de bases estabelece a infraestrutura de medição por meio de sistemas operacionais de Declaração Ambiental de Produto, desenvolve a capacidade institucional por meio de autoridades de programa dedicadas, aprimora a prontidão do comprador por meio de projetos-piloto de aquisição e valida tecnologias no Nível de Prontidão Tecnológica. ~7-8.

Em seguida, a fase de criação e expansão do mercado implementa a alocação competitiva de contratos de carbono, amplia as compras públicas com limites decrescentes de carbono incorporado, implementa padrões de desempenho em roteiros transparentes e coordena a infraestrutura de agrupamentos industriais. Finalmente, a fase de maturidade e transição do mercado reduz o apoio, ao mesmo tempo que torna os padrões e os preços do carbono mais rigorosos, estende os ajustes de fronteira quando apropriado e integra as compras verdes às compras de rotina.

As abordagens específicas para cada setor devem refletir características técnicas distintas. A implementação em cada setor é bem-sucedida quando o pacote de políticas é adaptado às suas fontes de emissões específicas e opções de redução.

8.1 Cronograma e sequência: De Nichos à Escala

O cronograma e a sequência emergem como fatores críticos para a implementação bem-sucedida de políticas de estímulo à demanda em setores de difícil redução de emissões. Subsídios iniciais para inovação criam nichos. Uma vez que as linhas piloto comprovem a viabilidade, as aquisições e os padrões criam mercados. À medida que a implantação aumenta, a precificação do carbono se torna mais rigorosa, eliminando gradualmente os processos de carbono residual. Oportunidades políticas, eleições, projetos de infraestrutura, negociações comerciais, tudo isso influencia e/ou dita quando tais medidas são viáveis. Intermediários monitoram as oportunidades e mobilizam coalizões, enquanto os conjuntos de políticas devem ser flexíveis o suficiente para aproveitá-las sem perder a consistência.

O roteiro de implementação reflete a evolução da demonstração de tecnologia à transformação do mercado por meio de três fases distintas, cada uma exigindo diferentes conjuntos de instrumentos e capacidades institucionais. As transições de fase devem ser desencadeadas por indicadores de mercado observáveis, em vez de cronogramas predeterminados, permitindo uma gestão adaptativa que responda ao desenvolvimento real da tecnologia e do mercado.

A Fase Um abrange a construção da base e a preparação do mercado, geralmente com duração de três a cinco anos. As fases iniciais devem priorizar pesquisas e projetos-piloto para ampliar o portfólio, com financiamento público baseado em marcos. Ao mesmo tempo, essas fases devem construir sistemas de medição e verificação, além de preparar o mercado para o mercado por meio de projetos-piloto de aquisição e desenvolvimento de normas. Este período concentra-se na remoção de barreiras técnicas, no desenvolvimento de capacidades institucionais e na criação da infraestrutura de medição necessária para os esforços subsequentes de criação de mercado.

Os sistemas de declaração ambiental de produtos e as regras de categoria de produto fornecem a base para a aquisição baseada em desempenho e a avaliação comparativa de CCfD. Capacidades de verificação por terceiros devem ser desenvolvidas para garantir uma contabilização de carbono confiável e uma concorrência justa entre os fornecedores.

A Fase Dois representa a criação e a expansão inicial do mercado, geralmente com duração de cinco a dez anos. A ação da fase intermediária deve priorizar a alocação competitiva de CCfDs e contratos de fornecimento vinculados a reduções de carbono verificadas, elevando os padrões de desempenho em um roteiro transparente e implantando infraestrutura em agrupamentos para reduzir os custos dos projetos e gerenciar as interdependências. Os mecanismos de alocação competitiva tornam-se essenciais à medida que os programas transitam de projetos-piloto para a criação de mercado sistemático. Os contratos de carbono por diferença (CCfD) proporcionam segurança de receita para investimentos de capital intensivo, mantendo a pressão competitiva para redução de custos e melhoria de desempenho. Os padrões de desempenho devem ser mais rigorosos, de acordo com cronogramas predeterminados que ofereçam visibilidade de planejamento aos fornecedores, mantendo os incentivos à melhoria.

A Fase Três marca a difusão do mercado e a transição do apoio, podendo se estender por décadas, à medida que os mercados atingem a plena maturidade. A política da fase final deve reduzir gradualmente o apoio unitário ao mesmo tempo em que reforça os padrões e os preços do carbono, estende os ajustes de fronteira ou o reconhecimento mútuo de rótulos, quando apropriado, e expande as compras públicas verdes para a demanda de mercado predominantemente, o que, em conjunto, apóia a difusão e a redução de custos sem subsídios excessivos. A transição do apoio requer uma gestão cuidadosa para evitar a ruptura do mercado, mantendo os incentivos à melhoria. Os programas CCfD podem transitar de preços de exercício garantidos para pagamentos de prêmios competitivos à medida que os mercados desenvolvem capacidades de descoberta de preços.

A transição entre as fases deve ser gerenciada por meio de critérios predeterminados e consulta às partes interessadas, em vez de cronogramas arbitrários. Indicadores de prontidão do mercado, incluindo diversidade de fornecedores, competitividade de custos e sustentabilidade da demanda, podem orientar as decisões de transição, enquanto revisões regulares do programa permitem correções de rumo e ajustes de parâmetros.

8.2 Primeiras medidas específicas do setor

A diversidade de trajetórias tecnológicas, estruturas de mercado e requisitos de políticas em setores de difícil descarbonização exige abordagens de implementação personalizadas que reflitam características setoriais específicas, mantendo a coerência dentro de estruturas políticas mais amplas.

As prioridades de implementação no setor siderúrgico devem se concentrar na criação de mercados iniciais para a redução direta baseada em hidrogênio por meio de mecanismos coordenados de estímulo à demanda. As primeiras medidas de prioridade devem começar com contratos de carbono por diferença que garantam fluxos de receita para projetos de redução direta baseados em hidrogênio,

mantendo a alocação competitiva para controlar os custos. Os preços de exercício devem ser calibrados para refletir o diferencial de custo entre a produção baseada em hidrogênio e a produção convencional, incorporando referências de preço do carbono. Os programas de compras públicas devem estabelecer limites de carbono incorporado para o aço usado em projetos de infraestrutura e construção governamentais, criando uma demanda inicial garantida. Padrões de desempenho para a intensidade de carbono do aço devem ser desenvolvidos por meio de consulta à indústria, estabelecendo limites decrescentes que proporcionem visibilidade ao planejamento dos fornecedores. A coordenação da infraestrutura deve se concentrar no fornecimento de hidrogênio e na disponibilidade de eletricidade renovável que permitam a descarbonizar o aço, atendendo simultaneamente a objetivos industriais mais amplos.

A implementação no setor de cimento deve abordar tanto as emissões do processo de calcinação do calcário quanto as emissões de energia dos fornos de alta temperatura por meio de abordagens diversificadas. As prioridades imediatas devem estabelecer programas de compras para concreto de baixo carbono que especifiquem intensidades máximas de carbono incorporado, permitindo a competição entre abordagens alternativas, incluindo a substituição do clínquer, químicas alternativas de cimento e captura de carbono. Os contratos de carbono por diferença para cimento devem se concentrar em projetos de captura e armazenamento de carbono que possam alcançar reduções substanciais de emissões a partir da capacidade de produção existente. O desenvolvimento de químicas alternativas de cimento deve ser apoiado por meio de financiamento direcionado para pesquisa e demonstração, juntamente com o desenvolvimento de caminhos regulatórios. O desenvolvimento de normas deve se concentrar na contabilização do carbono ao longo do ciclo de vida, que capture as emissões de processo e de energia, acomodando diversas abordagens de produção.

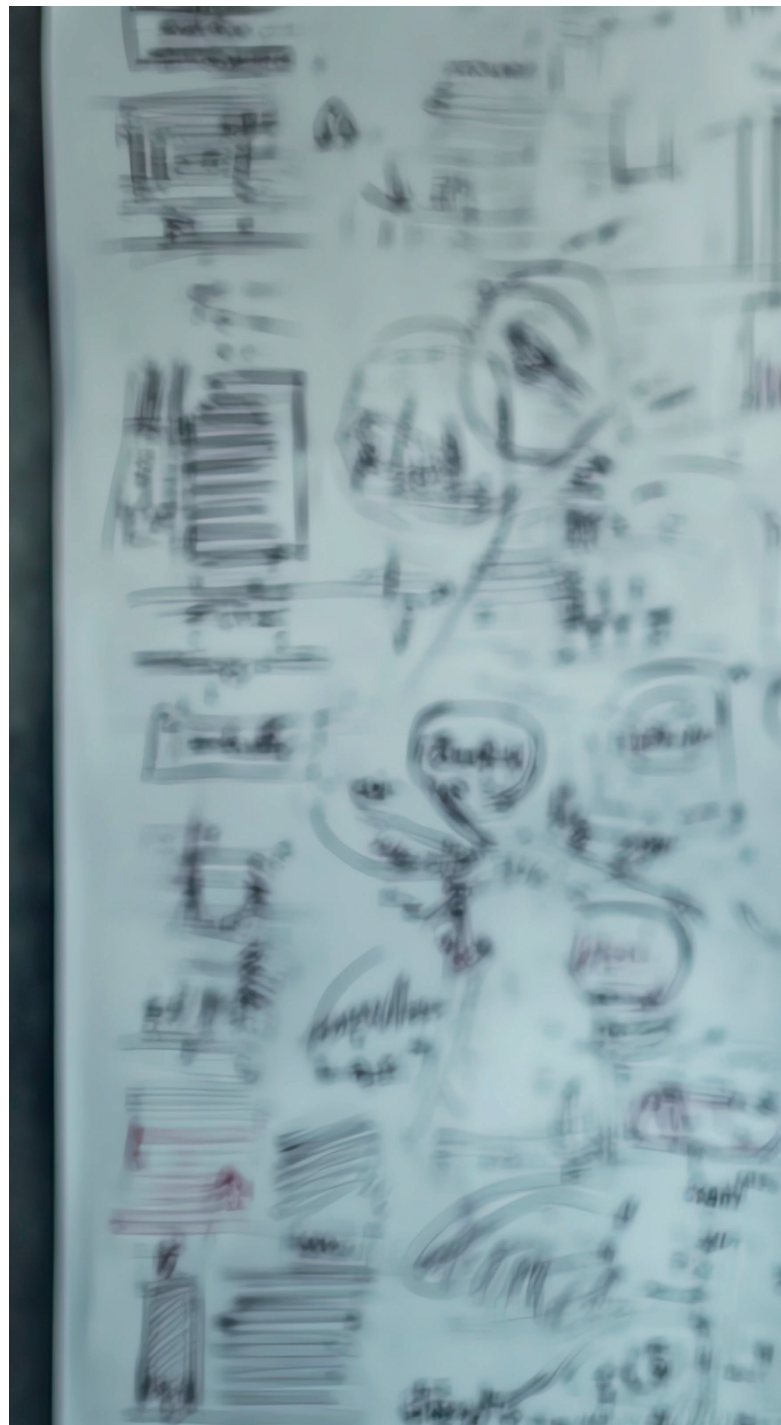
As prioridades do setor de alumínio devem alavancar a intensidade de eletricidade do setor e a infraestrutura de reciclagem já estabelecida. As primeiras medidas devem priorizar contratos de compra de energia (PPAs) de longo prazo para eletricidade renovável, que permitam às fundições atingir baixa intensidade de carbono. Os sistemas de rotulagem e certificação de produtos devem diferenciar o alumínio com base na intensidade de carbono da produção, permitindo que os compradores recompensem a produção de baixo carbono. O desenvolvimento da tecnologia de ânodos inertes deve ser apoiado por meio de financiamento para demonstrações e incentivos à implantação antecipada. O desenvolvimento do mercado secundário de alumínio deve ser apoiado por meio de iniciativas na cadeia de suprimentos que aumentem a coleta de sucata e as capacidades de processamento.

A implementação no setor de aviação deve levar em consideração os requisitos de densidade energética, as estruturas de governança internacional e a longa vida útil dos ativos. A implementação deve começar com mandatos de mistura que criem demanda previsível por combustíveis de aviação sustentáveis, ao mesmo tempo que ofereçam flexibilidade para múltiplas vias de produção. Os créditos fiscais para a produção de combustível de aviação sustentável devem recompensar o desempenho em termos de intensidade de carbono, em vez de vias de produção específicas. Os compromissos de mercado antecipados devem agregar a demanda entre companhias aéreas e compradores corporativos, ao mesmo tempo que proporcionam certeza de receita para o investimento em capacidade de produção de SAF. O desenvolvimento de infraestrutura deve se concentrar nas capacidades de armazenamento, mistura e controle de qualidade nos principais centros de aviação.

As prioridades do transporte marítimo e de cargas pesadas exigem a abordagem da governança internacional para o transporte marítimo e dos requisitos de infraestrutura para o transporte rodoviário. As prioridades do setor de transporte marítimo devem se concentrar no desenvolvimento de corredores verdes que coordenem o fornecimento

de combustível, a infraestrutura portuária e a aquisição de embarcações nas principais rotas comerciais. A implementação do transporte rodoviário de cargas pesadas deve priorizar programas de aquisição de frotas que criem demanda inicial por veículos com emissão zero, ao mesmo tempo que apóiam o desenvolvimento da infraestrutura de recarga e abastecimento. O desenvolvimento de combustíveis alternativos para ambos os setores deve ser apoiado por meio de compromissos antecipados de mercado que proporcionem segurança de receita para a produção de amônia e hidrogênio verdes.

Essas abordagens específicas para cada setor demonstram que, embora os mecanismos de estímulo à demanda compartilhem princípios de projeto comuns, sua aplicação deve ser adaptada às características técnicas específicas, às estruturas de mercado e aos contextos institucionais de cada setor. O sucesso requer a implantação coordenada de instrumentos complementares, sequenciados para criar mercados iniciais protegidos que impulsionem as curvas de aprendizado e reduções de custos, preservando a dinâmica competitiva. O roteiro de implementação fornece uma estrutura para gerenciar essa complexidade, mantendo a coerência entre os setores e os domínios de políticas.



Referências do Capítulo 8

Buznitsky, K., Verma, S. & Nitzsche, M. P. (2024) Decarbonizing industry: Policy approaches to eliminate hard-to-abate emissions. MIT Science Policy Review, 5, 58-70.

Global Efficiency Intelligence (2022) Steel climate impact: International benchmarking of energy and CO2 intensities. GEI Research Report.

ICAO (2024) Environmental trends in aviation to 2050. Montreal: International Civil Aviation Organization.

IEA (2023b) Aluminium – analysis and forecast to 2050. Paris.
IEA (2023), Steel and aluminium, IEA, Paris [https:// www.iea.org/reports/steel-and-aluminium](https://www.iea.org/reports/steel-and-aluminium), Licence: CC BY 4.0.

U.S. Department of Transportation (2024) Decarbonizing U.S. transportation: Report to Congress. Washington, DC., Published Date: 2024-07-01 DOI: <https://doi.org/10.21949/1530685>.

van der Loos, A., Elzinga, R., Negro, S. and Hekkert, M. (2024) The rise of technological innovation systems in sustainability transitions. Cambridge Open Engage. doi: 10.33774/coe-2024-t859z.



9. Teoria da mudança e quadro geral

Resumo do Capítulo 9

A transformação de setores de difícil descarbonização é um desafio sem precedentes e uma oportunidade crucial para alcançar as metas climáticas globais e a criação de mercado. Esses setores geram aproximadamente 40% das emissões industriais globais, mas exigem um investimento de capital estimado em US\$ 30 trilhões até 2050, com quase 70% necessários antes de 2040. O orçamento de carbono cada vez mais restrito para limitar o aquecimento global e os longos ciclos de investimento na indústria pesada deixam pouca margem para atrasos ou medidas paliativas.

Mecanismos de estímulo à demanda bem projetados demonstraram capacidade de mobilizar essa necessidade de capital, impulsionando reduções de custos por meio de aprendizado e efeitos de escala, quando implementados e integrados adequadamente em estruturas políticas mais amplas. Contratos de carbono por diferença, compras públicas com limites de carbono incorporado e compromissos de mercado avançados abordam falhas de mercado específicas, operando com maior eficácia em combinação do que isoladamente.

A implementação exige o equilíbrio de múltiplos objetivos concorrentes. Os programas devem fornecer certeza de receita suficiente para atrair investimentos, mantendo, ao mesmo tempo, uma dinâmica competitiva que impulsiona a inovação e a redução de custos. As estruturas contratuais devem incorporar pagamentos bilaterais e pontos de análise predeterminados, permitindo a adaptação sem comprometer a confiança dos investidores. Estruturas robustas de medição e avaliação são indispensáveis para acompanhar o progresso e permitir uma gestão responsiva.

Recomendamos que os formuladores de políticas aproveitem as lições aprendidas com implementações pioneiras, incluindo o programa pioneiro alemão CCfD, o mecanismo de importação de hidrogênio da H2Global, a abordagem integrada da cadeia de valor da HYBRIT e as iniciativas de compras em nível estadual, adaptando, ao mesmo tempo, as abordagens aos contextos locais, às capacidades institucionais e às condições de mercado.

A transformação do mercado exige um compromisso político sustentado, conjuntos de políticas coordenadas e um engajamento contínuo das partes interessadas que mantenha a licença social ao longo dos ciclos eleitorais.

9. Teoria da mudança

A análise apresentada demonstra que as políticas de estímulo à demanda representam instrumentos essenciais para acelerar a descarbonização industrial em setores de difícil descarbonização. Esses setores – aço, cimento, alumínio, produtos químicos, aviação, transporte marítimo e caminhões pesados – geram coletivamente aproximadamente 40% das emissões industriais globais e enfrentam barreiras técnicas e econômicas únicas que as políticas de pressão da oferta, por si só, não conseguem superar. As evidências das primeiras implementações revelam que mecanismos de estímulo à demanda bem projetados podem mobilizar os US\$ 30 trilhões estimados em capital privado, necessário para a transformação industrial até 2050, impulsionando reduções de custos por meio de aprendizado e efeitos de escala.

Políticas de estímulo à demanda bem-sucedidas exigem atenção ao projeto dos instrumentos, alinhamento com o mercado e integração em estruturas políticas mais amplas. Contratos de carbono por diferença (CCfD), compras públicas com limites de carbono incorporado e compromissos de mercado avançados abordam falhas de mercado específicas, operando com maior eficácia em conjunto. Os estudos de caso do programa CCfD da Alemanha, do mecanismo de importação de hidrogênio da H2Global, da abordagem integrada da cadeia de valor da HYBRIT e das iniciativas Buy Clean em nível estadual demonstram que esses instrumentos podem criar mercados viáveis para produtos industriais de baixo carbono quando projetados e implementados adequadamente.

Nossa análise gera considerações críticas de projeto. Os programas devem equilibrar a neutralidade tecnológica com o direcionamento estratégico, proporcionando certeza de receita suficiente para atrair investimentos, mantendo, ao mesmo tempo, uma dinâmica competitiva que impulsiona a inovação e a redução de custos. As estruturas contratuais devem incorporar mecanismos de pagamento bidirecionais e pontos de revisão predeterminados que permitam a adaptação sem comprometer a confiança dos investidores. A alocação competitiva por meio de leilões e solicitações de propostas estruturadas pode revelar os custos reais, garantindo também a disciplina fiscal. Estruturas robustas de medição e avaliação são essenciais para acompanhar o progresso e viabilizar a gestão adaptativa.

A integração de mecanismos de estímulo à demanda em ecossistemas de políticas mais amplas determina sua eficácia. Esses instrumentos devem complementar, e não substituir, a precificação de carbono, os padrões de desempenho e as medidas comerciais. As estruturas de governança exigem conhecimento técnico especializado, coordenação interinstitucional e capacidade de engajamento das partes interessadas, algo que as agências tradicionais podem não possuir. Considerações de equidade e objetivos de transição justa devem ser incorporados ao desenho do programa para garantir que os benefícios da transformação industrial sejam distribuídos de forma justa entre as comunidades e os trabalhadores.

O roteiro de implementação demonstra que a implantação bem-sucedida requer uma sequência cuidadosa em três fases: construção da base, criação inicial de mercado e difusão do mercado. Cada fase exige diferentes combinações de instrumentos e capacidades institucionais, com transições desencadeadas por indicadores de mercado observáveis, em vez de cronogramas predeterminados. As abordagens específicas do setor devem refletir as características técnicas distintas, as estruturas de mercado e os requisitos políticos de cada setor, mantendo a coerência dentro de estratégias mais amplas de descarbonização.

A urgência dos objetivos climáticos exige uma rápida expansão das políticas de estímulo à demanda em todas as jurisdições e setores. O orçamento de carbono cada vez mais restrito para o aquecimento de 1,5 °C e os longos ciclos de investimento na indústria pesada deixam pouca margem para atrasos. Os formuladores de políticas devem ir além dos programas-piloto e partir para a criação sistemática de mercado, aproveitando as lições das implementações iniciais e adaptando as abordagens aos contextos e capacidades locais.

A transformação de setores de difícil descarbonização representa tanto um desafio sem precedentes quanto uma oportunidade crucial para alcançar as metas climáticas globais. Políticas de estímulo à demanda fornecem as ferramentas para superar a lacuna de comercialização enfrentada pelas tecnologias de baixo carbono, convertendo a prontidão técnica em oportunidades de investimento viáveis na escala e velocidade necessárias.

Tabela 9.1: Estrutura geral para implementação de políticas de estímulo à demanda

Fase	Ações Primárias	Instrumentos Chave	Integração com Políticas Existentes	Resultados Esperados	Gatilhos da Transição
Fase 1: Fundação e Preparação	Estabelecer infraestrutura de MRV e sistemas EPD	Desenvolvimento de normas, capacidade de verificação	Basear-se nas regulamentações ambientais existentes, alinhar-se com metas climáticas	Medição confiável, dados transparentes, confiança do comprador	Sistemas EPD operacionais, capacidade de verificação estabelecida
	Desenvolver regras e normas para categorias de produtos	Especificações técnicas, protocolos de certificação	Harmonizar com a segurança do produto, códigos de construção, normas do setor	Especificações claras, prontidão para o mercado, concorrência justa	Consenso da indústria sobre normas, protocolos de medição validados
	Construir capacidade institucional e estruturas de governança	Mandatos de agências, coordenação interministerial	Alavancar agências de energia, órgãos de desenvolvimento industrial	Capacidade administrativa, implementação coordenada	Agências com pessoal suficiente, mecanismos de coordenação funcionando
	Lançar projetos-piloto de aquisição e programas de prontidão do comprador	Especificações baseadas em desempenho, contratos de pequena escala	Alinhar-se com orçamentos de obras públicas, planos de infraestrutura	Sinais iniciais de demanda, engajamento de fornecedores, aprendizado	Projetos-piloto concluídos, lições documentadas
	Realizar demonstrações de P&D do portfólio	Subvenções, financiamento por eventos, apoio à demonstração	Coordenar com programas de P&D, fundos de inovação	Validação de tecnologia, dados de custo, redução de risco	Tecnologias Em TRL 7-8, desempenho validado
Fase 2: Criação e Expansão do Mercado	Alocação competitiva de CCfD p/ Projetos de Capital Intensivo	Contratos de Carbono por Diferença	Integrar com a precificação de carbono (ETS, imposto sobre carbono), eliminação gradual da alocação gratuita	Projetos financiáveis, aprendizado prático, redução de custos	Diversificação de fornecedores em ascensão, dados de custos disponíveis
	Ampliar as compras públicas com base em limites de carbono incorporado	Mandatos de compras verdes	Coordenar com normas de construção e orçamentos de infraestrutura.	Mercados iniciais estáveis, compromissos de volume, expansão dos fornecedores	A profundidade do mercado aumenta, tornando viável a seleção competitiva.
	Implantar infraestrutura em agrupamentos industriais	Infraestrutura compartilhada, redes de hidrogênio, transporte de CO2	Alinhar-se com planos de infraestrutura energética e estratégia industrial.	Redução de custos por meio de ativos compartilhados e benefícios de coordenação	Investimentos em infraestrutura confirmados, inquilinos âncora garantidos
	Implementar padrões de desempenho em roteiros transparentes.	Limites de intensidade de carbono em declínio	Camada complement no topo do preço de carbono existente	Transformação em todo o mercado, incentivos à inovação	Mercados de conformidade estão se formando, mecanismos de fiscalização prontos.
	Estabelecer programas AMC para tecnologias emergentes	Compromissos antecipados de mercado, contratos de fornecimento	Links com política de inovação e agências de crédito à exportação	Certeza de receita, mobilização de capital privado	Capacidade de produção em expansão, cadeias de suprimentos se formando.
Fase 3: Consolidação e transição do mercado	Reduzir suporte à unidade durante o aperto das normas	Normas de desempenho, precificação de carbono	Integração completa com a precificação de carbono e normas regulatórias.	Mercados competitivos, subsídios reduzidos	Diminuição das diferenças de custos (prêmio de 20%), maior densidade de mercado
	Reforço da precificação do carbono e ajustes nas fronteiras.	Integração CBAM, esquemas de reconhecimento mútuo	Alinhamento com política comercial e acordos climáticos internacionais	Condições de concorrência equitativas, prevenção de fugas de carbon	Aumento dos preços do carbono, alinhamento de estruturas internacionais
	Transição para compras públicas verdes importantes	Critérios ecológicos obrigatórios em obras públicas	Incorporar às regras de aquisição padrão	Normalização do mercado, convergência de custos	Produtos verdes com preços competitivos e ampla aceitação por parte dos compradores.
	Habilitar mecanismos de descoberta de preços orientados pelo Mercado	Mercados competitivos, prêmios voluntários	Transição para mecanismos baseados no Mercado	Mercados autossustentáveis, prêmios privados	Múltiplos fornecedores competindo, descoberta de preços robusta
	Eliminar gradualmente os subsídios diretos para tecnologias consolidadas.	Cláusulas Sunset (extinção gradual), mecanismos de transição	Alinhar-se com metas de neutralidade climática de longo prazo.	Maturidade do mercado, gradatividade das políticas	Tecnologias com custos competitivos, sem preocupações com aditivos.

9.1 Estrutura geral para implementação de políticas de estímulo à demanda

Apresentamos uma estrutura geral para a implementação de políticas de estímulo à demanda em setores de difícil descarbonização, delineando quais ações devem vir primeiro, por que elas são priorizadas em sequência e como a estrutura se relaciona com as arquiteturas de políticas existentes. A estrutura foi projetada para ser aplicável em diversos contextos nacionais, reconhecendo que a implementação específica exigirá adaptação às condições institucionais, fiscais e de mercado locais, e é melhor utilizada como orientação e princípios.

9.1.1 A lógica da sequência: Por que a ordem importa

A sequência de políticas é crucial para instrumentos de estímulo à demanda, pois a implementação prematura de mecanismos de criação de mercado sem infraestrutura fundamental leva ao fracasso do programa, desperdício fiscal e desilusão das partes interessadas, o que prejudica os esforços futuros. Três requisitos interconectados orientam a lógica da sequência.

1. A mensuração precede os mercados. Políticas de estímulo à demanda recompensam o desempenho, porém

o desempenho não pode ser recompensado sem mensuração confiável. Declarações Ambientais de Produto (EPDs), regras de categoria de produto, protocolos de verificação e capacidade de certificação por terceiros devem estar operacionais antes que os contratos de aquisição possam especificar limites de carbono incorporado ou que os Contratos de Carbono por Diferença (CCD) possam calcular a redução verificada. Países que lançaram programas de aquisição antes de estabelecer infraestrutura de mensuração enfrentaram disputas, manipulação e suspensão de programas. O investimento fundamental em sistemas de mensuração, de relatórios e verificação (MRV) gera retornos em todos os instrumentos subsequentes.

- As instituições precedem os instrumentos. Mecanismos sofisticados de estímulo à demanda, incluindo Contratos de Financiamento por Diferença (CCfDs), Compromissos Antecipados de Mercado e leilões competitivos exigem capacidades administrativas que as agências tradicionais de P&D normalmente não possuem. A gestão de contratos, a avaliação de risco de crédito, o compromisso fiscal de longo prazo, a coordenação interinstitucional e o engajamento de múltiplas partes interessadas exigem unidades de programa dedicadas com mandatos claros e recursos adequados. A tentativa de implementar instrumentos complexos por meio de acordos específicos ou agências sobrecarregadas leva a atrasos, aplicação inconsistente e captura por interesses estabelecidos

- O desenvolvimento da capacidade institucional durante a fase de fundação garante a credibilidade do programa e a confiança das partes interessadas.
- Os projetos-piloto precedem os programas. Os projetos-piloto de aquisição em estágio inicial geram aprendizados críticos sobre a prontidão dos fornecedores, a praticidade das especificações, os custos adicionais e os procedimentos administrativos que não podem ser obtidos apenas por meio de análises. Os projetos-piloto revelam barreiras imprevistas, permitem o refinamento iterativo dos parâmetros do programa e criam bases de apoio para iniciativas de maior escala. Países que passaram diretamente para programas em larga escala sem projetos-piloto enfrentaram estouros de orçamento, protestos de fornecedores e reações políticas negativas. Projetos-piloto estruturados, com objetivos de aprendizado explícitos e pontos de revisão predeterminados, maximizam a geração de conhecimento e, ao mesmo tempo, limitam a exposição fiscal.

9.1.2 Estrutura de implementação e ações prioritárias

A estrutura de implementação é apresentada em três fases sequenciais. Cada fase especifica as ações principais, os instrumentos-chave, os requisitos de integração, os resultados esperados e os gatilhos de transição objetivos. Essas fases progridem da Fundação e Preparação, passando pela Criação e Escala de Mercado, até a Maturidade e Transição de Mercado.

Fase 1: Fundação e preparação (anos 0-3+)

A primeira fase, de fundação, estabelece as pré-condições para a criação eficaz de mercado por meio de cinco fluxos de trabalho paralelos que criam infraestrutura de medição, capacidade institucional e prontidão de mercado. São sugeridas ações prioritárias para cada tema:

- Infraestrutura de medição e verificação. Desenvolver sistemas de Declaração Ambiental de Produto com regras de categoria de produto para cimento, aço, alumínio e produtos químicos; instituir capacidade de verificação por terceiros por meio de laboratórios acreditados e organismos de certificação; implementar plataformas digitais de MRV (Monitoramento, Relatório e Verificação) para coleta e relato transparentes de dados; e harmonizar metodologias com normas internacionais, incluindo ISO 14040/44, EN 15804 e protocolos específicos do setor. Essa infraestrutura serve a todos os instrumentos subsequentes de estímulo à demanda, ao mesmo tempo que permite padrões baseados em desempenho e iniciativas do setor privado.
- Desenvolvimento de normas e especificações. Convocar comitês técnicos multissetoriais para desenvolver referências de intensidade de carbono em produtos; estabelecer modelos de especificação baseados em desempenho para compras públicas; definir roteiros de limiares decrescentes que proporcionem visibilidade ao planejamento do fornecedor; e alinhar as normas com os códigos de construção, regulamentos de segurança de produtos e estruturas de garantia de qualidade. Os padrões devem equilibrar ambição com viabilidade, evitando tanto a imagem verde falsa (greenwashing) quanto a exclusão de mercado.
- Capacidade institucional e governança. Estabelecer uma autoridade programática dedicada com mandato abrangendo compras, administração de CCfD e coordenação de padrões; criar comitês diretivos interinstitucionais que conectem os ministérios da indústria, energia, clima e finanças; desenvolver competências da equipe em contabilidade de carbono, gestão de contratos e elaboração de leilões; e criar mecanismos de engajamento das partes interessadas que incluam a indústria, o setor trabalhista, ONGs e comunidades desfavorecidas. As estruturas de governança devem incorporar transparência,

responsabilidade e análise periódica.

- Projetos-piloto de compras e prontidão do comprador. Lançar programas de compras em pequena escala para materiais de baixo carbono em projetos de infraestrutura governamentais; desenvolver a capacidade da agência em especificar, verificar e comprar com base no carbono incorporado; documentar as lições aprendidas por meio de protocolos de avaliação por evidência estruturados; e construir o engajamento do fornecedor por meio de divulgação, assistência técnica e mecanismos de feedback. Os projetos-piloto devem testar diversas abordagens, incluindo prêmios baseados no orçamento, qualificação baseada em limites e compensações entre preço e qualidade.
- P&D e demonstração de portfólio. Financiar diversas vias tecnológicas por meio de subsídios baseados em marcos; apoiar demonstrações pioneiras que gerem dados de custo e desempenho; coordenar o setor de P&D com o planejamento de infraestrutura para abordar interdependências; e construir plataformas de compartilhamento de conhecimento para disseminar lições aprendidas. Os programas de P&D devem manter a amplitude do portfólio, ao mesmo tempo que começam a concentrar recursos em abordagens que demonstrem potencial de implementação.

A transição da Fase 1 para a Fase 2 deve ser desencadeada por critérios objetivos, em vez de cronogramas predeterminados.

Especificamente:

- Sistemas para Declarações Ambientais de Produtos operacionais com dados verificados dos principais produtores.
- Padrões de consenso adotados com aceitação da indústria.
- Autoridade de programa dedicada, com equipe completa e em funcionamento, com capacidade comprovada.
- Projetos-piloto concluídos com lições aprendidas documentadas e disponíveis para análise.
- Projetos de demonstração validados no Nível de Prontidão Tecnológica 7 ou 8, com dados de desempenho confirmados.

Fase 2: Criação e expansão de mercado (anos 3-10+)

A fase de criação de mercado implementa instrumentos competitivos em larga escala para mobilizar capital privado, impulsionar curvas de aprendizado e estabelecer cadeias de suprimentos viáveis. As principais ações relacionadas a cada tópico estão listadas:

- Contratos de carbono por diferença (CCfDs). Lançar rodadas competitivas de alocação para redução de emissões com uso intensivo de capital, incluindo aço à base de hidrogênio, cimento com captura de carbono e produtos químicos verdes; elaborar contratos com prazos de 10 a 20 anos, pagamentos bilaterais e preços de exercício referenciados aos mercados de carbono; alocar contratos por meio de leilões reversos ou solicitações de propostas (RFPs) estruturadas que recompensem a relação custo-benefício, garantindo a viabilidade da entrega; e estabelecer protocolos de monitoramento que verifiquem o desempenho e acionem os pagamentos. Os CCfDs são mais eficazes quando combinados com uma precificação de carbono funcional que forneça preços de referência e complemento, em vez de substituir, os sinais de mercado.
- Compras públicas em escala. Expandir os programas de compras para abranger as principais categorias de infraestrutura, incluindo edifícios, estradas e sistemas de transporte; definir limites de carbono incorporado que diminuam de acordo com roteiros transparentes; coordenar entre países para agregar volumes e reduzir a incerteza do fornecedor; e manter licitações competitivas que recompensem a inovação, garantindo também a disponibilidade de fornecedores qualificados. A aquisição é mais escalável quando integrada às normas de construção e aos orçamentos de infraestrutura.
- Infraestrutura de agrupamentos industriais. Implantar infraestrutura compartilhada em zonas industriais designadas.

Tabela 9.1: Quadro geral de integração e coordenação de políticas de estímulo à demanda

Domínio da política	Motivações para a Integração	Sinergias com o Estímulo à Demanda	Desafios da Integração	Mecanismos de Coordenação
Precificação do Carbono (ETS, Imposto sobre carbono):	Internalizar externalidades de carbono, criar um sinal de preço de referência	Os CCfDs complementam a precificação de carbono, garantindo receita mínima	A volatilidade dos preços do carbono gera incerteza na receita dos projetos	Vincular os preços de exercício dos CCfDs a referências de preços de carbono
	Gerar receita para o financiamento de programas de precificação por demanda	Os CCfDs bidirecionais permitem a recuperação de valores quando os preços do carbono excedem o preço de exercício	Resistência política à precificação de carbono em algumas jurisdições	Usar a receita da precificação de carbono para financiar programas de precificação por demanda
	Fornecer preço de referência para os cálculos de preço de exercício	O aumento dos preços do carbono reduz o custo fiscal do apoio à precificação por demanda	Risco de dupla compensação sem a devida coordenação	Estabelecer coordenação interinstitucional no alinhamento de preços e apoio
Desempenho, Normas e Regulamentação:	Estabelecer limites mínimos de desempenho em todos os mercados	As normas criam uma demanda previsível de conformidade para produtos de baixo carbono	O desenvolvimento de normas está atrasado em relação à inovação tecnológica	Desenvolver normas por meio de processos com múltiplas partes interessadas
	Criar mercados de conformidade para tecnologias de baixo carbono	As aquisições podem exceder as normas para impulsionar ainda mais a inovação	Normas excessivamente prescritivas podem excluir alternativas melhores	Alinhar limites de aquisição com roteiros regulatórios
	Viabilizar especificações de aquisição baseadas em desempenho	Sistemas MRV comuns atendem tanto a normas quanto a programas estímulo à demanda	A capacidade de fiscalização varia entre jurisdições	Criar infraestrutura MRV comum para todos os programas
Política de comércio e Ajuste de fronteira:	Prevenir vazamento de carbono do apoio doméstico à demanda	O CBAM protege as aquisições domésticas e os investimentos em CCfD	Preocupações com conformidade com a OMC em relação a medidas comerciais discriminatórias	Harmonizar a contabilidade de carbono de produtos com parceiros comerciais
	Estender a precificação de carbono às importações em setores abrangidos	A certificação harmonizada reduz as barreiras comerciais para produtos apoiados	Complexidade da contabilidade de emissões incorporadas além-fronteiras	Estabelecer acordos de reconhecimento mútuo para certificação
	Criar condições equitativas para produtores nacionais	A coordenação internacional amplia a criação de mercado além-fronteiras	Tensões políticas sobre restrições comerciais	Coordenar medidas de fronteira com o cronograma de apoio doméstico
Estratégia e Inovação Industrial:	Alinhar P&D pública com as prioridades de implantação de demanda	A P&D gera tecnologias prontas para ampliação de escala por demanda	Descompassos de cronograma entre P&D e prontidão do mercado	Criar conselhos de inovação que conectem P&D e agências de implantação
	Coordenar Instrumentos de estímulo à oferta e à demanda	A demanda fornece a demanda de mercado necessária para inovações de estímulo à oferta	Falhas de coordenação entre diferentes agências governamentais	Estabelecer comitês diretos interinstitucionais com mandatos claros
	Apoiar o desenvolvimento e a competitividade da cadeia de valor nacional	Um conjunto coordenado de políticas aborda todo o ciclo de inovação	Risco de apoiar tecnologias sem viabilidade de mercado	Sincronizar os calendários dos programas e os ciclos de revisão
Investimento em Infraestrutura:	Viabilizar a implantação de tecnologia por meio de ativos compartilhados	A infraestrutura compartilhada reduz os riscos do projeto para os beneficiários do CCfD	Longos prazos para o desenvolvimento de infraestrutura	Desenvolver planos de infraestrutura integrados com responsabilidades definidas
	Coordenar a infraestrutura de hidrogênio, CO2 e eletricidade	O investimento em infraestrutura pública complementa a implantação privada	Fragmentação regulatória entre jurisdições	Estabelecer veículos de propósito específico para infraestrutura compartilhada
	Reduzir os custos por projeto por meio de abordagens de cluster	Os mecanismos de coordenação de cluster se alinham à governança de demanda	Falhas de coordenação quando vários atores precisam investir simultaneamente	Criar ambientes regulatórios experimentais para demonstrações coordenadas
Transição e Equidade justos	Garantir a distribuição justa dos benefícios da transição	As aquisições podem incluir contratação local e benefícios para a comunidade	Potenciais conflitos entre os objetivos de velocidade e equidade	Incorporar critérios de equidade em todos os processos de concepção de programas
	Apoiar trabalhadores e comunidades nas regiões afetadas	Os CCfDs podem incorporar normas trabalhistas e requisitos de treinamento	Complexidade administrativa dos requisitos de benefícios	Estabelecer mecanismos de engajamento comunitário com autoridade vinculativa
	Desenvolver aceitação social para a transformação industrial	O apoio local visa comunidades desfavorecidas	Risco de captura por interesses estabelecidos	Criar órgãos de supervisão com representação equitativa

incluindo produção e distribuição de hidrogênio, redes de transporte e armazenamento de CO₂, interconexões de eletricidade renovável e sistemas de monitoramento digital; estabelecer veículos de propósito específico ou parcerias público-privadas com governança e alocação de riscos claras; coordenar o cronograma de infraestrutura com os investimentos em instalações de produção para gerenciar o dilema “do ovo e da galinha”; e projetar estruturas de acesso aberto que impeçam a monopolização, garantindo, ao mesmo tempo, a recuperação de custos. Também é importante considerar abordagens de agrupamentos para reduzir os custos por projeto e ajudar a viabilizar os benefícios da coordenação.

- D. Padrões de desempenho e divulgação obrigatória. Implementar padrões de intensidade de carbono decrescentes para os setores abrangidos, com aplicação gradual; exigir Declarações Ambientais de Produto para os principais materiais em transações comerciais; Definir penalidades para casos de descumprimento, juntamente com assistência técnica para pequenos produtores; e alinhar normas com os limites de aquisição para criar sinais consistentes.

Os padrões criam uma transformação em todo o mercado, além dos primeiros adotantes, preservando a flexibilidade de inovação por meio de abordagens baseadas em desempenho.

- E. Avançar os compromissos de mercado. Iniciar programas de AMC para tecnologias emergentes,

incluindo combustíveis de aviação sustentáveis, combustíveis marítimos verdes e novas composições químicas de cimento; comprometer-se a comprar volumes específicos em termos pré-acordados quando os critérios de desempenho forem atendidos; projetar desembolsos escalonados que gerenciem o risco de contraparte, mantendo os incentivos do fornecedor; e coordenar com os compradores para agregar volumes. Os AMCs são eficazes para mercados nascentes, onde as discrepâncias temporais entre o investimento do fornecedor e o compromisso do comprador impedem o desenvolvimento.

A integração com as políticas existentes durante a Fase 2 é essencial, pois vários instrumentos irão interagir. Por exemplo, os Contratos de Carbono por Diferença devem fazer referência aos sistemas de precificação de carbono para evitar dupla compensação, os programas de aquisição devem ser coordenados com os orçamentos de infraestrutura e regulamentos de construção, e os padrões de desempenho devem ser adicionados aos regulamentos de produtos existentes. Todos os instrumentos devem estar alinhados com as políticas comerciais para gerenciar as preocupações com a competitividade.

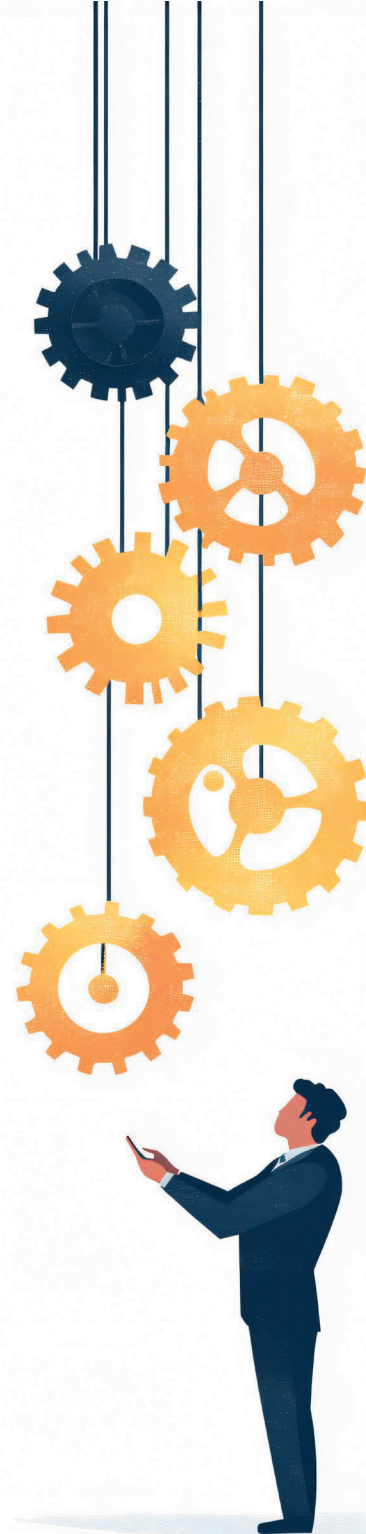
A transição da Fase 2 para a Fase 3 deve ser desencadeada por indicadores de desenvolvimento do mercado. Incluindo:

- Surgimento da diversidade de fornecedores com múltiplos produtores qualificados competindo
- Redução das diferenças de custo (prêmio inferior a 20%) em relação às alternativas convencionais
- Aumento da densidade de mercado com processos de seleção competitivos viáveis.
- Formação de mercados de conformidade em torno de padrões de desempenho com fiscalização eficaz.
- Estabelecimento de padrões de aquisição estáveis nas cadeias de suprimentos, demonstrando sustentabilidade.

Fase 3: Maturidade e transição do mercado (anos 10+)

À medida que as tecnologias atingem a competitividade, a fase de maturidade do mercado transita do apoio direto aos mecanismos baseados no mercado.

- Apoiar a redução gradual e a transição das políticas. Incluir a redução dos níveis de apoio por unidade à medida que as curvas de aprendizado progredem; fazer a transição de preços de exercício garantidos para leilões competitivos com prêmios; aplicar disposições de extinção para tecnologias consolidadas, com critérios de saída predeterminados; e continuar o apoio a inovações disruptivas que ainda enfrentam lacunas de comercialização.
A redução gradual deve equilibrar a disciplina fiscal com a manutenção da confiança do investimento por meio de mecanismos de ajuste transparentes e previsíveis.
- Fortalecer a precificação e o comércio de carbono. Ajustar os níveis de preço do carbono por meio de reduções de licenças ou aumento de impostos; eliminar gradualmente a alocação gratuita para indústrias apoiadas à medida que a produção doméstica se torna competitiva em termos de custos; iniciar ou fortalecer os mecanismos de ajuste de carbono na fronteira para evitar vazamentos; e criar acordos de reconhecimento mútuo para a contabilização de carbono com os principais parceiros comerciais. Os sinais de preço influenciam cada vez mais o comportamento à medida que as diferenças de custo diminuem e a infraestrutura de mercado amadurece.
- Compras verdes predominantemente. Integrar critérios de carbono incorporado às regras padrão de compras em todas as agências governamentais; reduzir/eliminar suplementos orçamentários para materiais de baixo carbono à medida que a convergência de custos ocorre; expandir as compras verdes obrigatórias para governos subnacionais e empresas estatais; e viabilizar a adoção pelo setor privado por meio de padrões voluntários e compromissos corporativos de sustentabilidade. Transição de compra da criação de mercado para a manutenção de mercado.
- Mecanismos baseados no mercado e descoberta de preços. Criar mercados secundários para créditos ou certificados de desempenho; viabilizar transações voluntárias entre compradores e vendedores além dos requisitos obrigatórios; desenvolver produtos financeiros, incluindo títulos verdes e papéis vinculados à sustentabilidade referenciados à intensidade de carbono do material; e apoiar a descoberta transparente de preços por meio de relatórios públicos e plataformas de mercado. Os mecanismos de mercado assumem o papel de principais impulsionadores assim que liquidez e participação suficientes forem alcançadas.



9.2 Principais impulsionadores, sinergias e desafios de coordenação

Conforme estabelecido neste relatório, a integração eficaz de políticas exige abordar tanto as sinergias que amplificam a eficácia dos instrumentos quanto os desafios que impedem a coordenação. Superar esses desafios exige não apenas melhorias no projeto técnico, mas também inovações institucionais, incluindo mandatos de coordenação interinstitucional, métricas de desempenho compartilhadas, processos orçamentários integrados e liderança política que sustente a coordenação ao longo dos ciclos eleitorais. Com base nesses três pilares, resumimos os pontos principais:

- Sinergias-chave entre as áreas de políticas públicas
 - Os CCfDs e a precificação do carbono criam mecanismos complementares de certeza, com os CCfDs fornecendo metas de

- certeza, com os CCfDs fornecendo metas mínimas de receita, enquanto a precificação do carbono estabelece metas mínimas de custo para emissões
- b. aquisição e normas criam sinais de mercado alinhados, com a aquisição demonstrando a viabilidade, enquanto normas impulsionam a difusão
 - c. investimentos em infraestrutura e apoio à demanda permitem compromissos recíprocos, com a infraestrutura reduzindo os riscos do projeto, enquanto o estímulo à demanda garante a utilização da infraestrutura
 - d. Programas de P&D e implantação criam ciclos contínuos de inovação, com a P&D gerando opções, enquanto a implantação fornece feedback ao mercado
- B. Desafios persistentes de coordenação
- a. descompassos de cronograma entre instrumentos projetados por diferentes agências com calendários separados
 - b. conflitos de objetivos entre agências econômicas focadas em eficiência e ministérios sociais focados em equidade,
 - c. assimetrias de informação entre agências que impedem a compreensão compartilhada das interações do programa,
 - d. dinâmicas da economia política onde beneficiários concentrados de políticas existentes resistem à integração que redistribui rendas.
- C. Dinâmicas da economia política onde beneficiários concentrados de políticas existentes resistem à integração que redistribui rendas
- a. comitês diretivos interinstitucionais formais com poder de decisão, em vez de meramente funções consultivas
 - b. plataformas de dados comuns e infraestrutura de MRV (Monitoramento, Relato e Verificação) que permitem a mensuração consistente em todos os programas
 - c. calendários de programa e ciclos de análise sintonizados que alinham o calendário de ajuste do instrumento
 - d. estruturas de avaliação conjunta que avaliam o desempenho do conjunto de políticas, em vez de instrumentos individuais de planejamento fiscal integrado que coordena receitas e despesas entre precificação de carbono, programas de apoio e investimento em infraestrutura.
- A. Aprimoramento iterativo. Os parâmetros do programa, incluindo a rigidez dos limites, a duração do contrato, os volumes de alocação e os critérios de elegibilidade, devem ser ajustados em pontos de revisão predeterminados com base em indicadores de desenvolvimento de mercado, evolução de custos e resultados de avaliação. Os processos de revisão devem equilibrar previsibilidade e flexibilidade, estabelecendo critérios claros para ajustes, mantendo os principais compromissos do programa.
- B. Engajamento das partes interessadas. O diálogo contínuo com a indústria, o setor trabalhista, a sociedade civil e as comunidades locais traz à tona as barreiras à implementação, constrói apoio político e possibilita melhorias responsivas no projeto. O engajamento deve ser significativo, e não meramente consultivo, e deve incluir mecanismos para que as partes interessadas contribuam com suas opiniões para influenciar as decisões do programa.
- C. Geração e disseminação de conhecimentos. A avaliação sistemática do programa gera lições que orientam as fases subsequentes, ao mesmo tempo que contribui para o conhecimento global sobre a eficácia das políticas de estímulo à demanda. A avaliação deve examinar não apenas os resultados em termos de emissões e custos, mas também os efeitos da inovação, os impactos na equidade e o aprendizado institucional. Plataformas internacionais de compartilhamento de conhecimento permitirão que os países aprendam com as experiências de outros.
- D. Gestão da economia política. Sustentar programas de incentivo à demanda ao longo dos ciclos políticos exige a construção de amplas coalizões que incluam beneficiários da indústria, do movimento trabalhista, das comunidades e de grupos de ambientalistas. O projeto de programa transparente, a alocação competitiva e os benefícios colaterais visíveis ajudam a manter a licença social, ao mesmo tempo que limitam os riscos de apropriação indevida.

9.3 Implementação e aprendizagem adaptativas

Como mencionado anteriormente, a estrutura aqui apresentada deve ser entendida como uma orientação direcional, e não como um projeto final prescritivo. A implementação eficaz requer gestão adaptativa que responda às condições específicas do contexto e às evidências emergentes.

A gestão de mudanças torna-se importante com os seguintes pontos de atenção:



Livro base

Este relatório está baseado no livro *Designing Demand-Pull Policy for Hard to Abate Sectors*, autor Thomas A. Kwan, a ser publicado pelo Routledge, Taylor & Frances Group em 2026 (com permissão)

Aviso legal

O conteúdo desta publicação é apresentado apenas para fins informativos e, embora tenham sido feitos esforços para garantir sua precisão, não deve ser interpretado como garantia de qualquer tipo, expressa ou implícita. Esta publicação não deve ser utilizada como base para aconselhamento de investimento ou outras decisões estratégicas.

As premissas, modelos e conclusões apresentados nesta publicação representam um cenário possível e dependem inerentemente de muitos fatores fora do controle de qualquer empresa, incluindo, entre outros, ações governamentais, evolução das condições climáticas, considerações geopolíticas e mudanças tecnológicas. Os cenários e modelos não devem ser interpretados como projeções ou previsões para o futuro e não representam a estratégia ou o plano de negócios da Schneider Electric.

O logotipo da Schneider Electric é uma marca registrada e marca de serviço da Schneider Electric SE. Quaisquer outras marcas permanecem propriedade de seus respectivos proprietários.

Autores

Thomas Alan Kwan, Vice-Presidente Global de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais, do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Vincent Petit, Vice-Presidente Sênior de Pesquisa em Transição Climática e Energética, chefe do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às seguintes pessoas por seus valiosos insights, revisão dos primeiros rascunhos e envolvimento ativo no desenvolvimento e melhoria de nosso trabalho e colaboração com o MDIC do Brasil:

Gustavo Saboia Fontenele e Silva, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Luiz Camargo De Miranda

Leonardo Belvino Póvoa, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Demetrio Florentino de Toledo Filho, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Jorge Luis Ferreira Boeira, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

Karolina Gutiez, Schneider Electric

Fabrizio Sardelli Panzi, Amcham Brasil

André Luis Ribeiro Barbosa, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Juliana Tamanaha, Ministério dos Transportes


George Yun, Ministério dos Transportes

Isabella Scorzelli, E+

Simone Klein, E+

Rosana dos Santos, E+

Juliana Klas, UFRGS

Schneider
 Electric

Schneider Electric™
Instituto de pesquisa em sustentabilidade

Estratégias para transformação sustentável no lado da demanda

Insights da Pesquisa do SRI

com o apoio do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio do Brasil



Avanços no Diálogo e Pesquisa para Atingir as Ambições do Brasil

Prefácio

O Brasil está entrando em uma década decisiva, na qual a transformação da nossa economia e indústrias deve avançar em sintonia com as ambições climáticas globais. À medida que buscamos o desenvolvimento sustentável e a modernização econômica, reconhecemos que a política industrial deve antecipar tecnologias emergentes, responder à dinâmica de mercado em evolução e abraçar o imperativo do gerenciamento ambiental.

O Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) tem trabalhado para promover uma transformação industrial que fortaleça a competitividade das empresas brasileiras, alinhando-se à transição internacional para economias líquidas de carbono zero. Nosso país possui vantagens exclusivas: uma matriz energética predominantemente renovável, vasto potencial em hidrogênio verde, recursos naturais abundantes e uma base industrial dinâmica. Também protegemos a Amazônia e outros ecossistemas essenciais para a estabilidade climática global e a biodiversidade.

Este relatório contribui para o diálogo nacional, oferecendo novos insights sobre estratégias no lado da demanda para a descarbonização e sobre caminhos para a construção de ecossistemas industriais inovadores. Sua análise aprofunda a discussão sobre como a indústria pode se tornar um fator de inovação, circularidade e resiliência na trajetória de desenvolvimento do Brasil. Com a COP30 se aproximando em nosso próprio território, estamos determinados a apresentar um Brasil que lidera pelo exemplo — não apenas preservando suas riquezas naturais, mas também transformando seu modelo produtivo para gerar valor por meio da sustentabilidade.

O caminho a seguir exige colaboração entre governo, universidades, indústrias e a sociedade. Requer abordagens baseadas em evidências que conciliem competitividade com responsabilidade climática. No MDIC, continuamos comprometidos em orientar essa transição e garantir que ela promova crescimento inclusivo, liderança tecnológica e transformação industrial.

O Brasil está pronto para enfrentar esse desafio com ambição e propósito. As perspectivas apresentadas neste relatório enriquecem o esforço coletivo para moldar as estratégias, parcerias e ações necessárias para proporcionar um futuro sustentável e próspero para todos os brasileiros.

Julia Cortez da Cunha Cruz
Secretária Nacional de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria
Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC)
Brasília, Brasil



Apresentação do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric

Prefácio

A conscientização global por um mundo mais inclusivo e com impacto positivo no clima está em alta. Isso inclui as emissões de carbono, bem como a prevenção de danos ambientais e de perda da biodiversidade. Estados-nação e corporações estão cada vez mais assumindo compromissos climáticos e incluindo temas de sustentabilidade em sua governança. Entretanto, o progresso está longe de onde deveria estar. Para que a sociedade global alcance esses objetivos, são necessários mais ação e rapidez.

Como podemos transformar esse movimento em realidade? Alinhando a ação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas e alavancando a pesquisa científica e a tecnologia. Obtendo uma melhor compreensão do futuro da energia e da indústria, e das mudanças sociais, ambientais, tecnológicas e geopolíticas que ocorrem ao nosso redor. Reforçando os motivadores legislativos e financeiros que podem gerar mais ações. E sendo claro sobre o que os setores público e privado podem fazer para que tudo isso aconteça.

A missão do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ é examinar fatos, questões e possibilidades, analisar contextos locais e entender o que empresas, a sociedades e governos podem e devem fazer mais. Nosso objetivo é compreender as tendências atuais e futuras que afetam o cenário energético, empresarial e comportamental para antecipar desafios e oportunidades. Por meio dessa perspectiva, contribuimos com insights diferenciados e práticos.

Montamos nosso trabalho com base em intercâmbios regulares com especialistas institucionais, acadêmicos e de pesquisa, colaborando com estes em projetos de pesquisa quando relevante. Nossas descobertas estão disponíveis online publicamente e nossos especialistas participam regularmente de fóruns para compartilhar seus insights.

Fundada em 2020, nossa equipe faz parte da Schneider Electric, líder em transformação digital, em gestão e automação de energia, cujo objetivo é unir progresso e sustentabilidade para todos.

Neste artigo oferecemos novos insights sobre as oportunidades existentes para a descarbonização das indústrias, bem como o papel que acreditamos que as indústrias devem desempenhar na transformação mais ampla de nossas economias, em direção a um mundo e sistema energético sustentáveis. Após uma breve introdução à mecânica subestimada das transições energéticas, este relatório compartilha as descobertas coletadas em exercícios de cenários anteriores que realizamos em diversas regiões, antes de oferecer insights sobre a descarbonização das indústrias, bem como sobre o papel que vemos o setor industrial desempenhar na transformação mais ampla de nossas economias.

Rafael Segrera – Presidente da zona América do Sul, da Schneider Electric

Vincent Petit, Vice-Presidente Sênior de Pesquisa em Transição Climática e Energética, chefe do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade, da Schneider Electric™

Thomas Kwan, Vice-Presidente Global de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais, do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade, da Schneider Electric™



Resumo executivo



Resumo executivo

À medida que o Brasil busca suas ambiciosas metas de alcançar o status de país de alta renda e cumprir seus compromissos climáticos, o país enfrenta um conjunto complexo de desafios e oportunidades. Fundamental para esse esforço é a necessidade de uma transição energética abrangente e específica ao contexto, que esteja alinhada aos recursos, prioridades e objetivos únicos do Brasil.

O Brasil também está em uma posição vantajosa para aproveitar os benefícios da ação climática devido ao seu fornecimento de energia de baixo carbono, potencial de energia renovável e às oportunidades únicas apresentadas pela mudança no uso da terra e pelo perfil de emissões da agricultura, que difere de outros países cujas emissões são dominadas por sistemas energéticos e industriais.

Acolhemos, neste contexto, o pedido de apoio do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços do Brasil e sua confiança, e compartilhamos neste relatório uma seleção de insights sobre a Transição Energética que o Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ desenvolveu nos últimos anos.

A Parte 1 apresenta uma seleção de insights sobre pesquisas acadêmicas em transições energéticas, com base em uma extensa análise da literatura.

A Parte 2 compartilha a experiência da Schneider Electric em relação a cenários e principais insights de outros trabalhos regionais conduzidos pelo Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™.

A Parte 3 aprofunda-se na descarbonização da indústria, com foco principal no potencial de eletrificação industrial e na competitividade, com base em nossa pesquisa mais recente.

A Parte 4 amplia o horizonte da descarbonização industrial para tendências emergentes no desenvolvimento do setor e analisa implicações potencialmente importantes para o desenvolvimento de uma política industrial robusta.

A Parte 5 conclui e sugere próximos passos para a colaboração.



Índice

Prefácio	3	Parte 4	
Resumo executivo	4		
Índice	6		
Listagem de Figuras e Tabelas	7	Construção no século 21	28
		Uma indústria circular	29
Parte 1		Sinergias e circularidade no Setor de Construção	29
Insights de transições passadas e futuras da energia	8	Insights técnicos: Redução do carbono incorporado e outros impactos	29
		Novas indústrias	34
Parte 2		Parte 5	
Uma nova abordagem para a transição da energia	12	Cenário estratégico	36
Cenários globais para uma economia Net Zero	13	Próximos passos	37
Insights regionais sobre a evolução da demanda	14	Referências	38
Insights regionais da evolução da demanda e da oferta de eletricidade	14	Aviso Legal	44
Insights regionais sobre o papel do hidrogênio	15	Autores	45
Insights regionais sobre as emissões de CO ₂	16		
Insights regionais sobre a evolução da demanda	16		
Parte 3			
Descarbonização da indústria	18		
O potencial da eletrificação direta é maior do que é considerado em geral	19		
Estudo de Caso: E-Amônia	20		
Estudo de Caso: Aço Verde	23		
Considerações globais	27		

Lista de figuras e

Figuras

Figura 2.1: Cenários de meados do século focados em transformações impulsionadas pela demanda	13
Figura 2.2: Intensificadores de descarbonização em um cenário de emissões líquidas zero até 2050	13
Figura 2.3: Mudanças na demanda de mobilidade em três regiões	14
Figura 2.4: Mudanças na demanda da construção civil em três regiões	14
Figura 2.5: Mudanças na demanda industrial em três regiões	14
Figura 2.6: Evolução da demanda por eletricidade em três regiões	15
Figura 2.7: Evolução da matriz energética de oferta de eletricidade em três regiões	15
Figura 2.8: Produção de hidrogênio em três regiões	16
Figura 2.9: Cascata de emissões do setor de transportes em três regiões	16
Figura 2.10: Cascata de emissões da construção civil em três regiões	17
Figura 2.11: Cascata de emissões da indústria em três regiões	17
Figura 3.1: Potencial rápido para eletrificação direta nas indústrias	19
Figura 3.2: Impactos de custo de descarbonização para os consumidores da indústria	19
Figura 3.3: Custo da rede elétrica versus custo nivelado da produção de e-amônia	20
Figura 3.4: Detalhamento do custo da e-amônia	21
Figura 3.5: Fatores de emissão da rede elétrica versus intensidade potencial de carbono da e-amônia	22
Figura 3.6: Preços de mercado versus custo modelado de produção de aço verde	24
Figura 3.7: Detalhamento dos custos de produção do aço verde	25
Figura 3.8: Detalhamento do CAPEX do aço verde	25
Figura 3.9: Emissões de gases do efeito estufa da produção de aço verde versus intensidade de emissão da rede elétrica	25
Figura 3.10: Perspectiva da IRENA para o custo de produção de hidrogênio até 2050	26
Figura 3.11: Aumento dos preços do gás natural na Califórnia	27
Figura 4.1: Resumo da mudança de impacto em edifício inteiro devido a estratégias de mitigação circulares	31
Figura 4.2: Economia anual na conta de energia, por tipo de edifício, idade e região	32
Figura 4.3: Potencial de criação de empregos a partir da transição para edifícios descarbonizados	33

Tabelas

Tabela 1: Comparação das reduções de impacto alcançadas por meio de diferentes estratégias circulares com 30% de implementação em edifícios residenciais e não residenciais.	31
--	----

1 Insights de transições energéticas passadas e futuras



Insights de transições energéticas passadas e futuras

Houve transições energéticas no passado, que, em sua maioria não foram planejadas e ocorreram como um conjunto complexo de eventos (Rhodes, 2018; Smil, 2017).

Elas “emergiram” do complexo entrelaçamento de transformações endógenas de estruturas locais e de agências (comportamentos), bem como de fatores exógenos como inovação, escassez (por exemplo, o esgotamento da madeira no Reino Unido nos séculos XVII e XVIII que impulsionou a transição para o uso de carvão), questões ambientais (por exemplo, a mudança de fogões a carvão para gás natural no Reino Unido após a Segunda Guerra Mundial) e mudanças geopolíticas (por exemplo, o aumento da atividade econômica transatlântica na segunda metade do século XIX) (Geels, 2002; Martínez Arranz, 2017; Rhodes, 2018; Smil, 2017). Na verdade, embora o termo geralmente se refira a transições “grandes” ou “radicais”, na prática elas têm sido frequentemente o resultado de uma miríade de transições menores, que em sua maioria passaram despercebidas (Sovacool, 2016).

Tais transições também devem continuar no futuro. Dado o tempo necessário para que os avanços da pesquisa amadureçam e se expandam, pode-se argumentar que a maioria dos blocos de construção tecnológicos que definirão o cenário da inovação energética até meados do século já são conhecidos. Entretanto, a forma como esses blocos se transformarão em transições energéticas ou não e, em caso afirmativo, em que ritmo e em que medida, permanece extremamente incerto (e pouco compreendido). Algumas dessas transições podem ser menores (ou seja, incrementais), enquanto outras podem ser verdadeiramente radicais ou disruptivas (Fuenfschilling & Binz, 2018; Petit, 2021; Wilson & Tyfield, 2018).

Há uma grande necessidade de entender como essas mudanças podem se desenrolar, por pelo menos dois motivos. A primeira delas é a do papel fundamental da energia (e dos recursos naturais) na economia. Embora a abordagem econômica neoclássica tenha geralmente negligenciado seu papel, dada sua limitada contribuição direta ao PIB (Jefferson, 2014), tornou-se claro, ao longo de muitas crises energéticas, que a energia é mais do que apenas um meio para um fim, e que o crescimento econômico sustentável e o desenvolvimento dependem em grande parte de um fluxo de energia resiliente, acessível e eficiente, com muitos economistas agora estudando isso com maior profundidade (Foxon, 2011; Jefferson, 2014). Ayres e Warr (2005) sugerem, notavelmente, que a eficiência na conversão e no uso de recursos energéticos é um fator-chave para o crescimento econômico, juntamente com (e talvez até antes de) a produtividade do capital e do trabalho. Em outras palavras, tornar o sistema energético mais eficiente é uma prioridade fundamental para a criação de riqueza. Atualmente, a ineficiência é de 60% (LLNL, 2022) e chega a ultrapassar 80% quando se consideram as medições de termodinâmica e energia (Ayres, 2001; Serrenho et al., 2014; Serrenho et al., 2016). A eficiência energética, portanto, desempenha um papel importante, mas ainda mais importante são as melhorias nos processos em direção aos limites termodinâmicos, onde existe um potencial considerável, principalmente com a eletrificação (Petit, 2023).

O segundo motivo é, obviamente, a mudança climática. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) estima que as atividades humanas levaram a um aumento da temperatura do planeta de 1,1 grau desde 1850, com cenários para o final deste século variando de 1,5 a 4,4 graus de aumento, o que causaria (no cenário mais otimista)

consequências devastadoras (se todas as promessas e metas até o momento fossem cumpridas, o aumento da temperatura chegaria a 1,9-2,1 graus) (Climate Action Tracker, 2022).

A energia é responsável por cerca de 75% das emissões globais de gases do efeito estufa (ClimateWatch, 2022) e está no cerne dessa ameaça existencial.

A intensidade de carbono da economia diminuiu 45% desde 2000 em relação ao PIB, impulsionada principalmente pela rotatividade de ações, uma maior contribuição dos serviços para o PIB global e uma redução de 15% na intensidade de carbono da geração de eletricidade. Enquanto isso, as intensidades de carbono do uso de energia na indústria, mobilidade e edifícios, na verdade, estagnaram (com base em dados da Agência Internacional de Energia) (OCDE/IEA, 2017, 2022). Isso também levou alguns a concluir que o desacoplamento “absoluto” era, em última análise, improvável (Heun & Brockway, 2019). Mais importante ainda, lacunas significativas no acesso à energia (a intensidade energética per capita na Índia e na África é de 6 a 10 vezes menor do que na Europa ou nos Estados Unidos), no desenvolvimento (os quilômetros percorridos por ano na África são de 12 a 30 vezes menores; a área construída é de 3 a 5 vezes menor) e o recurso duradouro à biomassa nas economias emergentes representam questões essenciais para o futuro (OCDE/IEA, 2013; Nações Unidas, 2022; Banco Mundial, 2022). A maioria dos modelos continua a imaginar um mundo onde, em meados do século, as economias emergentes continuarão a ficar para trás em relação às economias consolidadas (e até mesmo uma lacuna maior de riqueza em relação à atual) (Poblete-Cazenave et al., 2021; UNEP, 2019), mas nada poderia ser mais incerto, e isso levanta a questão fundamental de saber se uma transição energética sustentável pode ser acelerada (e se as abordagens definidas para conduzir as transições são de fato apropriadas) (Hansen et al., 2018; Rubio & Folchi, 2012).

O paradigma tradicional na pesquisa é estudar a energia como um sistema, composto por estoques e fluxos físicos (recursos) e financeiros entre nações (Araújo, 2014; Jefferson, 2014; Truffer et al., 2012). Em grande medida, nosso atual sistema energético baseado em combustíveis fósseis consiste em mover recursos de um lugar para outro. Entretanto, e como é abordado em detalhes no estudo das transições sociotécnicas (Geels, 2010; Geels & Schot, 2007; Kemp et al., 2007; Kern & Rogge, 2018; Köhler et al., 2018; Loorbach & Rotmans, 2006; Rotmans et al., 2001; Schot & Kanger, 2018; Sovacool & Hess, 2017), ou nos estudos de energias raras (Grubler et al., 2018; Li et al., 2015; Sovacool, 2014), entender como uma transição energética “radical” poderia se desenrolar requer estudar a energia em relação aos serviços que ela fornece à sociedade. Isso sugere que o sistema energético é mais do que um sistema (de estoques e fluxos), mas sim a complexa estratificação (ou espinha dorsal) de uma variedade de usos (ou serviços) de energia em uma multiplicidade de sistemas sociotécnicos, dentro de uma variedade de geografias com diferentes padrões ambientais, econômicos, tecnológicos, institucionais e culturais. A energia alimenta os serviços, e a inovação na prestação desses serviços não é apenas produto de novos recursos e infraestrutura energética, mas também de avanços tecnológicos e de modelos de negócios adjacentes. Afinal, não estávamos enviando e-mails há 30 anos! Em última análise, essas inovações podem substituir um serviço existente, proporcionando uma experiência aprimorada ou acesso mais fácil a ele (por exemplo, a um custo menor), mas também podem fornecer novos serviços que ainda não existem. Essas inovações também podem ser incrementais ou radicais (Wilson & Tyfield, 2018). E, à medida que se desenvolvem, inevitavelmente impactam a demanda de energia de maneiras que muitas vezes são difíceis de prever a princípio. Smil (2017) também argumenta que:

“No que diz respeito aos combustíveis, a história teria tomado um rumo diferente se o carvão tivesse sido usado meramente como substituto da lenha em lareiras abertas, ou se o petróleo bruto tivesse permanecido limitado ao querosene para iluminação. Na maioria dos casos, não foi o acesso a recursos energéticos abundantes ou a motores primários específicos que fez a diferença a longo prazo. Os fatores decisivos foram, então, a busca por inovação e o compromisso com a implantação e o aperfeiçoamento de novos recursos e técnicas, bem como a descoberta de novas aplicações”.

Seguindo essa linha de raciocínio, considerar as transições energéticas simplesmente como uma mudança de “sistema” impediria, portanto, a compreensão dos mecanismos reais em jogo e representaria uma falha cognitiva que teria de ser superada para que a transição fosse acelerada de forma ordenada.

Mais importante ainda, é fundamental definir os limites dos estudos sobre transições energéticas. Há seis tópicos a serem analisados. Primeiro, a definição da transição energética em questão. Qual sistema está sendo explorado? Trata-se de um sistema energético como um todo? O sistema é energético em relação a um setor específico sob mudança de regime? Será uma combinação de várias transições inter-relacionadas em diferentes setores? Nesse caso, a questão é como essa transição está sendo estudada: do ponto de vista da introdução gradual de novas fontes de energia, da eliminação gradual de recursos energéticos existentes (por exemplo, combustíveis fósseis) ou de uma transformação maior (por exemplo, reconfiguração de todo o sistema) (Geels et al., 2017; McMeekin et al., 2019)?

Em segundo lugar, as transições não se materializam da mesma forma em diferentes níveis do sistema energético. Por exemplo, as transições de pequenas tecnologias “granulares” (por exemplo, no lado da demanda) tendem a se materializar mais rapidamente do que grandes programas de infraestrutura (Sovacool, 2016; Wilson et al., 2020). Entretanto, isso também significa que o que acontece do lado da demanda pode ser limitado (ou acelerado) pela infraestrutura existente, o que também é chamado de dependências de trajetória ou mecanismos de aprisionamento.

Os serviços digitais só surgiram depois que a espinha dorsal da internet foi implantada. Os mecanismos de aprisionamento também não se restringem à infraestrutura, abrangendo também uma variedade de aspectos organizacionais, socioculturais, institucionais, econômicos e legais (Clausen et al., 2017; Eising et al., 2014; Geels et al., 2018; Hoppmann et al., 2014; Ivanova et al., 2018; Klitkou et al., 2015; Roberts & Geels, 2019; Seto et al., 2016).

Na verdade, e esta é uma terceira dimensão de análise, as transições não se resumem apenas a mudanças tecnológicas. Elas envolvem o complexo desvinculamento e o reenvolvimento de uma variedade de normas institucionais e culturais, juntamente com um equilíbrio de poder diferente entre os atores (Demski et al., 2015; Mattioli et al., 2020; Noppers et al., 2015; Noppers et al., 2014; Noppers et al., 2016; Stephenson et al., 2015; Unruh, 2000). A narrativa da transição (a ideia ou perspectiva imaginária do futuro que é compartilhada coletivamente) também desempenha um papel fundamental, negligenciado (mas muito presente) nas conversas contemporâneas (Smith et al., 2017).

Em quarto lugar, e complementando o ponto anterior, embora tenha havido muita atenção voltada para o papel dos consumidores na transição dentro da pesquisa acadêmica (o que já representa uma melhoria em comparação com a estrutura institucional atual que favorece as interações entre governo e infraestrutura, por exemplo, o lado da oferta), também ficou claro que os consumidores têm liberdade limitada para mudar. Sua “motivação” para mudar é amplamente prejudicada por sua “capacidade” de mudar (Mattauch et al., 2016; Wiedenhofer et al., 2018). Na prática, os comportamentos do consumidor são determinados por rotinas e hábitos (por exemplo, dirigir para o trabalho) que são em grande parte inevitáveis (Røpke, 2009; Shove & Walker, 2014). As rotinas, em vez dos comportamentos, são, portanto, uma dimensão fundamental na qual se deve concentrar para realizar transformações em larga escala.



Em quinto lugar, também está claro que as transições de um tipo de serviço para outro melhor envolvem efeitos rebote significativos, que em muitos casos podem compensar 50% do ganho inicial. Isso foi amplamente documentado, principalmente, para medidas de eficiência energética, o que leva à alegação de que tais medidas são, na verdade, caras e ineficientes. Uma coisa é certa, no entanto, que os efeitos de rebote são um desenvolvimento natural da criação de riqueza e que qualquer abordagem de longo prazo para a transição energética deve levar em conta esses efeitos, o que raramente acontece nos cenários energéticos contemporâneos (Brockway et al., 2021; Geels et al., 2018).

Por último, as transições também devem ser consideradas sob a perspectiva de uma variedade de atores: governos, consumidores, empresas de infraestrutura, indústria, a sociedade em geral (por exemplo, ONGs, sindicatos) e a variedade de grupos que eles formam, que têm suas próprias dinâmicas e operam dentro de uma estrutura institucional e cultural específica. Na maioria das linhas de pesquisa acadêmica, o papel da indústria é relativamente negligenciado. Isso é verdade para a pesquisa de sistemas energéticos, que basicamente ignora a atuação das indústrias, sejam elas empresas estabelecidas ou atores de nicho (Hekkert et al., 2007; Reike et al., 2022; Trotter & Brophy, 2022; Vroon et al., 2022). Isso também se aplica às transições sociotécnicas, onde é uma questão reconhecida (Geels et al., 2018; Turnheim & Geels, 2019), e muitas vezes está ausente nas teorias de políticas públicas (Edmondson et al., 2020; Roberts & Geels, 2019; Rotmans et al., 2001), apesar do foco no trabalho institucional que esses agentes podem desempenhar.

Tentativas de preencher essa lacuna na pesquisa começaram a surgir. Janda e Parag (2013), por exemplo, juntamente com outros (Janda et al., 2019; Parag & Janda, 2014; Simpson et al., 2020), sugeriram o papel crucial que a indústria pode desempenhar como um agente “intermediário” nas transições. Essa categoria de atores demonstra uma capacidade significativa tanto de influenciar outros atores (“a jusante”, “a montante”, “lateralmente”), quanto de “viabilizar”, “mediar” e “agregar” inovações em futuros modelos dominantes, que, por sua vez, constituem as escolhas básicas disponíveis para consumo (Suarez et al., 2015)..

Entretanto, a indústria também enfrenta uma complexa responsabilidade. Seu papel enganoso em promover a transição tem sido frequentemente apresentado como uma barreira fundamental para acelerar essa transição (Oreskes & Conway, 2011; Zarazua de Rubens et al., 2018). Ao mesmo tempo, essas indústrias também estão sujeitas a uma crescente pressão por mudanças, tanto da sociedade e de ativistas climáticos, quanto, mais especificamente, de funcionários, governos ou investidores financeiros (Boffo & Patalano, 2020). E, ao traçarem um caminho para a mudança, as indústrias enfrentam questões críticas, como lidar com a incerteza e o planejamento de longo prazo (Teece, 2018), grandes transformações nos modelos de negócios (Brozovic, 2019) e o desafio de gerenciar tendências sustentáveis e insustentáveis simultaneamente (Antal et al., 2020). Diversas abordagens, muitas vezes interdisciplinares, surgiram para começar a lidar com essas questões (Sovacool, Iskandarova, et al., 2023).

Conclui-se, portanto, que a indústria não é apenas um setor chave da economia para a descarbonização, mas também desempenha um papel fundamental na promoção da mudança em toda a economia. Contudo, a indústria enfrenta desafios e obstáculos que podem dificultar sua rápida transformação, assim como a de outros setores que dependem dessa mudança, e essas questões vão além dos aspectos tecnológicos e econômicos. Nesta nota, apresentamos insights importantes sobre o tema, extraídos do trabalho do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ ao longo dos últimos anos.





2 Uma nova abordagem para a transição da energia

Uma nova abordagem para a transição da energia

Cenários globais para uma economia líquida zero de carbono

As informações mencionadas acima demonstram que o formato das transições energéticas é amplamente influenciado por transformações na forma como a energia é utilizada em toda a economia. Essas transformações podem decorrer de uma multiplicidade de fatores, incluindo mudanças comportamentais, inovações tecnológicas, transformações de cenário (por exemplo, macroeconomia, geopolítica) e geralmente estão interligadas (por exemplo, efeitos de rebote).

Nosso objetivo é contribuir com novos insights, estimando o efeito potencial das mudanças impulsionadas pela inovação nas atividades econômicas de uso final sobre a evolução do sistema energético e, conseqüentemente, sobre as emissões de carbono.

Uma primeira descoberta fundamental de nossa prática é que a implantação de tecnologias e soluções modernas (e, em sua maioria, já acessíveis) leva naturalmente a uma redução significativa das emissões, mais rápida do que a prevista em cenários semelhantes de outras fontes.

Uma segunda descoberta é que essa modernização não ocorre em detrimento da atividade econômica ou da criação de riqueza; ela caminha lado a lado com o crescimento econômico e a criação de riqueza.

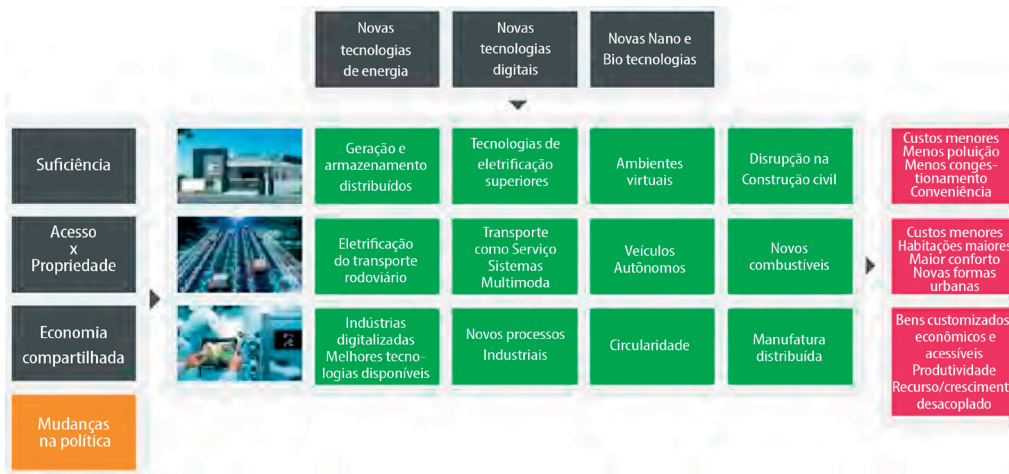


Figura 2.1: Cenários de meados do século com foco em transformações impulsionadas pela demanda (Schneider Electric, 2021)

Reconhecemos também que a maioria dos modelos atualmente em uso não leva em consideração essas possíveis evoluções e assume, por definição, a perpetuação das estruturas econômicas atuais.

A Schneider Electric tem se engajado ativamente em atividades de planejamento de cenários em nível global e regional há vários anos (Schneider Electric, 2021, 2023a, 2023b). Em 2021, introduzimos uma nova abordagem para a construção de cenários, com foco nas transformações da economia impulsionadas pela demanda e seu impacto na evolução futura do sistema energético (Figura 2.1).

A descarbonização da economia é, portanto, mais viável do que podemos pensar.

Uma terceira descoberta é que esse desenvolvimento se dá necessariamente com base em duas infraestruturas modernas, que precisarão se expandir significativamente nas próximas décadas: eletricidade e digital. Em última análise, projetamos que a participação da eletricidade na economia global aumentará para cerca de 30% até 2030 e entre 45% e 60% até 2050.

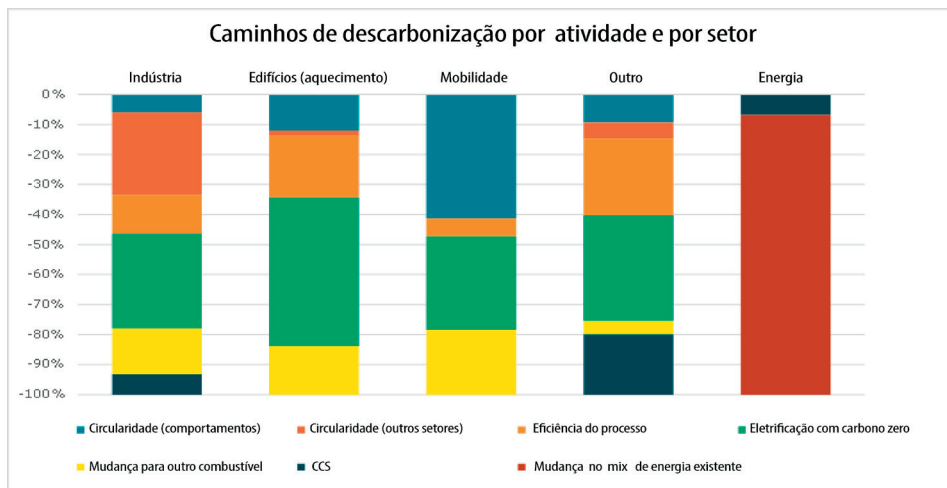


Figura 2.2: Aceleradores da descarbonização em cenário de emissões líquidas zero até 2050 (Schneider Electric, 2021)

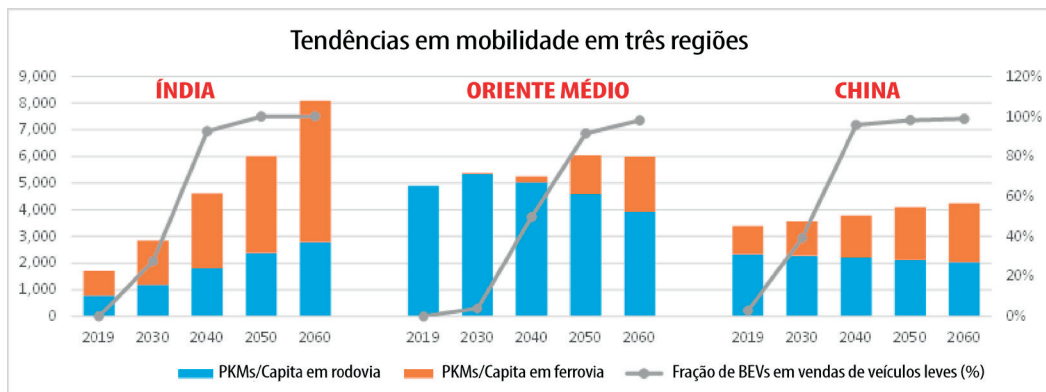


Figura 2.3: Variações na demanda de mobilidade em três regiões

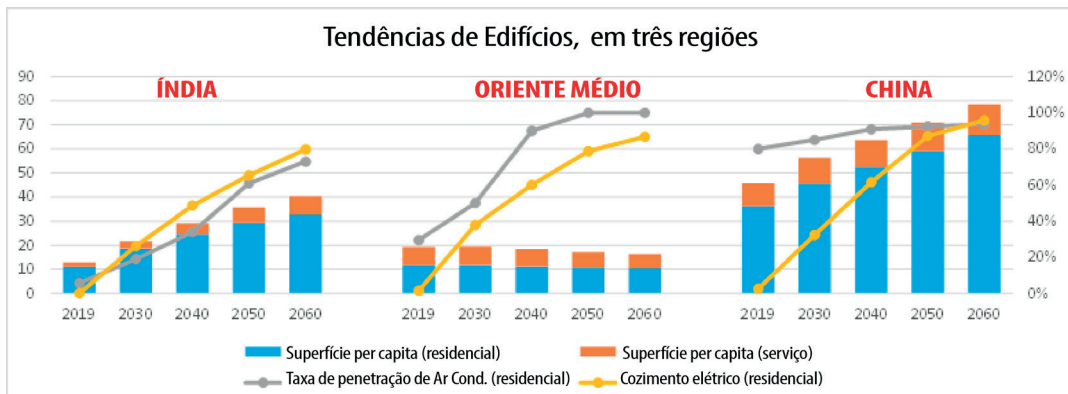


Figura 2.4: Variações na demanda por edifícios em três regiões

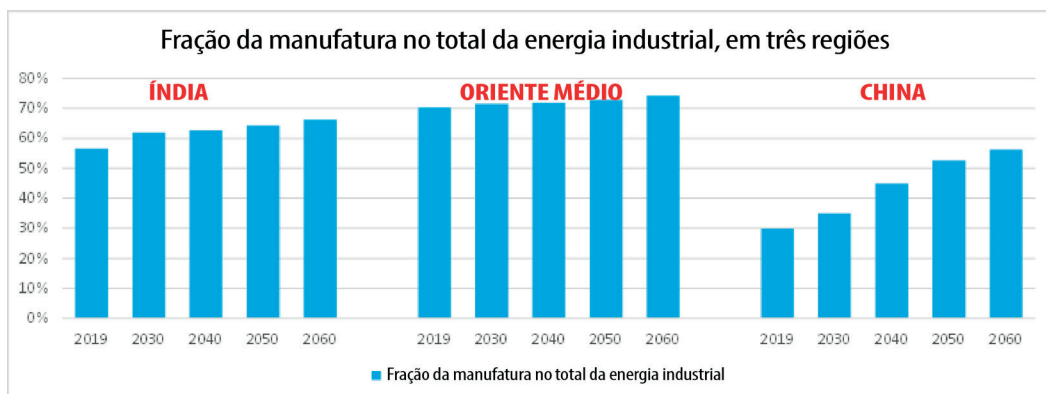


Figura 2.5: Variações na demanda do setor em três regiões

Uma quarta descoberta é a oportunidade central que os novos padrões de circularidade oferecem para a descarbonização acelerada da economia. Embora a oportunidade diga respeito a todos os setores da atividade econômica, estimamos que as medidas de circularidade poderiam representar até 30% da descarbonização total na indústria (Figura 2.2).

Isso se deve principalmente, neste modelo, a transições significativas para modelos mais circulares em setores como construção ou automotivo (e, de forma mais ampla, o futuro da mobilidade), com efeitos em cascata na demanda (e pegada) de setores de difícil descarbonização, como aço ou cimento.

O potencial provavelmente está subestimado, mas demonstra tanto o nível de interconexão de vários setores da economia quanto o papel central da indústria em qualquer trajetória global de descarbonização.

insights regionais sobre a evolução da demanda

Apresentamos acima nas Figuras 2.3 a 2.5, insights de três exercícios regionais: sobre a Índia (Schneider Electric, 2023b), em parceria com o think tank CSTEP; sobre os Países do Golfo (Schneider Electric, 2023a), em parceria com o Conselho Empresarial de Energia Limpa, com sede em Dubai; e sobre a China (Schneider Electric, 2024a), em parceria com o Instituto de Mudanças Climáticas da Universidade de Tsinghua.

Em cada um desses exercícios, desenvolvemos dois cenários. Um deles foi um cenário de descarbonização acelerada até meados do século, projetado para promover transformações significativas na demanda, a fim de acelerar a transição para uma economia de emissões líquidas zero. Este é o cenário que utilizamos aqui.

Os padrões de demanda são significativamente afetados pelas inovações apresentadas acima. No setor de **transportes**, as diferenças em passageiros-quilômetro per capita refletem as diferentes políticas de urbanização entre as regiões.

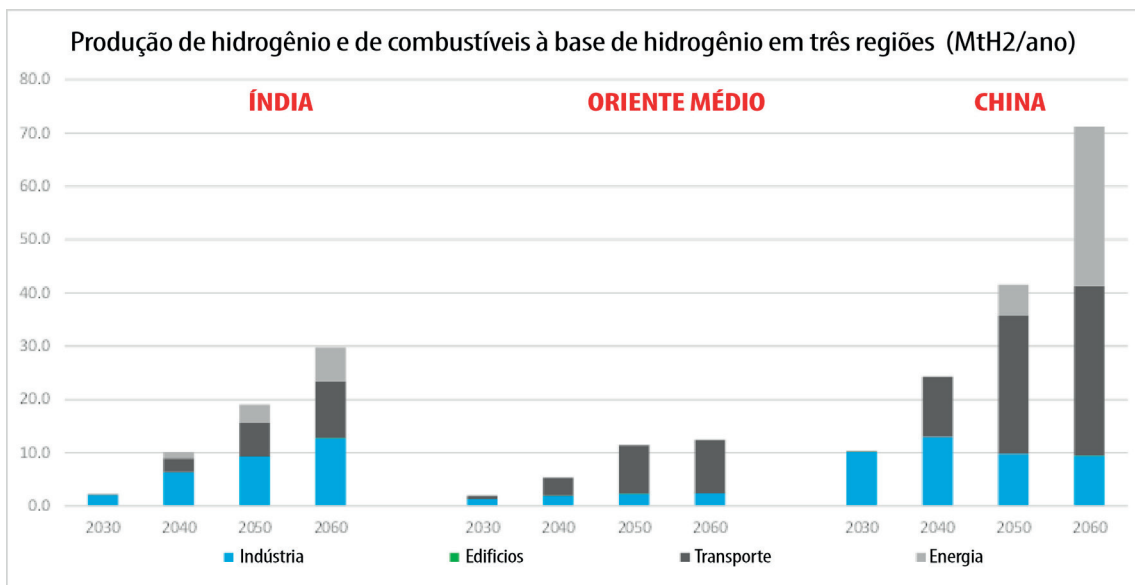


Figura 2.6: Evolução da demanda de eletricidade em três regiões

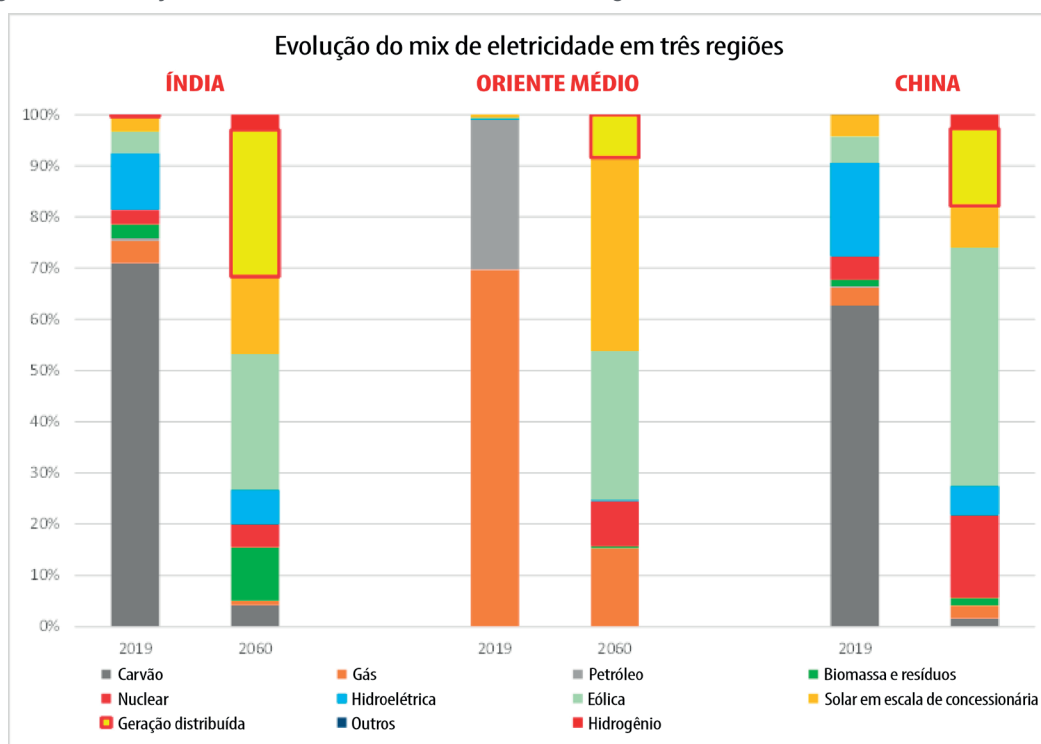


Figura 2.7: Mix de suprimento de eletricidade, evolução em três regiões

Essas políticas afetam tanto o volume total de transporte quanto a participação do transporte ferroviário em relação aos meios de transporte privados. Em todas as três regiões, a participação de veículos elétricos nas vendas aumenta rapidamente após 2030, com a China à frente da maioria das outras regiões.

As áreas de **edifícios** são afetadas tanto pela evolução da riqueza quanto pelas escolhas de urbanização que estão sendo feitas, e estas variam entre as regiões. O ar-condicionado e, em menor grau, o fogão elétrico são os principais impulsionadores do crescimento da demanda por eletricidade no setor.

Na **indústria**, uma constatação fundamental é a transformação generalizada de todas as economias em direção a uma maior participação do setor manufatureiro na demanda total de energia.

Mesmo com uma taxa de ocupação tão baixa (quanto 30% hoje) na China, ela deverá subir para quase 60% até 2060. Na Índia, o rápido desenvolvimento do parque imobiliário não altera a estrutura da indústria, com uma parcela significativa dedicada à manufatura. A descarbonização e a transformação da manufatura de alto valor agregado em todas as regiões continuam sendo uma prioridade fundamental para a política industrial.

Insights regionais sobre a evolução da demanda e oferta de eletricidade

A demanda por eletricidade, Figura 2.6, aumenta significativamente nas três regiões à medida que a economia se descarboniza.

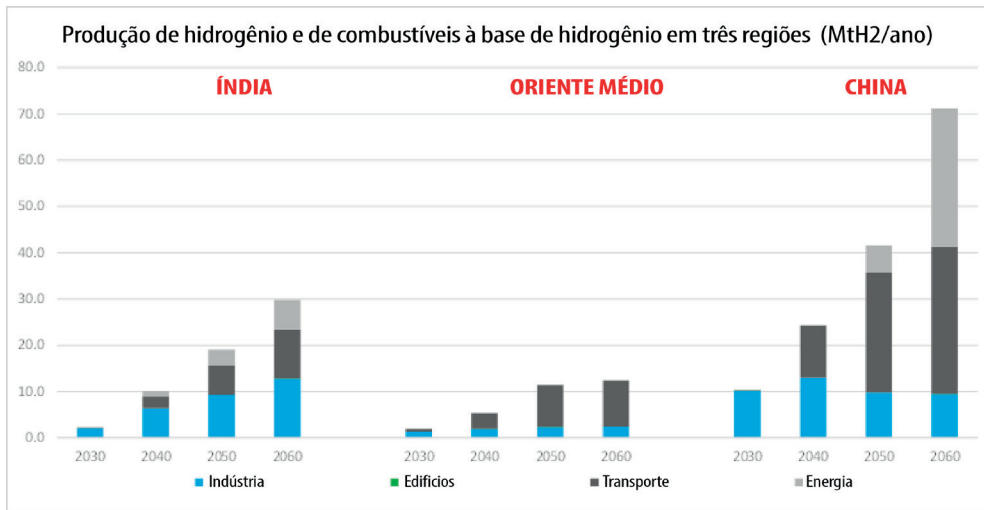


Figura 2.8: Produção de hidrogênio em três regiões

Na China, esse valor é multiplicado por 3, no Oriente Médio por 4 e na Índia por 8 até 2060. Os principais impulsionadores do crescimento da demanda por eletricidade são os setores da construção civil e industrial e, em menor escala, o setor químico.

A evolução da matriz energética, Figura 2.7, também é consistente em todas as regiões, com a maior parte desse crescimento impulsionada pelas energias eólica e solar. A energia hidrelétrica continua a desempenhar um papel fundamental em algumas regiões, mas as limitações ao seu desenvolvimento resultam em uma participação menor na matriz total. A energia solar distribuída também desempenha um papel significativo, principalmente na China e na Índia. Na Índia, ela acompanha o aumento do volume do parque imobiliário. A energia nuclear complementa essa perspectiva.

Insights regionais do papel do hidrogênio

Em todos os cenários, o hidrogênio é usado principalmente para a descarbonização de setores industriais específicos (por exemplo, siderurgia) e para a fabricação de grandes quantidades de combustíveis descarbonizados (e-combustíveis), principalmente amônia.

A Figura 2.8 mostra a produção de hidrogênio nas três regiões. O hidrogênio não tem aplicação prática como combustível para caminhões e outros usos diretos (como na aviação), nem em edifícios para aquecimento. Ele também é considerado uma alternativa potencial ao gás natural no sistema elétrico (em instalações de reserva). Embora as quantidades sejam consideráveis, a participação de usinas termelétricas a hidrogênio na matriz energética total permanece limitada a poucos por cento. Além disso, continua sendo uma opção bastante debatida.

Insights regionais sobre as emissões de CO₂

Apresentamos aqui os principais impulsionadores da descarbonização por setor, nas três regiões. As emissões de todas as regiões são normalizadas com base em 100 para o ano de 2019.

A descarbonização do setor de transportes, Figura 2.9, é dominada principalmente por mudanças nos níveis de atividade (formato da urbanização, recursos e desenvolvimento de sistemas ferroviários) e pela eletrificação da mobilidade rodoviária. A dependência de combustíveis alternativos (substituição de combustíveis) está relacionada principalmente a transportes de difícil descarbonização, como a aviação ou transporte marítimo.

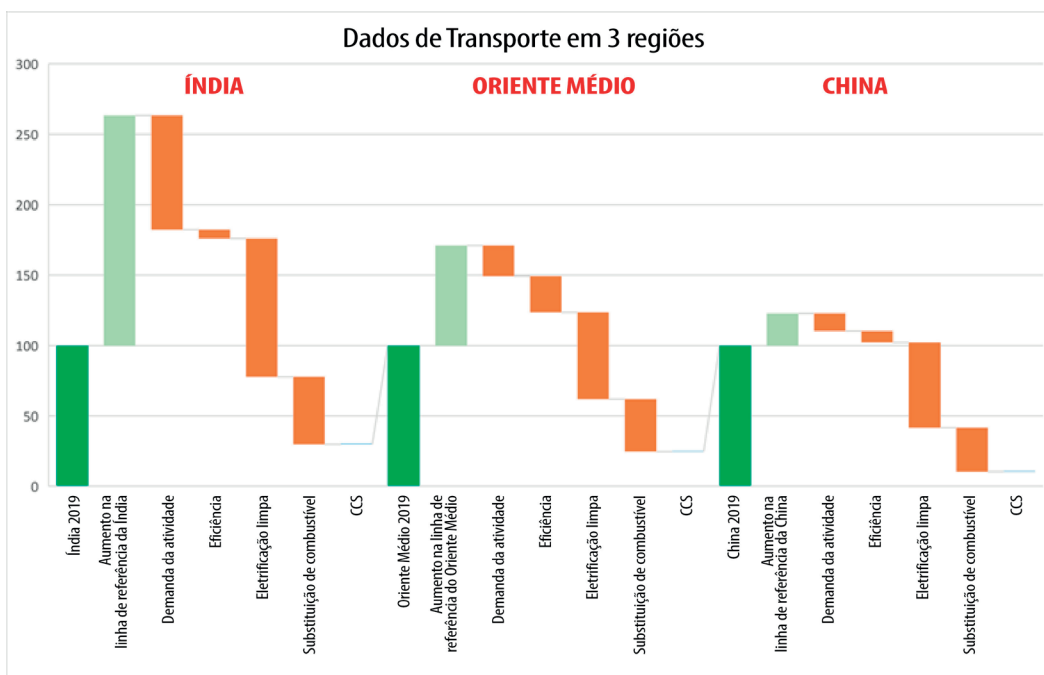


Figura 2.9: Cascata de emissões do setor de transportes em três regiões

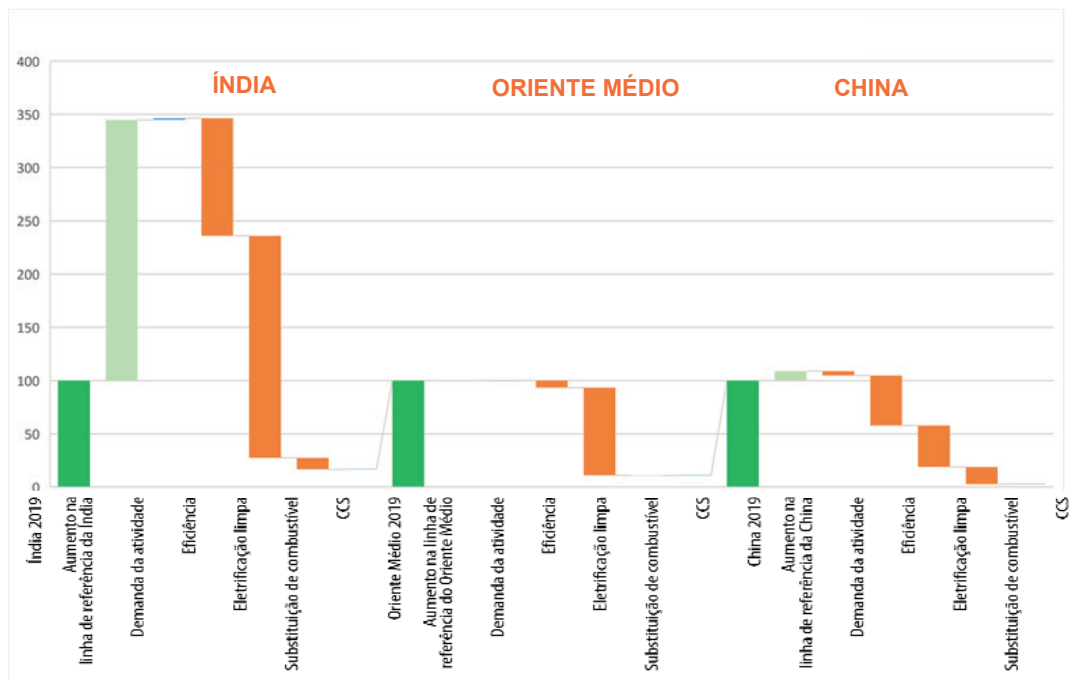


Figura 2.10: Cascata de emissões em edifícios, em três regiões

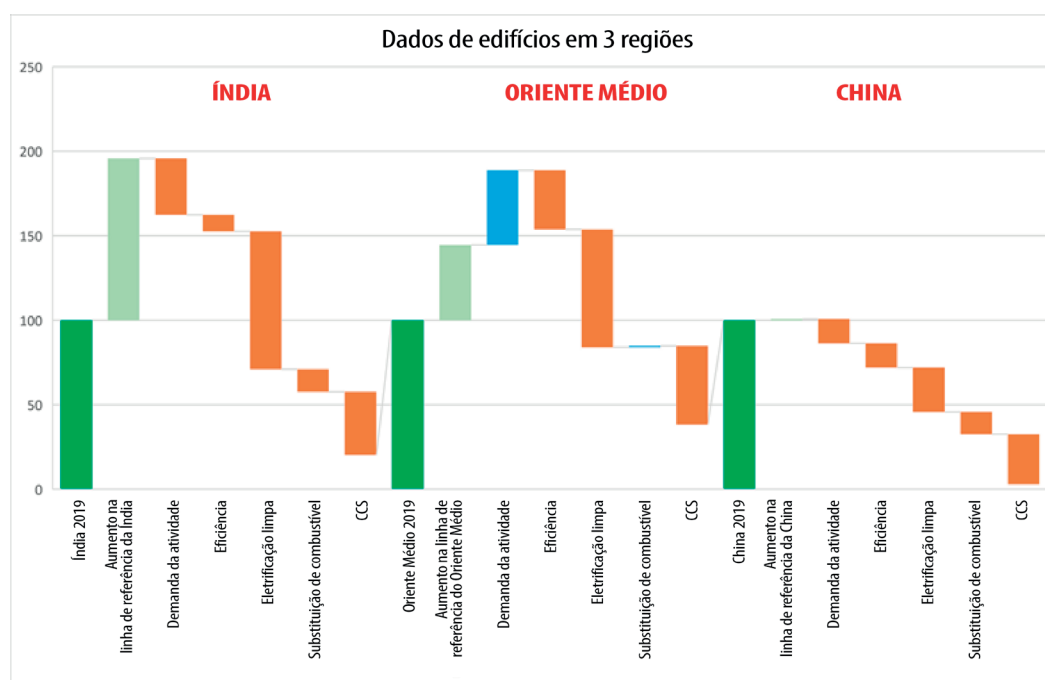


Figura 2.11: Cascata de emissões na indústria, em três regiões

A descarbonização do parque de edifícios, Figura 2.10, está relacionada principalmente a ganhos significativos de eficiência em novas construções e renovações (ou demolições) do parque existente, juntamente com a eletrificação de equipamentos, combinada com a implantação sistemática de capacidades de geração distribuída.

Na indústria, a eletrificação limpa desempenha um papel fundamental na descarbonização do setor, principalmente no setor de transformação, que representa a maior parcela da demanda de energia nas três regiões. Isso é complementado pela evolução das atividades. Notavelmente, como visto na Figura 2.11, à medida que o setor da construção civil se torna significativamente mais eficiente nessas regiões, grandes economias se materializam no aço e no cimento, levando a uma redução da pegada de carbono de indústrias tipicamente altamente emissoras, e a um recurso maior ao aço reciclado.

Nos setores que continuam difíceis de descarbonizar, a Captura e Armazenamento de Carbono desempenhará um papel necessário para descarbonizar alguns ativos que permanecerão em operação até meados do século.

As análises regionais revelam padrões consistentes no potencial de eletrificação e na integração de energias renováveis, ao mesmo tempo que destacam desafios e oportunidades distintos em diferentes contextos econômicos. Com base nessas informações, os conhecimentos técnicos e os caminhos para a descarbonização industrial são essenciais para orientar a tomada de decisões, especialmente no que diz respeito ao potencial de eletrificação e à viabilidade econômica. A análise setorial detalhada fornece parâmetros técnicos e econômicos essenciais para a formulação de políticas.



3 Descarbonização da Indústria

Descarbonização da Indústria

O potencial da eletrificação direta é maior do que geralmente considerado

Tradicionalmente, considera-se que a indústria é difícil de descarbonizar. Na Europa ou nos EUA, por exemplo, a maior parte das emissões provém de alguns setores (Petit, 2022; Schneider Electric, 2024b). Esses setores incluem indústrias química e petroquímica, de metais primários, de papel e de minerais não metálicos, entre outros. Tradicionalmente, são considerados “difíceis de reduzir” porque suas emissões se originam de emissões de processos industriais (por exemplo, cimento), que existem por projeto, ou da operação de sistemas de aquecimento de alta temperatura, para os quais existem poucas tecnologias alternativas em escala.

Eles desenvolvem processos específicos dentro desses setores que podem ser facilmente eletrificados porque, por um lado, a tecnologia existe e está disponível em escala e, por outro lado, essas atualizações não levam a grandes reformulações de processos, mas se concentram principalmente em atualizações de equipamentos semelhantes.

Esses setores geralmente abrangem aplicações de movimento (por exemplo, a transição para motores elétricos), processos de baixa a média temperatura (por exemplo, caldeiras) e utilidades relacionadas às instalações (por exemplo, edifícios industriais).

No geral, dois estudos simultâneos para a Europa e os EUA avaliam que a participação da eletricidade na matriz energética da indústria poderia aumentar rapidamente de 25-30% atualmente para cerca de 50%, com impacto significativo nas emissões do setor e na demanda por combustíveis fósseis (Figura 3.1). Esse potencial não é atualmente foco das políticas em ambas as regiões.

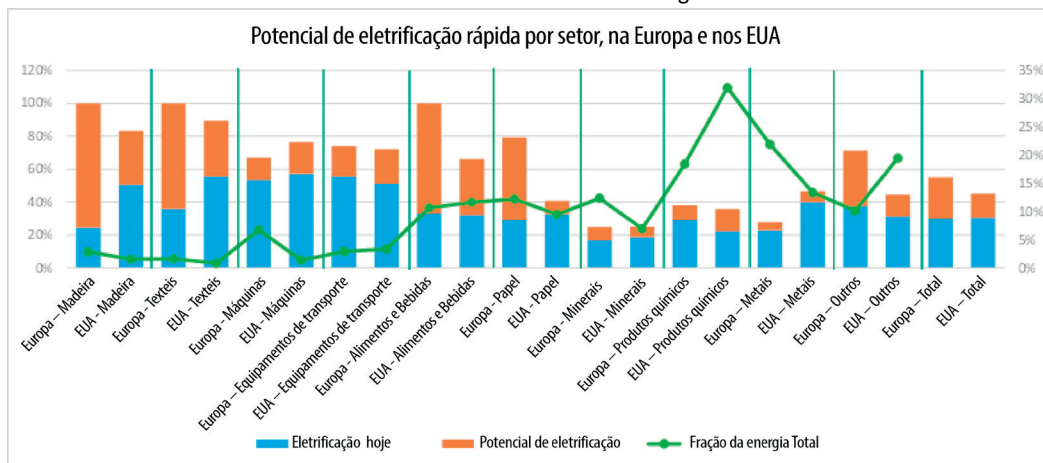


Figura 3.1: Potencial acelerado para eletrificação direta em toda a indústria (Petit, 2022; Schneider Electric, 2024b)

Os 4 setores acima representam cerca de **dois terços da demanda total de energia** e uma parcela maior das emissões (quando se consideram as emissões do processo).

Esse fato levou as políticas de descarbonização da indústria a se concentrarem em setores de “difícil descarbonização” e no desenvolvimento necessário de grandes infraestruturas e iniciativas impulsionadas pela inovação (Schneider Electric, 2024b).

Entretanto, uma análise detalhada de cada setor industrial por etapa-chave do processo **destaca grandes oportunidades inexploradas para a eletrificação direta**. Além disso, essas oportunidades abrangem tanto os setores de “difícil descarbonização” quanto os outros.

A eletrificação pode representar uma fonte de competitividade para a indústria.

Diversos estudos exploraram o impacto da descarbonização industrial sobre sua competitividade. O consenso resultante desse conjunto de trabalhos é que a descarbonização da indústria terá necessariamente um custo, ou seja, levará a um aumento no custo dos produtos vendidos.

Alguns estudos se concentram nas Curvas de Redução Marginal para aplicações-chave (Blum et al., 2021; Hallegatte et al., 2014; Kesicki, 2010).

Na indústria, a descarbonização iria aumentar os preços de produtos intermediários, porém teria um impacto desprezível nos preços ao consumidor



Figura 3.2: Impactos nos custos para consumidores decorrentes da descarbonização da indústria (Energy Transitions Commission, 2020)

O aumento previsto nos custos leva à promoção de prêmios verdes (ou impostos sobre o carbono) para capturar as externalidades e incentivar as indústrias a lançar os investimentos necessários para descarbonizar e nivelar o campo de jogo para as empresas industriais. Outros argumentam também que, apesar do aumento significativo dos custos dos produtos intermediários, o impacto final nos custos para os consumidores permanecerá extremamente baixo e que não há nenhum problema macroeconômico associado à transição (Figura 3.2) (Energy Transitions Commission, 2020).

Uma dificuldade fundamental nas estimativas existentes é, no entanto, a falta de granularidade por setor e tipo de produto e, mais frequentemente, a falta de detalhes sobre as principais premissas adotadas (qual motivador de descarbonização, quais as premissas sobre os custos da energia, em que regimes tarifários, etc.).

Constatamos que, com o conjunto correto de premissas, o consenso geral mencionado acima pode, na verdade, ser refutado e o custo dos bens vendidos a partir de sistemas industriais eletrificados pode revelar-se competitivo ou mesmo inferior ao atual. Isto deve-se principalmente ao desenvolvimento combinado da eletrificação industrial e à evolução de uma matriz energética dominada pela produção intermitente de energias renováveis. A queda no custo nivelado de energia (LCOE) das energias renováveis tem sido drástica na última década e a expectativa é de que continue (BloombergNEF, 2024). Essa queda virá acompanhada de uma variação significativa de preços ao longo de dias e meses, com implicações necessárias para tarifas mais dinâmicas. Os sistemas industriais poderiam se beneficiar disso para alavancar tarifas dinâmicas e produzir quando os custos de energia forem mais favoráveis, em vez de depender de contratos de preço fixo de

longo prazo. Isso exige investimento em armazenamento local de energia e aproveitamento das opções de flexibilidade industrial quando viáveis. Ao fazer isso, as indústrias não apenas otimizam seus custos de produção, como também contribuem para a estabilidade do sistema elétrico e para a viabilidade econômica de um sistema elétrico cada vez mais dominado por fornecimento intermitente e não despachável.

Na verdade, é improvável que o desenvolvimento de um sistema elétrico dominado por energias renováveis intermitentes se materialize sem uma flexibilidade significativa do lado da demanda, como já foi demonstrado há alguns anos (Dorr&Seba, 2020).

Estudo de caso: e-amônia

A amônia (NH₃) desempenha um papel crucial na segurança alimentar global e nos processos industriais. Como o segundo produto químico mais produzido no mundo, a amônia é usada principalmente na produção de fertilizantes, sustentando as colheitas agrícolas que alimentam bilhões de pessoas, bem como no refino. Entretanto, a produção convencional de amônia é altamente intensiva em energia e emite carbono, representando aproximadamente 1,8% das emissões globais de CO₂. Este impacto ambiental significativo coloca a indústria da amônia na vanguarda dos esforços de descarbonização no setor químico. O desenvolvimento de processos de produção de amônia eletrificada (e-amônia) economicamente viáveis, alimentados por energia renovável, é, portanto, uma prioridade fundamental para a indústria (Armijo, Philibert, 2020).

Nosso estudo (Kwan, 2024a) analisou vários cenários de preços da rede elétrica para elucidar as relações complexas entre o investimento em geração renovável no local, os custos de eletrificação da rede e o custo nivelado da produção de e-amônia.

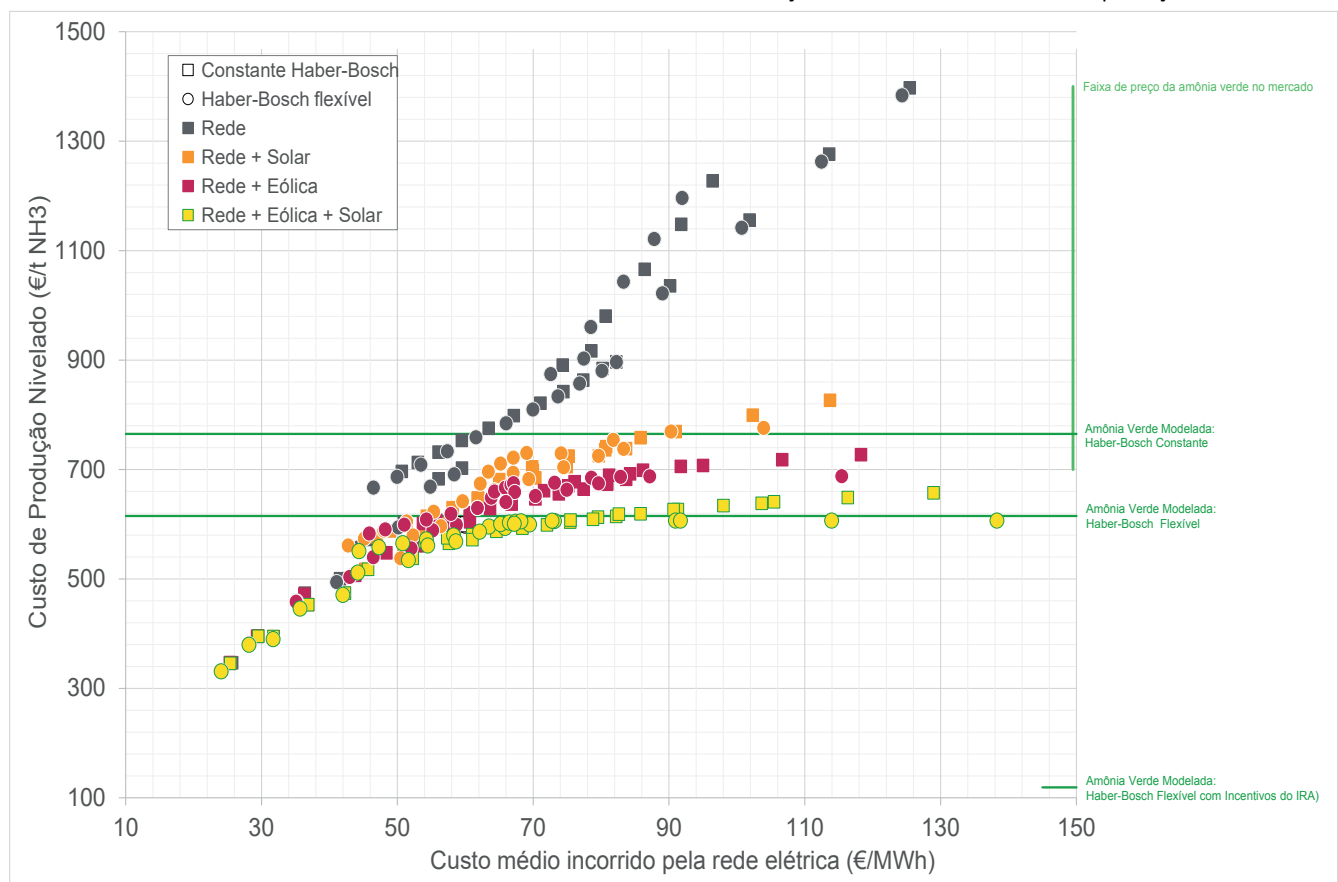


Figura 3.3: Custo da rede elétrica versus custo nivelado de produção de e-amônia (LCOA). A inclusão de energias renováveis não ajuda localmente a reduzir os custos de produção, pois o LCOA é altamente correlacionado com o custo da energia. As energias renováveis no local mitigam os custos mais elevados da rede, apesar dos seus custos iniciais mais altos. Notavelmente, mesmo com estruturas de custo de redes mais baixas, a incorporação de energias renováveis no local para a matriz energética ainda ajuda a reduzir custos, proporciona resiliência ao sistema e reduz emissões.

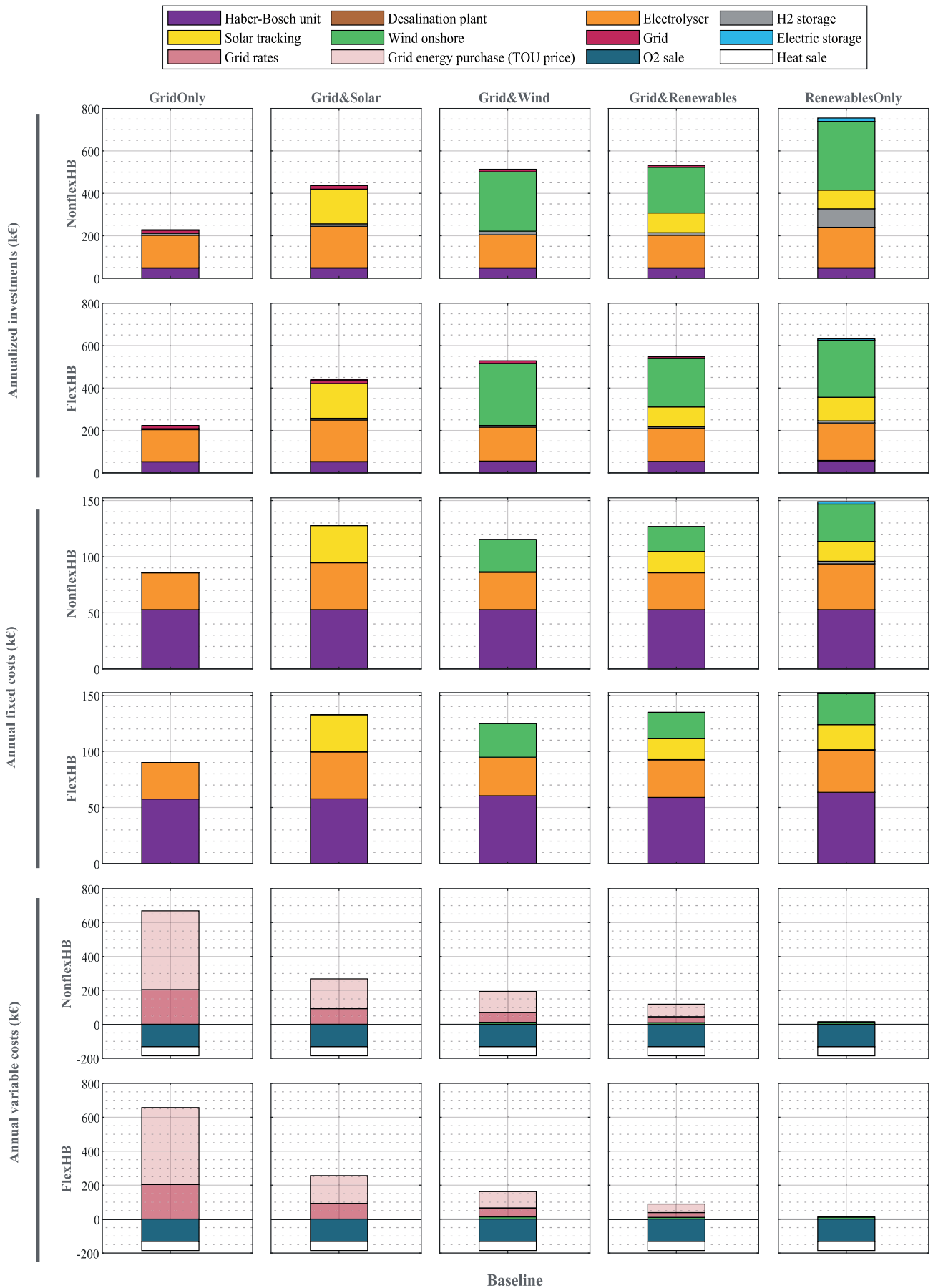


Figura 3.4: Detalhamento de custos da E-amônia para configurações somente conectadas à rede, semi-isoladas e isoladas. Os cenários dependentes da rede apresentam um CAPEX menor, mas um OPEX maior. Os cenários com mais energias renováveis no local ou sistemas de recursos energéticos distribuídos, incluindo armazenamento de hidrogênio, apresentam um CAPEX maior, mas um OPEX menor. Os sistemas que incorporam processos de energia distribuída reduziram o custo nivelado da produção de e-amônia em comparação com a produção somente conectada à rede.

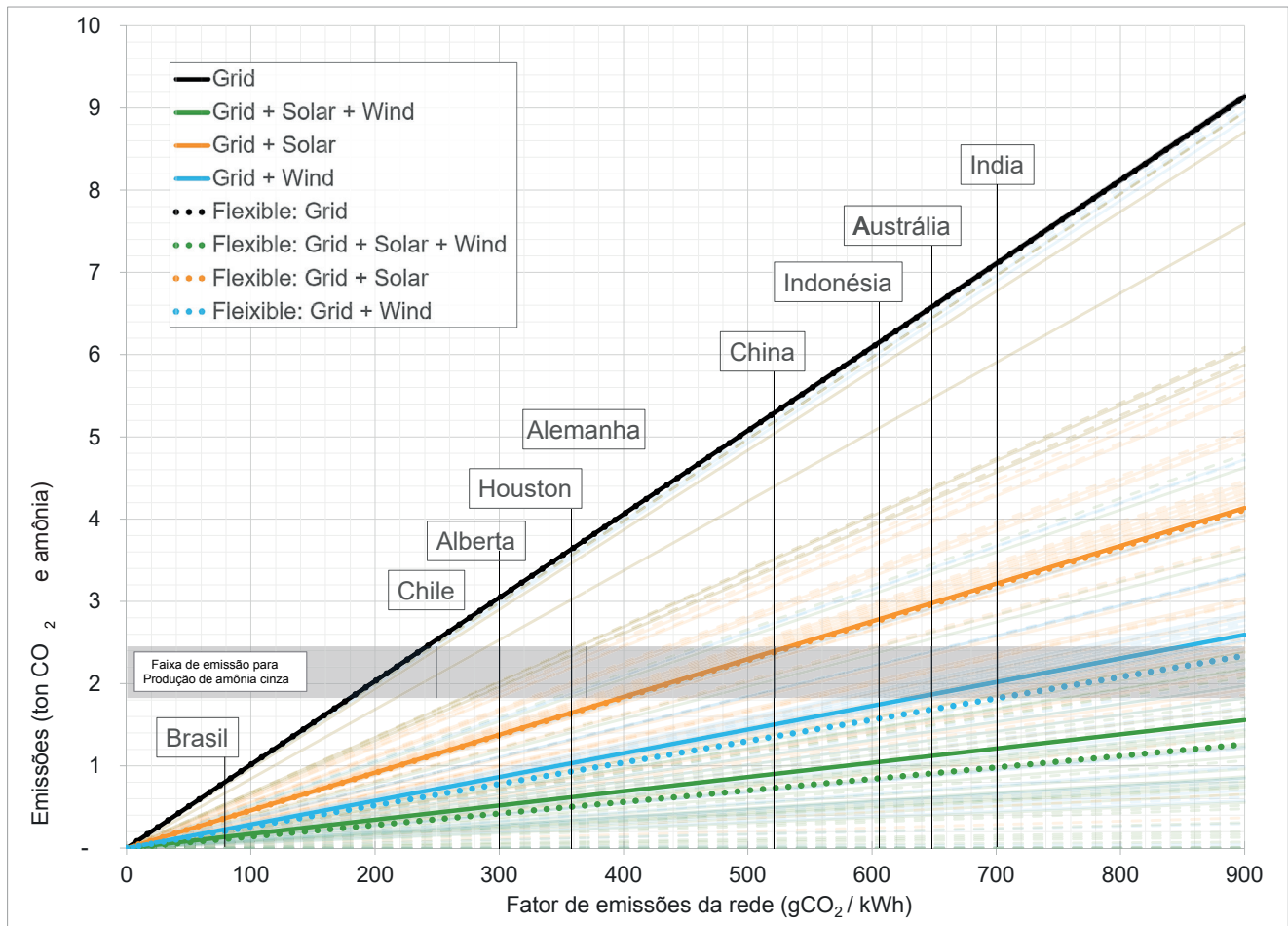


Figura 3.5: Fator de emissões da rede versus intensidade potencial de carbono da amônia eletrônica. As linhas transparentes representam os resultados da análise de sensibilidade dos custos da rede.

O estudo otimizou sistemas que integram despesas de capital para tecnologias de processos eletrificados, armazenamento de energia e armazenamento de hidrogênio, bem como as despesas operacionais e estratégias operacionais para minimizar o custo de produção. O modelo permitiu a alternância dinâmica entre energias renováveis dedicadas e eletricidade da rede com base na disponibilidade e no preço.

Além disso, as faixas de sensibilidade aos preços da rede exploradas na análise podem servir como uma aproximação para avaliar os custos de produção de amônia sob estruturas de preços de contratos de compra de energia (PPA) (Gallardo, 2021) e a viabilidade econômica em relação a esses preços.

A otimização dimensionou e operou o armazenamento de energia e hidrogênio e despachou, bem como aumentou e diminuiu a produção, para minimizar o custo ao longo de um ano com resolução horária. Essa flexibilidade permitiu a identificação da solução mais econômica, considerando a intermitência das fontes de energia renováveis e a potencial variabilidade nos preços da eletricidade da rede, juntamente com novas tecnologias de energia e gerenciamento de energia e operações.

Resultados e debates sobre a e-amônia

A integração de fontes de energia renováveis, armazenamento e energia despachável na forma de hidrogênio, e controles de processo avançados é um fator chave na redução do custo da amônia produzida a partir da eletrificação.

Ao combinar a geração de energia renovável no local, como solar e eólica, com estratégias de controle de processos de última geração, os custos operacionais da produção de amônia elétrica podem ser significativamente reduzidos. Os resultados destacam a oportunidade das estratégias de integração de energia renovável para a indústria. Mesmo em cenários com preços de rede relativamente baixos e estáveis, a incorporação de energia solar e eólica no local foi vantajosa. (Ver Figura 3.3)

As estimativas típicas para o custo da amônia verde proveniente de processos eletrificados geralmente variam de US\$ 700 a US\$ 1.400 por tonelada. Como a energia é um fator determinante significativo desses custos, investir em alguma quantidade de energia descentralizada ajuda a reduzir o custo nivelado de produção, mas em contrapartida, aumenta o custo inicial dos ativos. O maior investimento de capital (CAPEX) é frequentemente visto como uma barreira à adoção, mas modelos de negócios de apoio, como energia como serviço, podem ajudar a garantir os benefícios dos novos sistemas sem alto custo inicial. A Figura 3.4 mostra o custo inicial e operacional para os cenários modelados por categoria.

Em todas as análises de sensibilidade aos custos da rede elétrica, os sistemas de energia renovável instalados no local reduziram o LCOA (Custo Nivelado de Propriedade) em comparação com o cenário correspondente que dependia exclusivamente da rede elétrica. O LCOA estabiliza em € 600/t com gestão flexível de energia e operações, e em um valor ligeiramente superior, de € 630/t, com operações fixas, sendo notável o custo médio de eletricidade incorrido da rede superior a € 100/MWh. Em comparação, a dependência total da rede resulta em um LCOA superior a € 1.000/t (ver Figura 3.3).

Deve-se notar que esses custos representam o custo médio incorrido e, por natureza da otimização, são muito menores do que os preços médios do mercado atacadista, devido à propensão do sistema inteligente e otimizado de comprar energia elétrica da rede apenas quando os preços estão baixos (fora do horário de pico) e usar energia e armazenamento no local quando os preços da rede estão altos (horário de pico).

A integração de energia renovável no local não apenas reduz o custo da produção de amônia eletrônica, mas também serve como uma estratégia de mitigação de riscos contra as incertezas dos custos da rede. Ao reduzir a dependência da rede elétrica, as usinas de amônia eletrônica podem se proteger de potenciais flutuações de preços e interrupções no fornecimento.

Esse aspecto de redução de riscos é particularmente relevante no contexto da transição energética global. À medida que os países adotam cada vez mais políticas de energia renovável e eliminam gradualmente a geração de energia baseada em combustíveis fósseis, espera-se que a rede elétrica passe por mudanças significativas nas próximas décadas. Essas mudanças podem levar a uma maior volatilidade nos preços e no fornecimento de energia elétrica, à medida que a rede se adapta à natureza intermitente das fontes renováveis.

Em todos os cenários que utilizam energia renovável no local, a intensidade de carbono do produto de amônia é menor do que se produzido apenas pela rede elétrica, como mostrado na Figura 3.5. O potencial de redução de emissões da integração de energia renovável está diretamente correlacionado ao fator de emissão específico da rede, conforme discutido anteriormente neste capítulo. Em regiões com altos fatores de emissão da rede, os benefícios ambientais da energia renovável no local são mais pronunciados. Por outro lado, em regiões com redes elétricas já de baixo carbono, as reduções incrementais de emissões alcançadas por meio da integração de energia renovável podem ser menores.

Considerações sobre a e-Amônia

Primeiramente, o estudo identifica um “limiar de resiliência” em sistemas de produção de e-amônia. Os cenários que combinam rede elétrica e energias renováveis demonstram consistentemente melhor resiliência de custos e adaptabilidade às mudanças nas condições de preços da rede elétrica em comparação com os cenários que utilizam apenas a rede elétrica. Isso sugere a existência de um nível crítico de integração de energia renovável e flexibilidade do processo, além do qual o sistema se torna significativamente mais resiliente às incertezas econômicas. Essa descoberta destaca a importância de investir em energia renovável e controles de processo avançados para criar sistemas de produção de e-amônia robustos e preparados para o futuro.

Em segundo lugar, o estudo enfatiza a importância de uma abordagem holística para o projeto do sistema, considerando a interação entre a matriz energética, a flexibilidade do processo e os requisitos de armazenamento. A configuração flexível de Haber-Bosch requer consistentemente maiores capacidades de Haber-Bosch e menores requisitos de armazenamento em comparação com a configuração não flexível de Haber-Bosch. Essa descoberta ressalta a necessidade de uma perspectiva sistêmica que considere as compensações entre flexibilidade do processo, dimensionamento da unidade e capacidade de armazenamento para atingir o menor custo nivelado de amônia (LCOA).

Em terceiro lugar, o estudo demonstra os benefícios da integração de energia renovável em todos os cenários de sensibilidade. A rede elétrica combinada com energias renováveis, juntamente com uma configuração flexível de Haber-Bosch, mostra consistentemente o melhor desempenho econômico e resiliência às incertezas de preços da rede.

Essa descoberta fornece um argumento convincente para a adoção de fontes de energia renovável e flexibilidade do processo na produção de amônia, uma vez que essas estratégias se mostram robustas e adaptáveis mesmo diante de condições econômicas desafiadoras.

Apesar da diferença relativa de preço entre o processamento Haber-Bosch flexível e não flexível, em condições idênticas, ser pequena, a capacidade de operar de forma flexível demonstra como a eletrificação agrega valor e considera modelos operacionais com vantagem econômica.

Em quarto lugar, os cenários de sensibilidade destacam o papel crucial do armazenamento de energia e da operação flexível do processo na mitigação do impacto do aumento dos preços da rede e da variabilidade de preços. À medida que a variabilidade dos preços da rede aumenta, a configuração Haber-Bosch flexível apresenta menores requisitos de armazenamento em comparação com a configuração Haber-Bosch não flexível. Essa descoberta enfatiza a importância da flexibilidade do processo para explorar as variações de preços e melhorar os custos de produção, sendo o principal fator na redução dos preços da energia, o que leva a um custo final de produção de amônia mais baixo.

Estudo de caso: Aço verde

A indústria siderúrgica, responsável por 7 a 9% das emissões globais de gases de efeito estufa, é um setor crucial para a descarbonização (Lambotte, 2024). A demanda por aço continua a crescer, impulsionada pelas necessidades de infraestrutura e pelo desenvolvimento econômico. O desafio de crescer e reduzir as emissões simultaneamente é significativo para o setor.

Nosso estudo (Kwan, 2025b) explora a produção de aço verde em uma abordagem semelhante à da amônia eletrônica. Ao examinar processos para aço verde que dependem de hidrogênio proveniente da eletrólise e de um forno elétrico em configurações conectadas à rede elétrica, à rede com energias renováveis no local e somente com energias renováveis, o estudo avaliou vários custos de conexão à rede e o impacto nas operações e no dimensionamento de ativos em relação ao custo da produção de aço verde.

A siderurgia tradicional, principalmente pela rota do alto-forno-forno básico de oxigênio (BF-BOF), depende fortemente do carvão e é uma importante fonte de emissões de CO₂. Nosso estudo modelou a redução direta baseada em hidrogênio (H₂-DRI) com um forno elétrico a arco (FEA) para produzir aço verde. O H₂-DRI substitui o carvão por hidrogênio verde como agente redutor, produzindo ferro de redução direta (DRI), que é então processado em um forno elétrico a arco (FEA) para fabricar aço. Esse processo pode reduzir significativamente as emissões se o hidrogênio for produzido usando energia renovável (Lambotte, 2024). Empresas como SSAB, LKAB e Vattenfall são pioneiras nessa tecnologia por meio de seu projeto HYBRIT (ING, 2023).

Resultados e Discussão do Aço Verde

Por meio de modelagem temporal horária sofisticada ao longo de um ano civil completo, avaliamos uma instalação de aço H₂-DRI-EAF de dois milhões de toneladas sob as várias configurações de sistema de energia. Os resultados revelam um argumento econômico convincente para sistemas semi-isolados que combinam estrategicamente a eletricidade da rede com energias renováveis no local. Essas configurações híbridas atingem um custo nivelado do aço (LCOS) que varia de US\$ 781 a US\$ 811 por tonelada — superando substancialmente as alternativas somente com rede (US\$ 887 a US\$ 929/tonelada) e totalmente isoladas (US\$ 934/tonelada), como visto na Figura 3.6. Essa vantagem de custo de 12 a 15% representa uma margem importante em um setor onde a economia da produção determina criticamente o posicionamento competitivo.

Preços de mercado x Custo modelado de produção de aço verde

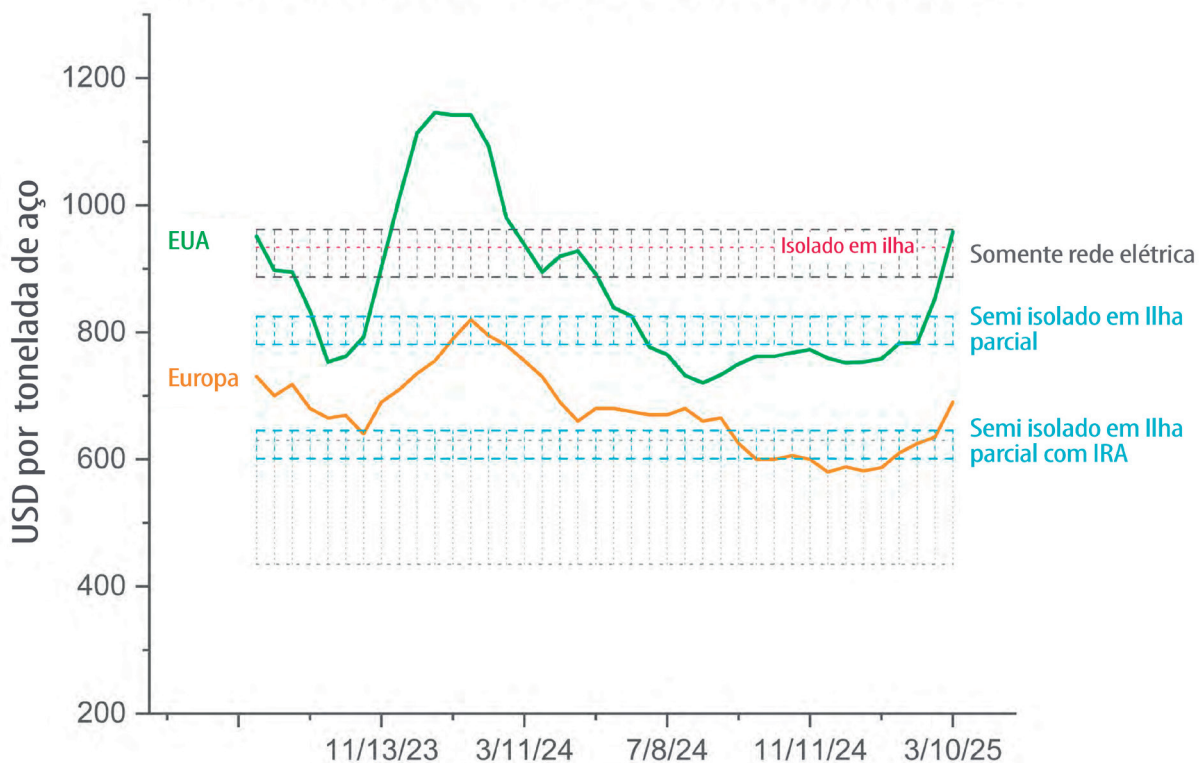


Figura 3.6: Preços de mercado versus custo de produção de aço verde modelado

A vantagem de desempenho decorre da capacidade única dos sistemas semi-ilhados de alavancar pontos fortes complementares: acesso à energia da rede a baixo custo durante períodos favoráveis, enquanto protegem as operações de picos de preços por meio da geração renovável. Talvez de forma contra-intuitiva, nosso modelo de otimização demonstra que uma maior capacidade renovável proporciona consistentemente custos gerais mais baixos, apesar de exigir maior investimento inicial.

Os sistemas semi-ilhados exigem um investimento inicial substancialmente maior — de US\$ 4,5 a 7,9 bilhões, em comparação com US\$ 2,8 a 4,3 bilhões para configurações somente conectadas à rede — mas esse prêmio de capital proporciona retornos superiores por meio da redução dos custos operacionais ao longo do ciclo de vida da usina. As Figuras 3.5 e 3.6 fornecem detalhes sobre os custos de produção e despesas de capital. À medida que os custos da eletricidade da rede aumentam, esses sistemas exibem uma transição progressiva para uma maior utilização de energia renovável, com a energia solar emergindo como a fonte renovável preferida nos cenários de referência (contribuindo com aproximadamente 40% do consumo anual de energia).

O desempenho ambiental dos sistemas semi-ilhados é igualmente convincente. Nossa análise demonstra que essas configurações podem alcançar reduções de emissões de 46 a 84% em comparação com os métodos convencionais, dependendo da fração renovável empregada. A análise de impacto ambiental mostrou que as configurações somente conectadas à rede elétrica mantêm emissões mais baixas em comparação com os métodos tradicionais de fabricação de aço somente quando as emissões da rede elétrica permanecem abaixo de aproximadamente 520 kgCO₂e/MWh. As configurações semi-ilhadas apresentaram desempenho ambiental superior em uma faixa muito mais ampla de intensidades de emissão da rede, exigindo valores superiores a 700 kgCO₂e/MWh para se aproximarem dos níveis de emissão de fabricação de aço convencional, como mostrado na Figura 3.7.

A configuração totalmente isolada apresentou uma intensidade mínima prática de emissões de aproximadamente 200 kgCO₂e/tonelada de aço, representando um piso teórico independentemente da intensidade de emissão da rede. Essa pegada de carbono residual decorre de diversas fontes identificadas na análise: processamento de matéria-prima, reações químicas como a calcinação de calcário, consumíveis como eletrodos de grafite e atividades da cadeia de suprimentos. A eliminação completa dessas emissões exigiria inovações que estão além do escopo do estudo, mas as reduções de emissões alcançáveis por meio de sistemas semi-isolados representam uma melhoria substancial em relação ao status quo.

Além dos benefícios em termos de carbono e custo, as configurações semi-isoladas proporcionam um substancial “dividendo de resiliência” que as abordagens convencionais não conseguem igualar. Em regiões que enfrentam instabilidade na rede — seja por eventos climáticos extremos, restrições de transmissão ou rápida integração de energias renováveis — a capacidade de manter a continuidade da produção representa um valor imenso, além da economia de custos rotineira. Uma usina siderúrgica semi-isolada com capacidade de armazenamento de hidrogênio dimensionada adequadamente poderia manter operações críticas durante perturbações prolongadas na rede elétrica, traduzindo-se diretamente em vantagens competitivas, à medida que clientes industriais e reguladores reconhecem cada vez mais o impacto econômico das interrupções na cadeia de suprimentos.

A transição para a produção de aço verde semi-isolada também oferece sinergias significativas com esforços mais amplos de transição energética. Ao criar demanda flexível por eletricidade renovável e impulsionar o investimento em infraestrutura de hidrogênio, a produção de aço verde pode servir como uma âncora industrial para ecossistemas emergentes de energia limpa.

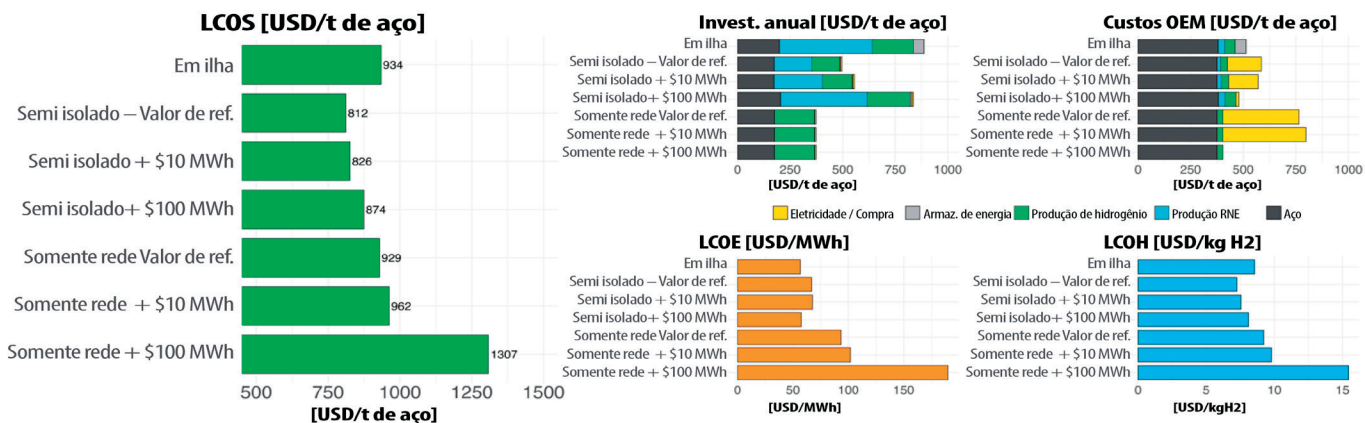


Figura 3.7: Detalhamento dos custos de produção de aço verde. O desempenho econômico de sistemas totalmente conectados à rede e sistemas semi-isolados é analisado sob diversos cenários de preços da rede.

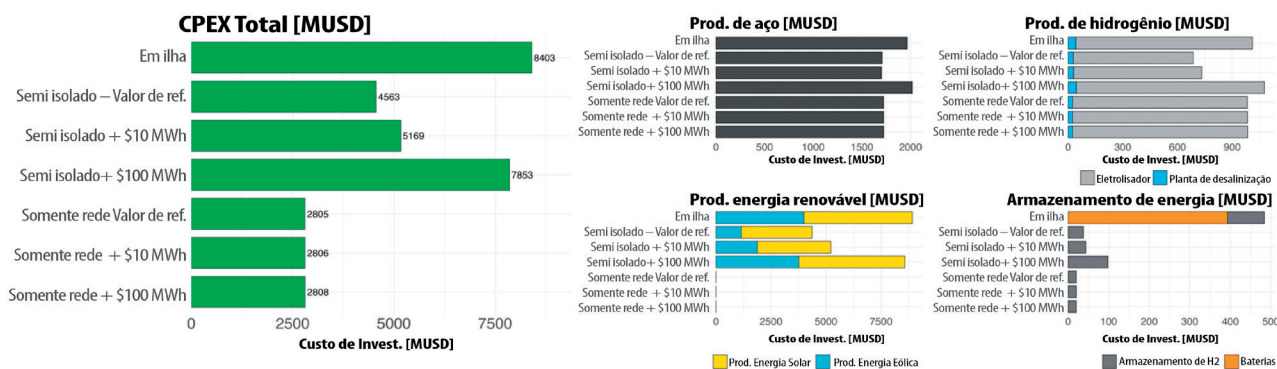


Figura 3.8: Detalhamento do CAPEX do aço verde. Análise de despesas de capital para diversas configurações de sistema com quatro gráficos à direita ilustrando os componentes do CAPEX total. Os resultados enfatizam o efeito substancial da produção de energia renovável no CAPEX total.

Emissões de GEE da produção de aço x Intensidade de emissão da rede

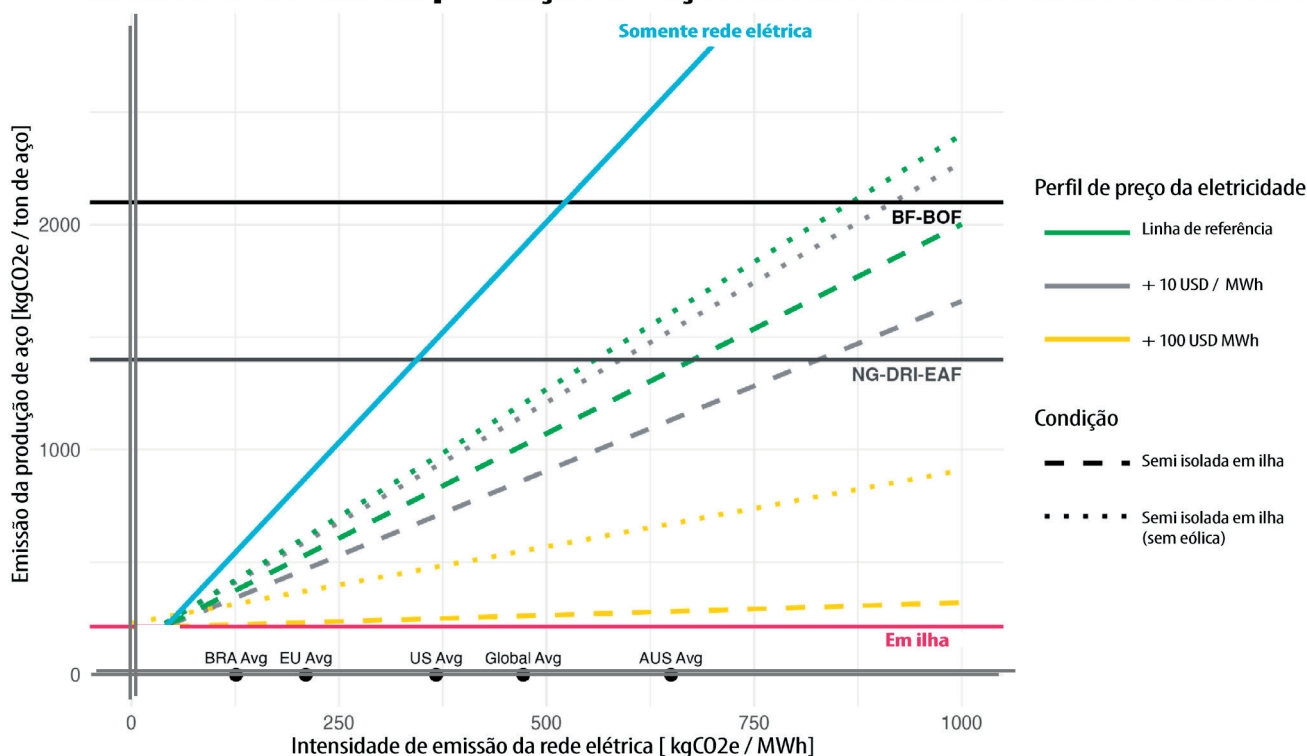


Figura 3.9: Emissão de gases do efeito estufa da produção de aço verde versus intensidade de emissão da rede elétrica.

Isso posiciona os produtores de aço como atores centrais no desenvolvimento econômico regional, em vez de receptores passivos das pressões da transição energética.

Principais conclusões sobre o aço verde

Primeiro, as siderúrgicas que combinam estrategicamente a eletrificação da rede com energias renováveis no local podem produzir aço mais verde a custos mais baixos do que instalações totalmente dependentes da rede ou totalmente isoladas, oferecendo um caminho prático para uma produção de aço mais limpa. Sistemas híbridos de energia otimizados com conectividade parcial à rede alcançam custos nivelados de aço (LCOS) 12-15% menores do que as alternativas que dependem exclusivamente da rede, com LCOS variando de US\$ 781-811/tonelada em comparação com US\$ 887-929/tonelada, enquanto permitem reduções de emissões de 46-84% em relação às rotas convencionais.

Segundo, investir mais inicialmente em energia renovável e sistemas de hidrogênio para a produção de aço acaba economizando dinheiro, reduzindo a exposição a preços imprevisíveis de eletrificação e criando oportunidades para se beneficiar das oscilações de preços nos mercados de energia. Embora as configurações semi-isoladas exijam um investimento inicial 60-84% maior (US\$ 4,5-7,9 bilhões versus US\$ 2,8-4,3 bilhões para sistemas somente conectados à rede), esse prêmio de capital proporciona uma economia superior ao longo do ciclo de vida por meio da redução dos custos operacionais e da arbitragem estratégica de energia durante períodos de volatilidade nos preços da rede.

Em terceiro lugar, a pesquisa revela que armazenar energia como hidrogênio — que pode ser usado posteriormente diretamente na produção de aço — faz mais sentido econômico do que baterias para a maioria das siderúrgicas, criando sinergias naturais entre o armazenamento de energia e as necessidades de fabricação. O hidrogênio surge consistentemente como o meio de armazenamento de energia preferido em todos os cenários de otimização, servindo a um duplo propósito como insumo de processo e reserva de energia, com o armazenamento em baterias tornando-se economicamente viável apenas sob condições específicas de alta volatilidade de preços.

Em quarto lugar, a flutuação dos preços da eletricidade, muitas vezes considerada um desafio para a indústria, pode, na verdade, beneficiar os produtores de aço com sistemas híbridos de energia, permitindo que comprem energia da rede quando estiver barata e usem sua própria energia renovável quando os preços dispararem.

Contra-intuitivamente, o aumento da volatilidade dos preços da rede elétrica reduziu consistentemente os custos gerais de produção, ao mesmo tempo que impulsionou o investimento na expansão da capacidade de armazenamento de energia, com o menor LCOS (custo nivelado de operação) alcançado nos cenários de maior volatilidade testados.

Perspectivas do Hidrogênio Verde

A competitividade de custos das tecnologias de aço verde dependerá de vários fatores, incluindo a disponibilidade e o custo da energia renovável, a eficiência dos eletrolisadores para a produção de hidrogênio e a evolução dos mecanismos de precificação do carbono. Outros estudos sugerem que o aço à base de hidrogênio verde poderá atingir a paridade de custos com os métodos convencionais se os preços do carbono aumentarem significativamente, na faixa de € 340 por tonelada de CO₂ (Morgan Stanley, 2023). O gráfico da IRENA (IRENA, 2020) ilustra uma significativa redução projetada nos custos de produção de hidrogênio de 2020 a 2050, impulsionada por dois fatores principais:

1. Redução dos custos dos eletrolisadores: de US\$ 650-1000/kW em 2020 para US\$ 130-307/kW em 2050, dependendo da capacidade instalada.
2. Redução dos preços do hidrogênio: São apresentados cenários para US\$ 65/MWh e US\$ 20/MWh.

Até 2050, espera-se que os custos do hidrogênio caiam para US\$ 1-3/kg H₂, com a faixa inferior tornando-se competitiva com a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis.

Essa redução projetada nos custos do hidrogênio tem implicações profundas para a produção de aço verde, particularmente em regiões com redes de baixa emissão e alto acesso a energia renovável:

1. Viabilidade econômica: À medida que os custos do hidrogênio diminuem, a viabilidade econômica da redução direta do ferro com hidrogênio (H₂-DRI) para a produção de aço melhora significativamente. Até 2030-2035, a produção de aço verde poderá se tornar competitiva em termos de custo com os métodos tradicionais de alto-forno em regiões com condições ideais.
2. Vantagens regionais: Áreas com redes de baixa emissão e abundantes recursos de energia renovável (por exemplo, Brasil, países nórdicos, partes da Austrália) terão uma vantagem competitiva significativa.

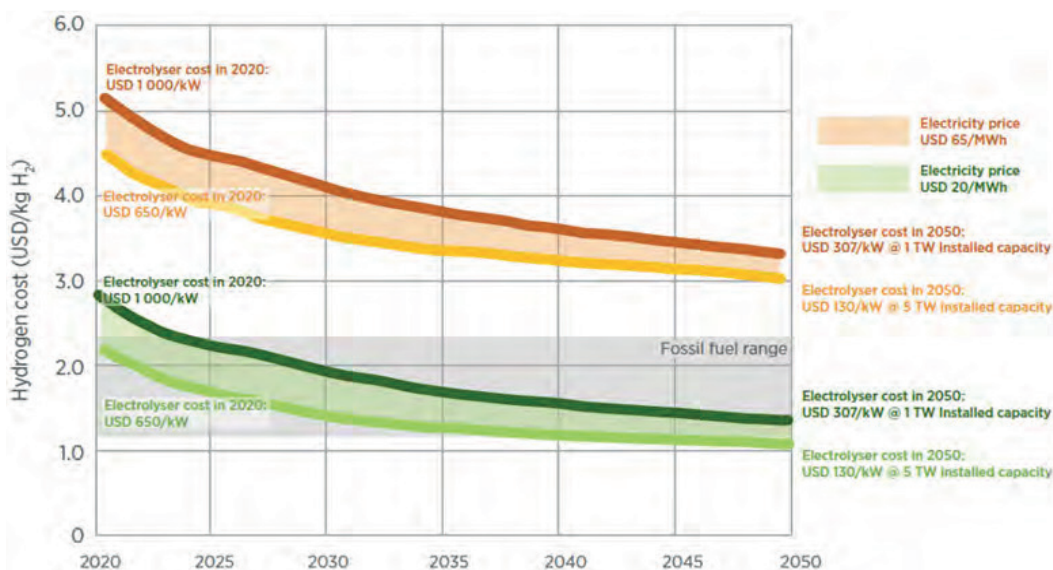


Figura 3.10: Previsão da IRENA para o custo de produção do hidrogênio até 2050 e implicações para o aço verde (IRENA)

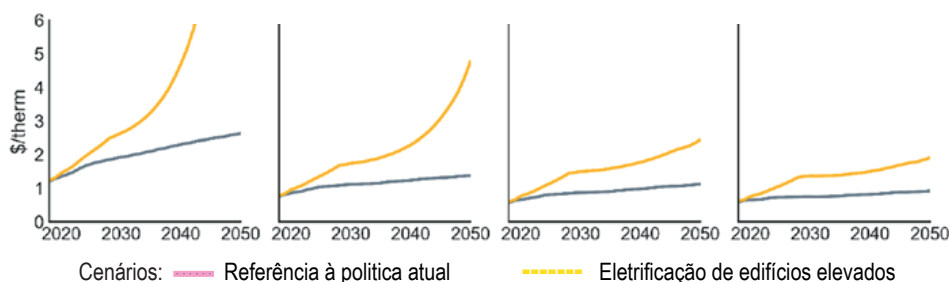


Figura 3.11: Aumento dos preços do gás natural na Califórnia, obtido de Mahone A. et al. (2020)

Essas regiões podem produzir hidrogênio verde na extremidade inferior do espectro de custos (US\$ 1-1,5/kg H₂ até 2050), tornando a produção de aço verde mais economicamente atraente. Para comparação, o custo nivelado do hidrogênio no estudo de aço verde do SRI variou de US\$ 7,25 a US\$ 15,43/kg.

3. Adoção acelerada: O rápido declínio nos custos de produção de hidrogênio pode acelerar a adoção de tecnologias de aço verde. Os produtores de aço em regiões favoráveis podem achar economicamente vantajoso fazer a transição para os métodos H₂-DRI mais cedo do que o previsto anteriormente.

4. Incentivos ao investimento: A clara trajetória de redução de custos oferece fortes incentivos para investimentos iniciais em tecnologias de aço verde. Empresas e regiões que investirem agora poderão obter uma vantagem competitiva significativa à medida que a tecnologia amadurece e os custos diminuem.

5. Implicações políticas: Governos em regiões com condições favoráveis para a produção de hidrogênio verde podem implementar políticas para apoiar o desenvolvimento de indústrias de aço verde, potencialmente criando novas oportunidades econômicas e mercados de exportação.

Considerações globais

A transição para o aço verde é um esforço global, com várias regiões posicionadas para desempenhar papéis significativos com base em seus recursos de energia renovável, infraestrutura industrial existente e cenários políticos.

O norte e o sul da África, com abundante potencial solar e eólico, estão bem posicionados para exportar hidrogênio verde ou ferro verde para a Europa, onde a demanda é alta devido às rigorosas políticas de descarbonização. Entretanto, o desenvolvimento de infraestrutura e a estabilidade política continuam sendo desafios (McKinsey, 2022).

A Austrália, uma das principais produtoras de minério de ferro, possui vastos recursos de energia renovável que podem ser aproveitados para a produção de hidrogênio verde. O ambiente de investimento estável do país e os avanços na tecnologia de beneficiamento o tornam um forte concorrente no mercado de aço verde.

A Europa, impulsionada por um forte apoio político e uma base industrial estabelecida, está na vanguarda da adoção do aço verde. Iniciativas como o Sistema de Comércio de Emissões da UE e o Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira estão criando incentivos para a descarbonização. Entretanto, a alta demanda de energia e os custos atuais do hidrogênio representam desafios (McKinsey, 2022).

A China e a Índia, responsáveis por dois terços das emissões globais de aço, enfrentam o duplo desafio de equilibrar o crescimento econômico com os compromissos climáticos.

A transição para o aço verde deverá ser gradual, influenciada pelo acesso a energias renováveis de baixo custo e pelo ritmo de adoção tecnológica (Morgan Stanley, 2023). Apesar da perspectiva positiva para o hidrogênio verde, vários desafios críticos permanecem:

1. Intensidade de Capital: Embora os custos operacionais estejam diminuindo, o investimento inicial em instalações de H₂-DRI permanece alto. Mecanismos financeiros e apoio político podem ser necessários para superar essa barreira.
2. Infraestrutura de Rede: As regiões precisarão investir em infraestrutura de rede para suportar o aumento da demanda elétrica por produção de hidrogênio em larga escala.
3. Maturidade Tecnológica: Embora a tecnologia H₂-DRI seja promissora, ainda precisa ser comprovada em escala industrial. O investimento contínuo em P&D é crucial.
4. Desenvolvimento de Mercado: O desenvolvimento de mercados de aço verde e mecanismos de precificação premium serão essenciais para apoiar a transição, especialmente nos estágios iniciais, quando os custos ainda podem ser maiores do que os dos métodos tradicionais.

Efeitos de segunda ordem da eletrificação

Por fim, a eletrificação mais ampla da economia tem ramificações na competitividade dos setores que fizerem a transição mais tarde. Mahone A. et al. (2020) concluíram, notavelmente, que a rápida eletrificação dos setores residencial e comercial na Califórnia levaria ao aumento dos preços do gás natural para aquecimento (devido a um menor número de consumidores da rede de gás para lidar com os custos fixos). Tal aumento impactaria não apenas esses setores, mas também a indústria. Uma estratégia focada na transição de edifícios primeiro, antes de se voltar para a indústria, leva, portanto, a uma perda de competitividade industrial.

As análises técnicas e econômicas dos caminhos de descarbonização industrial demonstram um potencial significativo ainda não explorado para a redução de emissões, mantendo a competitividade econômica. Essas descobertas exigem um exame mais amplo de como tais transformações podem remodelar os sistemas industriais e as estruturas econômicas. Adotando uma abordagem sistêmica, os formuladores de políticas também devem considerar as tendências emergentes no desenvolvimento industrial e suas implicações para as estruturas políticas, enfatizando a natureza interconectada da inovação tecnológica, da transformação econômica e dos objetivos de sustentabilidade.

4

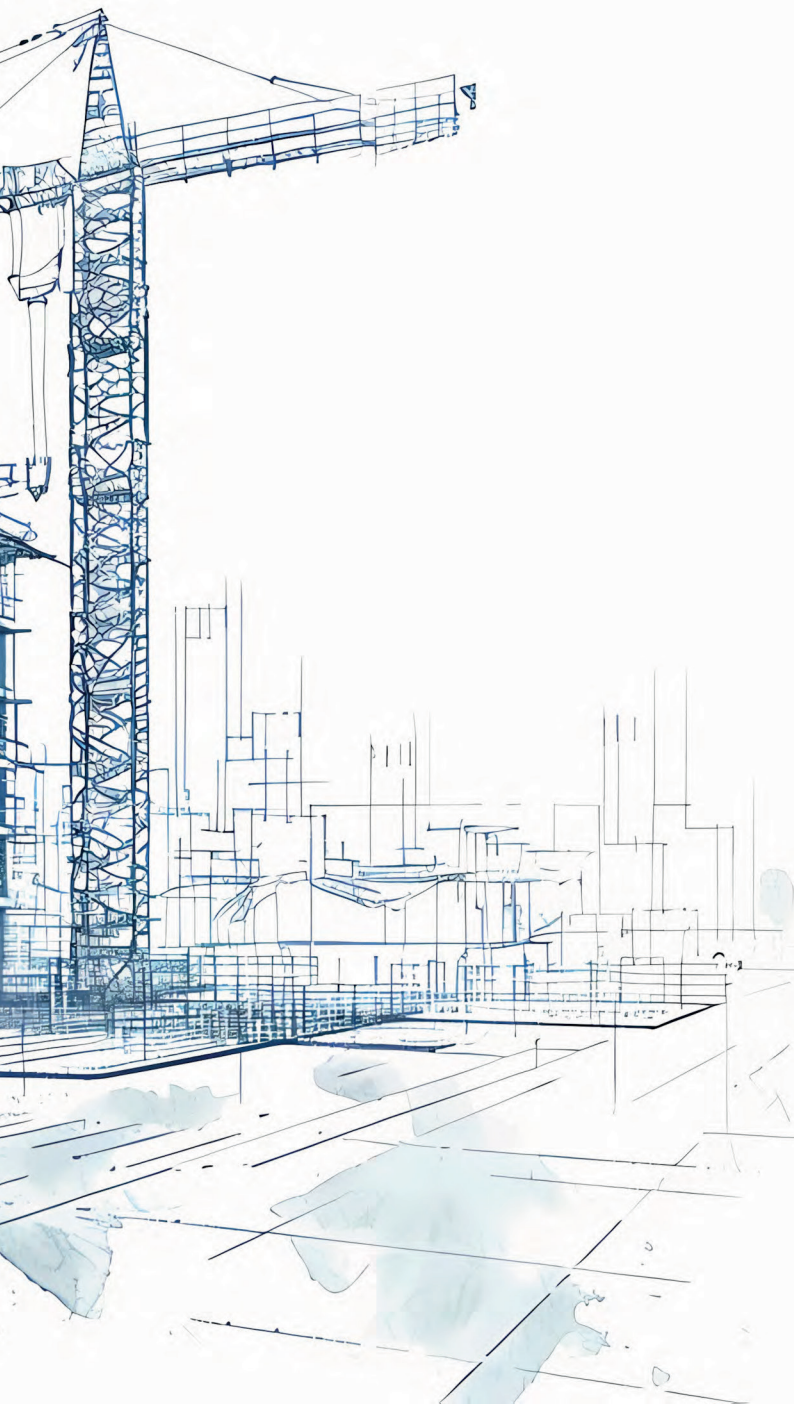
Desenvolvendo a indústria de construção do século 21



Desenvolvendo a indústria de construção do século 21

Uma indústria circular

Uma descoberta fundamental do exercício de cenários do Capítulo 2 é o papel central da circularidade em qualquer trajetória de descarbonização bem-sucedida. Apesar da crescente conscientização da importância da circularidade, o setor da construção civil permanece amplamente linear em sua abordagem. O relatório Global Circularity Gap 2023 indica que a economia global é apenas 7,2% circular em todos os materiais, uma queda em relação aos 9,1% em 2018 (Circle Economy, 2023). Essa tendência de queda é parcialmente atribuída ao aumento contínuo na taxa de extração de materiais, particularmente no setor da construção civil.



Sinergias e circularidade do setor da construção civil

Como um dos maiores contribuintes para as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), a indústria da construção civil enfrenta desafios sem precedentes para reduzir seu impacto ambiental, ao mesmo tempo que atende à crescente demanda por infraestrutura e moradia em todo o mundo.

De acordo com o World Green Building Council, os edifícios são responsáveis por 39% das emissões globais de carbono relacionadas à energia, sendo 28% provenientes de emissões operacionais e 11% do carbono incorporado em materiais e processos de construção. Esse número impressionante ressalta a necessidade urgente de mudanças transformadoras na forma como projetamos, construímos e operamos nosso ambiente construído.

O carbono incorporado, por muito tempo negligenciado nos esforços de sustentabilidade, emergiu como uma área de foco crítica. Ele engloba as emissões de GEE associadas à fabricação, transporte, instalação, manutenção e descarte de materiais de construção ao longo do ciclo de vida de um edifício. À medida que avançamos em direção a edifícios mais eficientes em termos energéticos, com menores emissões operacionais, a importância relativa do carbono incorporado aumenta. Estudos sugerem que até dois terços da pegada de carbono total de um edifício de alto desempenho construído em 2020 podem ser atribuídos ao carbono incorporado emitido nos primeiros dez anos de sua vida útil (Carbon Leadership Forum).

A urgência de abordar o carbono incorporado é ainda mais enfatizada pelo conceito de “bloqueio de carbono”, que reconhece o tempo limitado restante antes de atingirmos pontos críticos de inflexão climática. Ao contrário das emissões operacionais, que podem ser reduzidas ao longo do tempo por meio de melhorias na eficiência e descarbonização da rede elétrica, o carbono incorporado é liberado antecipadamente e impacta imediatamente o clima.

Em resposta a esses desafios, a indústria da construção civil está cada vez mais voltada para os princípios da economia circular como um caminho para a sustentabilidade. A Fundação Ellen MacArthur destaca que a aplicação dos princípios da economia circular ao ambiente construído poderia reduzir as emissões globais de CO₂ provenientes de materiais de construção em 38% até 2050. Essa abordagem envolve repensar os processos de projeto, aproveitar novas tecnologias e implementar modelos de negócios inovadores para capturar mais valor dos ativos existentes, manter recursos e materiais em uso e evitar a geração de resíduos.

Insights técnicos: Redução do carbono incorporado e outros impactos

Nosso estudo (Kwan, 2024c) teve como objetivo abordar a necessidade de estratégias na fase de projeto para reduzir os impactos incorporados em edifícios. Ao examinar um grande conjunto de dados com mais de 550 edifícios em diversos arquétipos e regiões, a pesquisa oferece insights sobre a eficácia de diferentes abordagens não apenas na redução do potencial de aquecimento global (GWP), mas também no impacto sobre o potencial de esgotamento da água (WDP), o potencial de esgotamento de combustíveis fósseis (FDP) e a ecotoxicidade.

O estudo emprega uma estrutura abrangente para avaliar os impactos ambientais dos materiais de construção, com foco no escopo “do berço ao portão”, que engloba os impactos desde a extração da matéria-prima, o transporte até as instalações de fabricação e a fabricação final do material de construção.

Este escopo reflete a abordagem da fase de projeto e está alinhado com as normas ISO 21930:2017.

Um aspecto fundamental da pesquisa é o desenvolvimento e uso de um fluxo de trabalho digital simples para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) rápida e em nível de triagem. Essa abordagem demonstra como as tecnologias digitais da fase de projeto podem ser desenvolvidas e implementadas de maneira flexível, escalável e simples, abordando um dos principais desafios na implementação da avaliação de impacto incorporado no estágio inicial do projeto – a necessidade de informações rápidas, confiáveis e práticas.

Investigamos três estratégias de mitigação de impacto informadas por estratégias circulares:

1. Substituição de Materiais (SM): Substituir o uso de concreto e aço por madeira (também conhecida como Madeira Maciça), sem comprometer a integridade estrutural. A substituição de materiais tradicionais por alternativas de baixo carbono também pode levar a reduções substanciais no carbono incorporado:

Madeira Maciça: A madeira laminada cruzada (CLT) e outros produtos de madeira engenheirada armazenam carbono e têm uma pegada de carbono menor em comparação com o aço e o concreto.

Concreto de baixo carbono: Inovações como o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), como escória, cinzas volantes e outros materiais pozolânicos, podem reduzir o carbono incorporado do concreto em 14 a 33%.

2. Eficiência de materiais (EM): Reduzir a intensidade de materiais aplicando fatores de escala para diminuir a quantidade do material em questão. A eficiência de materiais envolve otimizar o uso de materiais para minimizar o desperdício e reduzir a pegada de carbono geral. As estratégias incluem:

Otimização do projeto: Alinhar os sistemas estruturais para reduzir a necessidade de materiais com altas emissões, como lajes de transferência de concreto.

Construção modular e pré-fabricada: Essas técnicas podem reduzir significativamente o desperdício e melhorar a eficiência de materiais, produzindo componentes em ambientes controlados.

3. Conteúdo reciclado (CR): Aumentar o uso de material reciclado aplicando uma proporção de deslocamento de massa de 1:1 entre um material virgem e sua contraparte reciclada. A incorporação de materiais reciclados na construção não só reduz a necessidade de extração de matéria-prima virgem, como também diminui a pegada de carbono associada à produção de materiais:

Aço reciclado: O uso de aço produzido em fornos elétricos a arco com alto teor de material reciclado pode reduzir significativamente o carbono incorporado.

Agregados reciclados para concreto: O uso de agregados reciclados no concreto pode reduzir o carbono incorporado em novas misturas de concreto.

Madeira e tijolos reaproveitados: A reutilização de materiais de edifícios demolidos pode mantê-los na economia e reduzir o impacto ambiental da produção de novos materiais.

Essas estratégias são implementadas com percentuais variáveis para abranger situações realistas e ideais, proporcionando uma compreensão abrangente de seus impactos potenciais. Entretanto, em vez de analisar grandes bibliotecas de materiais,

em edifícios, focamos apenas em alguns materiais selecionados: aço, concreto e cimento, e tijolos.

A abordagem visa simplificar a atenção do setor da construção civil para reduzir os impactos incorporados, afastando-os da vasta gama de materiais, a fim de elucidar o impacto que esses materiais têm em relação ao edifício como um todo. Nosso estudo mostra que esses materiais têm um impacto ambiental substancialmente maior em comparação com os outros materiais, e a redução do impacto deles reduzirá significativamente o impacto de todo o edifício. Isso se deve não apenas à intensidade de carbono do próprio material, mas também à quantidade utilizada na construção (valores absolutos).

Materiais-chave em edifícios

Cimento e concreto

A produção de cimento contribui significativamente para as emissões globais de CO₂, representando aproximadamente 8% das emissões totais (Adesina, 2020). Diversas tecnologias e estratégias estão sendo desenvolvidas e implementadas para reduzir a pegada de carbono do cimento e do concreto:

Materiais Cimentícios Suplementares (MCS): A incorporação de materiais como cinzas volantes, escória e sílica ativa pode reduzir a intensidade de carbono do concreto em até 40% (Adesina, 2020).

Concreto com emissão negativa de carbono: Abordagens inovadoras como a tecnologia CarbiCrete substituem o cimento por escória de aço e utilizam o CO₂ capturado no processo de cura, criando concreto com emissão negativa de carbono. Uma fábrica típica de blocos de concreto (CMU) que adota essa tecnologia poderia incorporar até 1500 kg de CO₂ nos produtos e evitar 3000 kg de emissões de CO₂ anualmente (CarbiCrete, s.d.).

Geopolímeros e materiais ativados por álcalis: Esses aglomerantes alternativos mostram-se promissores na redução da pegada de carbono do concreto, mantendo ou melhorando suas características de desempenho.

Aço

A produção de aço é altamente intensiva em energia e contribui significativamente para a pegada de carbono do setor da construção (ver Capítulo 3). Tecnologias para reduzir as emissões incluem:

Fornos elétricos a arco (FEA): A transição de altos-fornos tradicionais para FEAs na produção de aço, especialmente com o uso de aço reciclado, pode reduzir as emissões em até 75%.

Aço de alta resistência: O uso de aço de alta resistência permite menor consumo de material, mantendo a integridade estrutural.

Tijolos

A produção de tijolos consome muita energia devido ao processo de queima em alta temperatura. Estratégias para reduzir o carbono incorporado nos tijolos incluem:

Materiais Alternativos: Incorporar materiais residuais, como vidro ou subprodutos industriais, na produção de tijolos reduz o carbono incorporado.

Queima em Baixa Temperatura: Desenvolver tijolos que possam ser queimados em temperaturas mais baixas reduz o consumo de energia e as emissões associadas.

Escopo da Extração do material até a saída da fábrica
Alteração do impacto em relação ao edifício completo
para cada estratégia de mitigação implementada,
considerando apenas aço, concreto, cimento e tijolos.

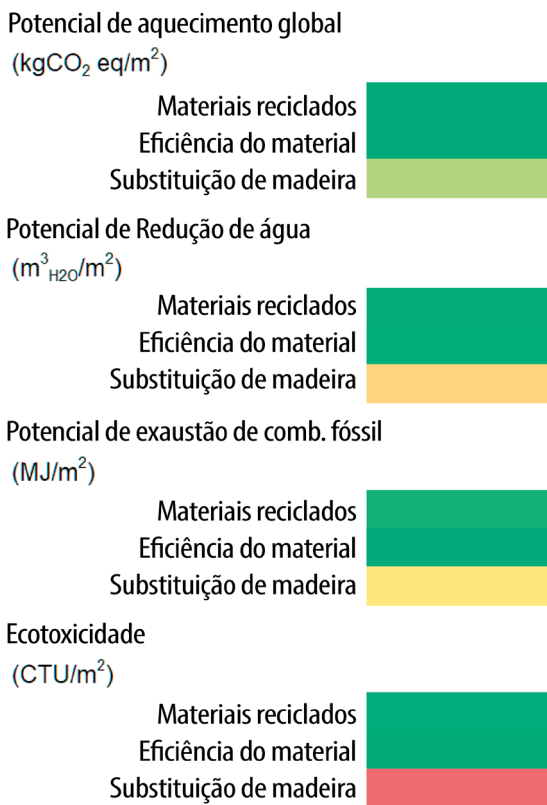


Figura 4.1: Resumo geral da mudança do impacto em todo o edifício para cada estratégia de mitigação. Apresentado em uma escala de cores onde o verde mais escuro é melhor, indicando uma redução no impacto incorporado, e o vermelho indica um aumento no impacto incorporado.

Considerações importantes na redução do carbono incorporado em edifícios:

1. As estratégias de eficiência de materiais e conteúdo reciclado para os materiais selecionados são altamente eficazes na redução dos impactos incorporados em todas as categorias estudadas para todo o edifício.

Para cada 1% de implementação dessas estratégias, obtém-se uma redução de aproximadamente 0,7 a 0,8% no potencial de aquecimento global, no potencial de esgotamento da água, no potencial de esgotamento de combustíveis fósseis e na ecotoxicidade. Essa relação quase linear fornece uma diretriz clara e prática para projetistas e formuladores de políticas. A eficácia dessas estratégias é consistente em diferentes tipos de edifícios e regiões, demonstrando sua ampla aplicabilidade no projeto de edifícios sustentáveis.

2. Quatro materiais principais – aço, cimento, concreto e tijolos – influenciam significativamente o impacto incorporado dos edifícios.

Essa descoberta simplifica a complexidade da análise necessária para as Avaliações do Ciclo de Vida (ACV) de nível de triagem durante a fase de projeto, permitindo que os projetistas se concentrem nesses materiais de alto impacto. O estudo revela que esses materiais representam consistentemente uma grande proporção dos impactos incorporados em todas as categorias estudadas.

Tabela 1: Comparação das reduções do impacto alcançado por meio de diferentes estratégias de circularidade, com 30% de implementação para edifícios residenciais e não residenciais.

	Não Residencial	Residencial
Potencial de aquecimento global (kgCO₂eq/m²)		
Caso de referência	392	251
30% de materiais reciclados	297	195
30% de eficiência do material	294	190
30% de substituição de madeira	362	231
Potencial de exaustão de água (m³_{H₂O}/m²)		
Caso de referência	2.3	1.3
30% de materiais reciclados	1.8	1.1
30% de eficiência do material	1.8	1.1
30% de substituição de madeira	2.1	1.3
Potencial de exaustão de comb. fóssil (MJ/m²)		
Caso de referência	3760	2353
30% de materiais reciclados	2927	1884
30% de eficiência do material	2851	1842
30% de substituição de madeira	3584	2299
Ecotoxicidade (CTU/m²)		
Caso de referência	203	127
30% de materiais reciclados	161	102
30% de eficiência do material	160	102
30% de substituição de madeira	208	140

* Médias relatadas a partir de um conjunto de dados amplo (>550 edifícios) e aleatório; resultados interpretados quanto à direção.

Por exemplo, em edifícios não residenciais, o aço e o concreto contribuem significativamente para o GWP (Potencial de Aquecimento Global), sugerindo que o direcionamento desses materiais por meio de estratégias de eficiência de materiais e materiais reciclados poderia gerar benefícios substanciais.

3. Existe uma clara relação entre água, energia, carbono e ecotoxicidade para materiais de construção essenciais.

Estratégias que visam uma categoria de impacto provavelmente terão benefícios colaterais em outras, apresentando desafios e oportunidades para a redução holística do impacto. Essa relação ressalta a importância de considerar múltiplos impactos ambientais simultaneamente ao tomar decisões de projeto, em vez de focar apenas nas emissões de carbono.

4. A substituição da madeira apresenta resultados mistos entre as categorias de impacto.

Embora eficaz na redução do potencial de aquecimento global, a substituição da madeira mostra benefícios mínimos ou até mesmo aumentos em outras categorias de impacto, como a ecotoxicidade, destacando a necessidade de uma consideração cuidadosa das compensações na seleção de materiais. Essa descoberta enfatiza a importância de uma abordagem holística para o projeto de construção sustentável que considere múltiplas categorias de impacto ambiental.

Ao demonstrar o impacto substancial das decisões iniciais de projeto na pegada ambiental de um edifício, esta pesquisa enfatiza a importância crucial de integrar avaliações de impacto incorporado ao processo de projeto.

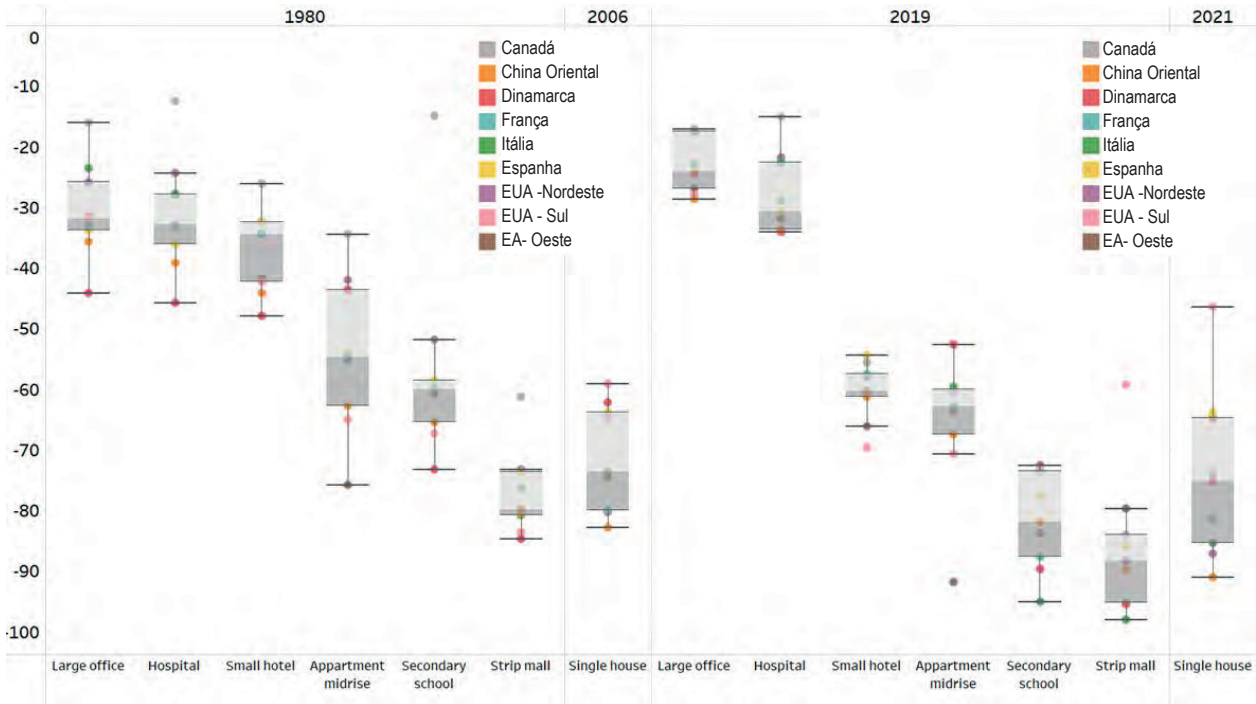


Figura 4.2: Economia anual na conta de energia, por tipo de edifício, tempo e região (Minier, 2024)

A relação quase linear entre a implementação da estratégia e a redução do impacto fornece uma ferramenta poderosa para que projetistas e formuladores de políticas estabeleçam metas tangíveis e mensurem o progresso no projeto de edifícios sustentáveis.

A identificação de materiais-chave que influenciam significativamente os impactos incorporados oferece uma abordagem focada na seleção e otimização de materiais. Esse conhecimento pode direcionar o foco para os materiais mais importantes, o desenvolvimento de alternativas de baixo impacto e incentivar a ampliação do uso de materiais reciclados na construção. O nexa revelado entre água, energia, carbono e ecotoxicidade também apresenta uma oportunidade para estratégias de sustentabilidade mais abrangentes que abordem múltiplas preocupações ambientais simultaneamente.

O estudo pode informar diversas partes interessadas na indústria da construção:

Para projetistas e arquitetos, essas descobertas ressaltam a importância de considerar os impactos incorporados desde os estágios iniciais do processo de projeto. O estudo mostra que as decisões tomadas durante a fase de projeto conceitual podem ter consequências de longo alcance para o desempenho ambiental de um edifício ao longo de seu ciclo de vida. Ao implementar estratégias de eficiência de materiais e incorporar materiais reciclados, os projetistas podem potencialmente alcançar reduções significativas nos impactos incorporados em todas as categorias estudadas.

Para as indústrias do aço e do cimento, que são as principais contribuintes para o carbono incorporado em edifícios, este estudo reforça a urgência dos esforços de descarbonização. Os resultados, que mostram o aço e o concreto consistentemente entre os maiores contribuintes para o carbono incorporado em todos os tipos de edifícios, destacam a enorme influência que essas indústrias têm na pegada climática da construção e dos edifícios. Isso enfatiza a necessidade de ampliação e criação de mercado para produtos de aço e cimento de baixo carbono, bem como a exploração de materiais alternativos. Para os formuladores de políticas, os resultados fornecem evidências claras do potencial para reduções

significativas do impacto incorporado por meio de decisões da fase de projeto. Isso resalta a necessidade de políticas e regulamentações que incentivem ou exijam a consideração dos impactos incorporados no projeto e construção de edifícios. A relação quase linear entre a implementação da estratégia e a redução do impacto oferece uma base direta para definir metas e medir o progresso.

Utilizamos e, portanto, destacamos o papel crítico das tecnologias digitais para viabilizar avaliações abrangentes de impacto incorporado. A capacidade de avaliar e comparar rapidamente os impactos incorporados de centenas de edifícios depende de ferramentas avançadas de modelagem e análise de dados. Desenvolvemos e empregamos uma ferramenta simples para avaliar um grande conjunto de dados de edifícios e demonstramos ainda que focar em apenas alguns materiais-chave fornece informações suficientes durante o processo iterativo de projeto para influenciar significativamente os impactos incorporados de edifícios completos. Essa abordagem aborda um dos principais desafios na implementação da avaliação de impacto incorporado no estágio inicial do projeto - a necessidade de informações rápidas, confiáveis e acionáveis. À medida que essas tecnologias continuam a evoluir, elas aprimorarão ainda mais a capacidade dos projetistas de otimizar edifícios para reduzir o impacto ambiental. Os sistemas de Modelagem da Informação da Construção (BIM) integrados com recursos de avaliação do ciclo de vida, por exemplo, podem permitir a avaliação em tempo real do impacto das decisões de projeto nos impactos incorporados.

Fornecemos uma estrutura para reduzir os impactos ambientais incorporados dos edifícios por meio de decisões na fase de projeto. Ao demonstrar a eficácia das estratégias de eficiência de materiais e conteúdo reciclado, identificar os principais materiais de foco e revelar a interconexão de diferentes impactos ambientais, esta pesquisa oferece um roteiro para práticas de construção mais sustentáveis.

É essencial observar que, embora esses termos sejam usados neste artigo, os impactos “incorporados” completos vão além do escopo de A3 e incluem estágios adicionais do ciclo de vida, como construção (A4-A5), uso (B1-B7) e fim de vida (C1-C4).

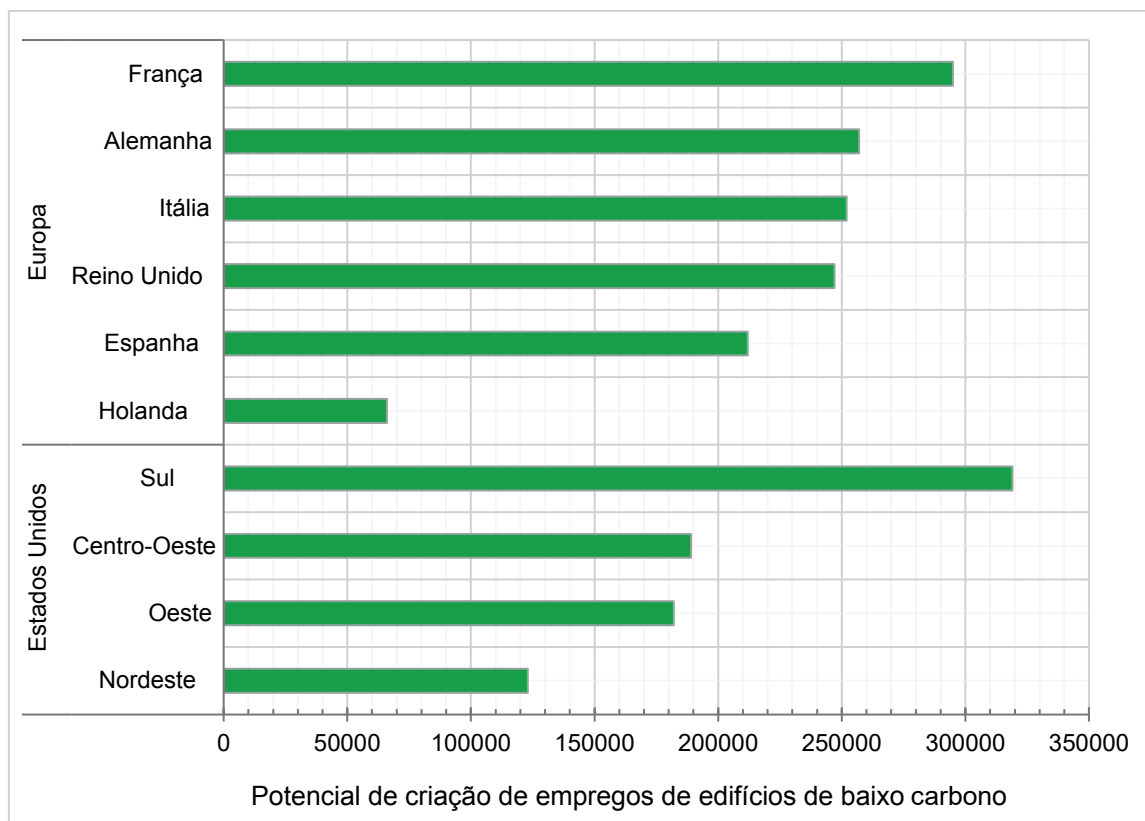


Figura 4.3: Potencial de criação de empregos da transição para edifícios descarbonizados do futuro (Sovacool, Evensen, et al., 2023)

Por exemplo, a Energia Incorporada abrange não apenas os insumos energéticos durante a produção de materiais (capturados pelo FDP dentro de A1-A3), mas também a energia utilizada na construção, manutenção e eventual demolição. Da mesma forma, a Água Incorporada e o Carbono Incorporado incluem impactos dessas etapas posteriores que não são contabilizados no escopo de A1-A3.

Embora muitas tecnologias de baixo carbono sejam promissoras, sua adoção geralmente envolve custos iniciais mais elevados. No entanto, economias a longo prazo e potenciais incentivos regulatórios podem compensar esses investimentos iniciais. Análises técnico-econômicas são cruciais para avaliar o desempenho e a durabilidade a longo prazo de materiais de baixo carbono em comparação com as opções tradicionais.

Outros estudos indicam que cimento, aço e tijolo contribuem coletivamente com mais de 70% da pegada energética e de carbono dos materiais de construção (Myint, 2024). A implementação de tecnologias de concreto com emissão negativa de carbono, como o CarbiCrete, em uma fábrica típica de blocos de concreto poderia resultar em sequestro de carbono equivalente ao de 74,4 mudas de árvores cultivadas por 10 anos (CarbiCrete, s.d.).

O Fórum Econômico Mundial (WEF) enfatiza a necessidade de uma abordagem sistêmica para a circularidade na construção. Seu relatório “Cidades com Emissões Líquidas Zero de Carbono: Uma Abordagem Integrada” destaca a importância de integrar os princípios da economia circular ao planejamento urbano e ao projeto de edifícios (WEF, 2021).

A pesquisa acadêmica também está contribuindo para o avanço das práticas de construção circular. Uma revisão abrangente de Benachio et al. (2020) no *Journal of Cleaner Production* identifica os principais facilitadores para a implementação da economia circular no setor de construção, incluindo a colaboração em toda a cadeia de suprimentos, novos modelos de negócios, apoio regulatório e novas perspectivas/inovações em materiais e técnicas de construção, como demonstrado aqui.

O Construction Innovation Hub, uma iniciativa de pesquisa sediada no Reino Unido, está a desenvolver de forma pioneira uma abordagem de “Plataforma” para o design para fabricação e montagem (PdFMA). Esta abordagem visa padronizar e modularizar os componentes de construção, facilitando a sua reutilização e reciclagem (Construction Innovation Hub, 2021).

Embora o setor da construção enfrente desafios significativos na transição para um modelo circular, os benefícios potenciais em termos de redução do impacto ambiental e eficiência de recursos são substanciais. Como destacado pela IEA (2021), atingir emissões líquidas zero no setor da construção até 2050 exigirá uma combinação de medidas de eficiência energética, eletrificação e princípios da economia circular. Os principais desafios na implementação da circularidade na construção incluem:

1. **Desperdício de Materiais:** A indústria da construção gera um desperdício significativo, com estimativas que sugerem que até 30% de todos os materiais de construção entregues a um canteiro de obras típico podem acabar como resíduos (Benachio et al., 2020).
2. **Projeto para Desconstrução:** Muitos edifícios não são projetados levando em consideração o fim de sua vida útil, o que dificulta a recuperação e a reutilização de materiais.
3. **Barreiras de Mercado e Culturais:** Frequentemente, há resistência à mudança dentro do setor e falta de conscientização sobre os benefícios das práticas circulares.
4. **Questões Regulatórias e Políticas:** Regulamentações inconsistentes e a falta de métricas padronizadas para medir e relatar a circularidade podem impedir o progresso.

O setor da construção civil pode desempenhar um papel transformador no enfrentamento de desafios globais como mudanças climáticas, escassez de recursos e gestão de resíduos, além de criar novas oportunidades para inovação e crescimento econômico.

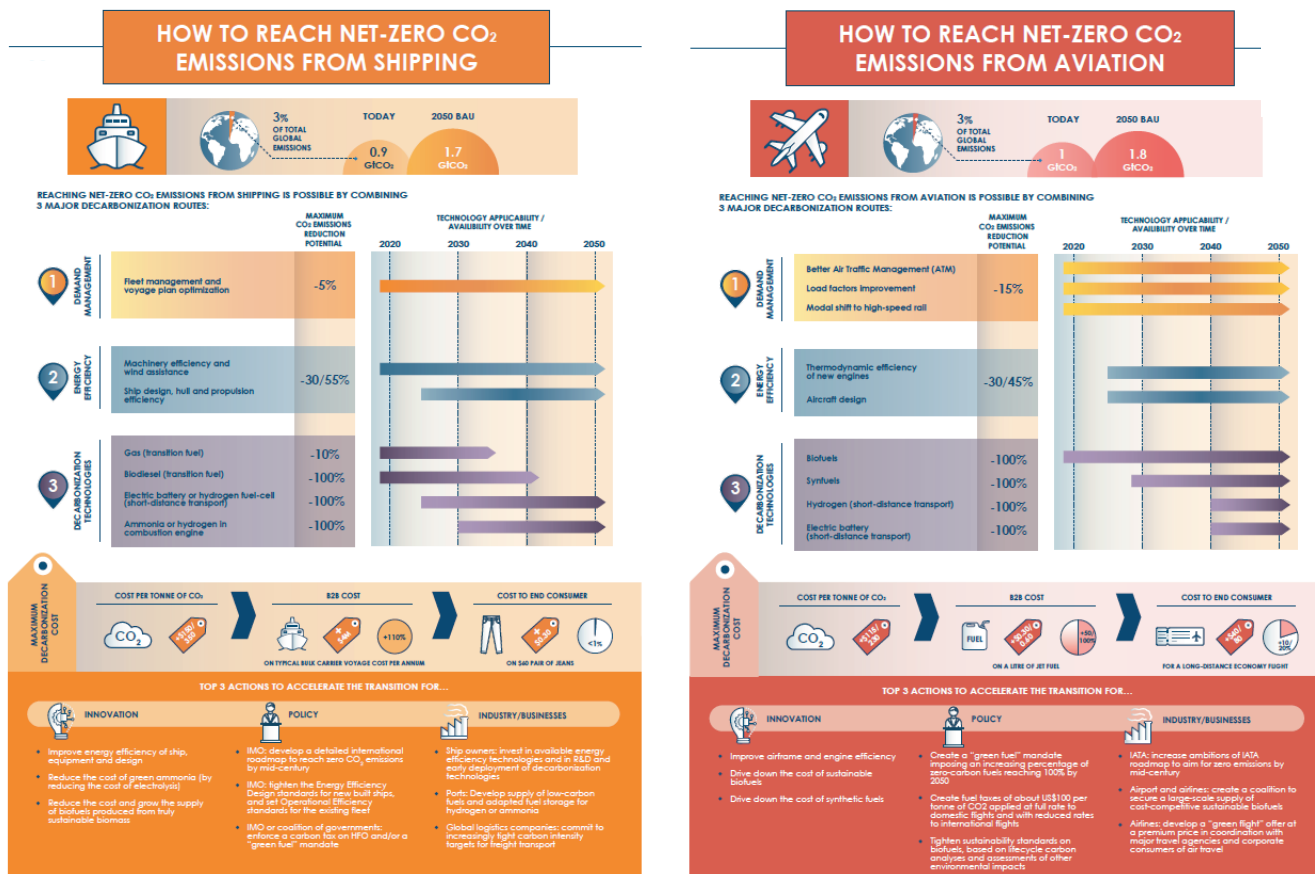


Figura 4.4: Caminhos para a mobilidade descarbonizada (Energy Transitions Commission, 2018)

Novas indústrias

A descarbonização de edifícios precisa de um novo ecossistema industrial.

O parque imobiliário precisa atingir emissões líquidas zero até meados do século, e os principais desafios também se aplicam ao parque existente e às emissões operacionais em geral. Uma rota fundamental, agora cada vez mais consensual, é a adoção combinada de eletrificação, geração distribuída e controles digitais em ambientes prediais.

Um estudo pioneiro sobre esse potencial em uma variedade de ambientes prediais em diferentes regiões mostra resultados consistentes em termos de descarbonização, com potenciais de economia de CO₂ variando entre 20% e 80% em diferentes tipos de edifícios e regiões. Uma vez implementados os investimentos, essas economias aumentam ainda mais ao longo dos anos, à medida que a matriz energética se descarboniza.

Mais importante ainda, essa transição traz um benefício líquido para os moradores, com economias nas contas anuais de energia variando entre 15% e 80% para ambientes comerciais e entre 60% e 90% para residências, como mostrado na Figura 4.2. Os retornos do investimento ainda variam significativamente entre diferentes tipos de edifícios e regiões. Atualmente, são mais favoráveis em novas construções e edifícios comerciais. Finalmente, essa combinação de tecnologias ajuda a mitigar o impacto da eletrificação no reforço das redes elétricas, contribuindo assim para acelerar a transição do parque elétrico (Minier, 2024).

Ainda existe um potencial considerável para cadeias de valor mais eficientes, um tema que somente um ecossistema industrial local vibrante pode contribuir para viabilizar. Um estudo complementar da Schneider Electric e da Universidade de Boston também estimou que impulsionar essa transição em larga escala poderia levar à criação de mais de 2 milhões de empregos na indústria somente nos EUA e na Europa, como mostra a Figura 4.3.

A descarbonização da mobilidade exige mais do setor

A mobilidade “difícil de reduzir” reúne os setores de transporte marítimo e aéreo, e não existe tecnologia de eletrificação conhecida para atender esses setores, que representam cerca de 25% das emissões totais do transporte (ClimateWatch, 2022).

O consenso geral entre os especialistas agora converge para o desenvolvimento de combustíveis alternativos, com os biocombustíveis (principalmente para a aviação) e os combustíveis sintéticos (por exemplo, amônia) potencialmente desempenhando um papel de liderança, com seus caminhos delineados na Figura 4.4 (Energy Transitions Commission, 2018, 2020).

A indústria, e principalmente a indústria química, desempenhará, portanto, um papel de liderança. O exame das tendências industriais emergentes e suas implicações para a transformação econômica revela interdependências entre inovação tecnológica, dinâmica de mercado e estruturas políticas. Isso informa o desenvolvimento de estratégias para a descarbonização industrial que alinham os objetivos ambientais com as metas de desenvolvimento econômico.



5 Cenários estratégicos



Cenário estratégico

Este relatório forneceu diversas informações sobre a transição energética. Elas não são de forma alguma exaustivas, mas refletem uma parte do trabalho do Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ (e parceiros) nos últimos anos. Esperamos que elas possam contribuir para os planos ambiciosos do MDIC e do Brasil como um todo.

A análise apresentada demonstra a interação entre inovação tecnológica, oportunidades econômicas e marcos políticos para promover a descarbonização industrial, ao mesmo tempo em que se desenvolve vantagem competitiva. Os resultados da pesquisa revelam diversos caminhos para mudanças transformadoras, apoiados por evidências e análises técnico-econômicas em múltiplos setores e regiões.

A eletrificação industrial é uma estratégia fundamental, com significativo potencial inexplorado para implementação imediata. A análise demonstra que o aumento da participação da eletricidade no consumo de energia industrial pode aprimorar a competitividade, especialmente em regiões com recursos de energia renovável vantajosos e infraestrutura de rede de baixo carbono. Essas descobertas desafiam as suposições convencionais sobre as barreiras econômicas à descarbonização industrial e sugerem oportunidades para vantagens competitivas iniciais.

A pesquisa identifica sinergias cruciais entre a transformação industrial e objetivos mais amplos de desenvolvimento econômico. A análise do setor da construção revela como os princípios da economia circular podem remodelar fundamentalmente os fluxos de materiais e a demanda por processos industriais associados, reduzindo significativamente as emissões de CO₂ dos materiais de construção até 2050. Essa transformação exige o desenvolvimento de novos ecossistemas industriais e cria oportunidades para a geração de empregos e a diversificação econômica.

As tecnologias digitais e as abordagens de otimização integrada também são facilitadoras essenciais para a descarbonização industrial, particularmente na gestão de sistemas de produção flexíveis e na otimização do uso de energia. Os estudos de caso apresentados demonstram como essas tecnologias podem aprimorar o desempenho ambiental e econômico, sugerindo um caminho claro para a inovação tecnológica e a modernização industrial.

Próximos passos

Os resultados indicam duas áreas críticas que exigem atenção imediata:

Desenvolvimento de um quadro político

Apoio a políticas industriais abrangentes que alinhem a sustentabilidade ambiental com os objetivos de crescimento econômico

Desenvolvimento de mecanismos de apoio direcionados à eletrificação industrial e à modernização da infraestrutura

Criação de estruturas de incentivo para práticas de economia circular e novos ecossistemas industriais

Implementação estratégica

Início de avaliações técnicas detalhadas para setores prioritários

Desenvolvimento de roteiros específicos para a transformação industrial, com marcos e métricas claros

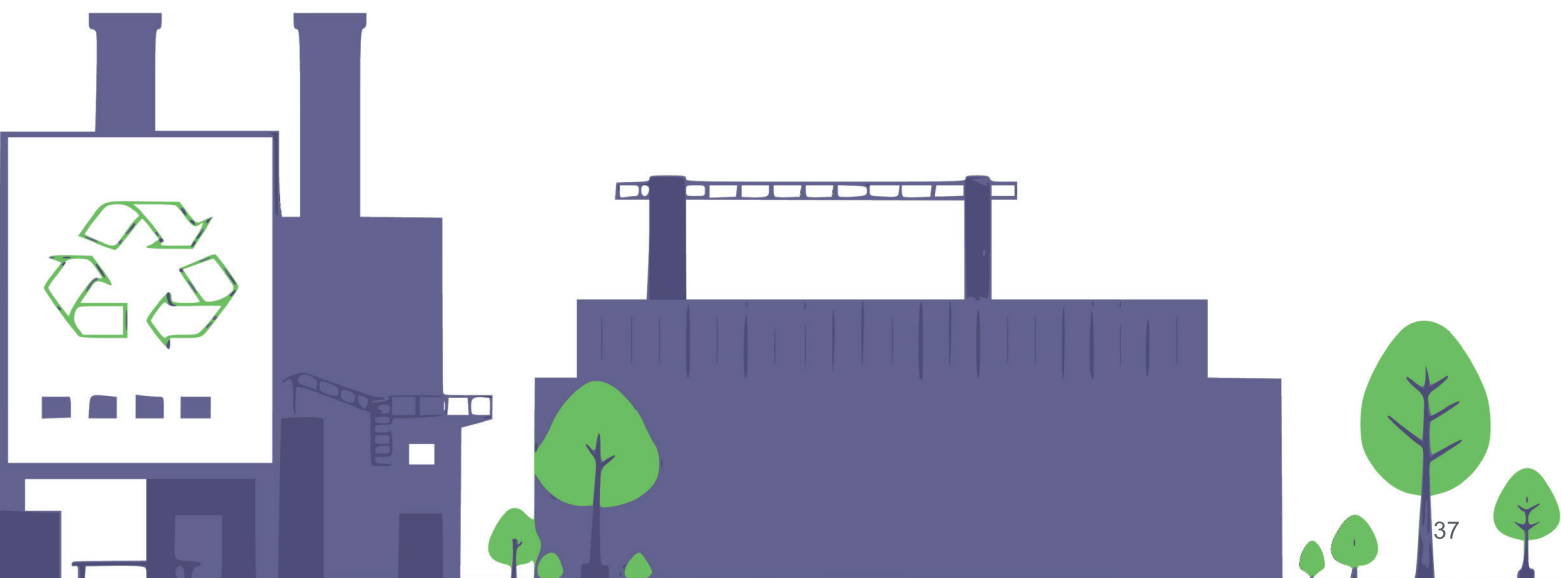
Formação de parcerias público-privadas para acelerar a adoção de tecnologias e a inovação

Em tempos de COP30, o Instituto de Pesquisa em Sustentabilidade da Schneider Electric™ apoiará estas próximas etapas por meio de:

Realizar análises de cenários abrangentes específicas para o contexto brasileiro

Fornecer insights para o desenvolvimento e implementação de políticas

Continuar o diálogo sobre estratégias de transformação, incluindo discussões com o MDIC e com partes interessadas (associações comerciais, organizações de comércio, etc.), e coletar perspectivas locais para fundamentar a análise de cenários abrangente e os insights sobre políticas.





6 Referências

Referências

- Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Antal, M., Mattioli, G., & Rattle, I. (2020). Let's focus more on negative trends: A comment on the transitions research agenda. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 34, 359-362. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.02.001>
- Araújo, K. (2014). The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities. *Energy Research & Social Science*, 1, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.03.002>
- Armijo, J., & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541-1558.
- Arup & Ellen MacArthur Foundation. (2020). From principles to practices: Realising the value of circular economy in real estate. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/realising-the-value-of-circular-economy-in-real-estate>
- Ayres, R. U. (2001). The minimum complexity of endogenous growth models: the role of physical resource flows. *Energy*, 26(9), 817-838. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00031-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00031-7)
- Ayres, R. U., & Warr, B. (2005). Accounting for growth: the role of physical work. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16(2), 181-209. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2003.10.003>
- Benachio, G. L. F., Freitas, M. C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- BloombergNEF. (2024). Forecast LCOE range. Bloomberg New Energy Finance. . <https://www.bnef.com/interactivedatasets/2d5d59acd9000009?tab=Forecast%20LCOE>
- Blum, P., Helmcke, S., Heuss, R., Hundertmark, T., Marlier, S., Pinner, D., & Somers, K. (2021). Net zero or bust: Beating the abatement cost curve for growth. McKinsey. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/net-zero-or-bust-beating-the-abatement-cost-curve-for-growth>
- Boffo&Patalano. (2020). ESG Investing: Practices, Progress and Challenges. <https://www.oecd.org/finance/ESGInvesting-Practices-Progress-Challenges.pdf>
- Brockway, P. E., Sorrell, S., Semieniuk, G., Heun, M. K., & Court, V. (2021). Energy efficiency and economy wide rebound effects: A review of the evidence and its implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110781>
- Brozovic, D. (2019). Business model based on strong sustainability: Insights from an empirical study. *Business Strategy and the Environment*, 29(2), 763-778. <https://doi.org/10.1002/bse.2440>
- Myint, N. N., & Shafique, M. (2024). Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03024.
- Carbon Leadership Forum. (n.d.). Carbon Challenge. <https://carbonleadershipforum.org/carbon-challenge/>
- CarbiCrete. (n.d.). CarbiCrete: Decarbonized Concrete. <https://carbicrete.com>
- Circle Economy. (2023). The Circularity Gap Report 2023. <https://www.circularity-gap.world/2023>
- Clausen, J., Göll, E., & Tappeser, V. (2017). Sticky Transformation How path dependencies in socio-technical regimes are impeding the transformation to a Green Economy. *Journal of Innovation Management*, 5, 111-138. https://doi.org/10.24840/2183-0606_005.002_0008
- ClimateActionTracker. (2022). 2100 Warming Projections. Accessed: March 2023. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>
- ClimateWatch. (2022). World Greenhouse Gas Emissions in 2019 by Sector, End Use and Gases. <https://www.climatewatchdata.org/key-visualizations?visualization=4>
- Construction Innovation Hub. (2021). Platform Design Programme. <https://constructioninnovationhub.org.uk/platformdesign-programme/>
- Demski, C., Butler, C., Parkhill, K. A., Spence, A., & Pidgeon, N. F. (2015). Public values for energy system change. *Global Environmental Change*, 34, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.014>
- Dorr&Seba. (2020). Rethinking Energy 2020-2030. 100% Solar, Wind, and Batteries is Just the Beginning. RethinkX. Dorr Adam, Seba Tony. <https://www.rethinkx.com/energy#energy-download>
- Edmondson, D. L., Rogge, K. S., & Kern, F. (2020). Zero carbon homes in the UK? Analysing the co-evolution of policy mix and socio-technical system. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 35, 135-161. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.02.005>
- Eising, J. W., van Onna, T., & Alkemade, F. (2014). Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains. *Applied Energy*, 123, 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.017>
- Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). Built environment and the circular economy. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/built-environment/overview>
- Emais Energia. (2022, September). Scoping Paper on the Brazilian Decarbonization – STEEL INDUSTRY. <https://emaisenergia.org/en/publicacao/scoping-paper-on-the-brazilian-decarbonization-steel-industry/>
- Energy Transitions Commission. (2018). Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors. <https://www.energy-transitions.org/publications/mission-possible/>
- Energy Transitions Commission. (2020). Making Mission Possible. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-mission-possible/>

- Foxon, T. J. (2011). A coevolutionary framework for analysing a transition to a sustainable low carbon economy. *Ecological Economics*, 70(12), 2258-2267. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.07.014>
- Fuenfschilling, L., & Binz, C. (2018). Global socio-technical regimes. *Research Policy*, 47(4), 735-749. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.02.003>
- Gallardo, F. I., Ferrario, A. M., Lamagna, M., Bocci, E., Garcia, D. A., & Baeza-Jeria, T. E. (2021). A Techno-Economic Analysis of solar hydrogen production by electrolysis in the north of Chile and the case of exportation from Atacama Desert to Japan. *international journal of hydrogen energy*, 46(26), 13709-13728.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8-9), 1257-1274.
- Geels, F. W. (2010). Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. *Research Policy*, 39(4), 495-510. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.022>
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), 399-417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Geels, F. W., Schwanen, T., Sorrell, S., Jenkins, K., & Sovacool, B. K. (2018). Reducing energy demand through low carbon innovation: A sociotechnical transitions perspective and thirteen research debates. *Energy Research & Social Science*, 40, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.003>
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science*, 357(6357), 1242-1244. <https://doi.org/10.1126/science.aao3760>
- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., Rao, N. D., Riahi, K., Rogelj, J., De Stercke, S., Cullen, J., Frank, S., Fricko, O., Guo, F., Gidden, M., Havlík, P., Huppmann, D., Kiesewetter, G., Rafaj, P., . . . Valin, H. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6), 515-527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A. C., & De Gouvello, C. (2014). Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves : a case study on Brazil. WorldBank. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documentsreports/documentdetail/570361468020976042/long-termmitigation-strategies-andmarginal-abatement-cost-curvesa-case-study-on-brazil>
- Hansen, U. E., Nygaard, I., Romijn, H., Wieczorek, A., Kamp, L. M., & Klerkx, L. (2018). Sustainability transitions in developing countries: Stocktaking, new contributions and a research agenda. *Environmental Science & Policy*, 84, 198-203. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.009>
- Hekkert, M. P., Suurs, R. A. A., Negro, S. O., Kuhlmann, S., & Smits, R. E. H. M. (2007). Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(4), 413-432. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002>
- Heun, M. K., & Brockway, P. E. (2019). Meeting 2030 primary energy and economic growth goals: Mission impossible? *Applied Energy*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.255>
- Hoppmann, J., Huenteler, J., & Girod, B. (2014). Compulsive policy-making—The evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power. *Research Policy*, 43(8), 1422-1441. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2014.01.014>
- ING. (2023, July 19). Hydrogen sparks change for the future of green steel production. <https://www.ing.com/Newsroom/News/Hydrogen-sparks-change-for-the-futureof-greensteel-production.htm>
- International Energy Agency (IEA). (2019). Global Status Report for Buildings and Construction 2019. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>
- International Energy Agency (IEA). (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IRENA. (2020). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>
- 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. [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. doi: 10.1017/9781009157926. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- Ivanova, D., Vita, G., Wood, R., Lausset, C., Dumitru, A., Krause, K., Macsinga, I., & Hertwich, E. G. (2018). Carbon mitigation in domains of high consumer lock-in. *Global Environmental Change*, 52, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.06.006>
- Janda, K., & Parag, Y. (2013). A middle-out approach for improving energy performance in buildings. *Building Research and Information*, 41, 39-50. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.743396>
- Janda, K., Parag, Y., Reindl, K., Wade, F., & Blumer, Y. (2019). Making more of middles: advancing the middle-out perspective in energy system transformation.
- Jefferson, M. (2014). Closing the gap between energy research and modelling, the social sciences, and modern realities. *Energy Research & Social Science*, 4, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.08.006>
- Kemp, R., Loorbach, D., & Rotmans, J. (2007). Transition Management as a Model for Managing Processes of Co-Evolution towards Sustainable Development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology - INT J SUSTAIN DEV WORLD ECOL*, 14, 78-91. <https://doi.org/10.1080/13504500709469709>

- Kern, F., & Rogge, K. S. (2018). Harnessing theories of the policy process for analysing the politics of sustainability transitions: A critical survey. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 27, 102-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eist.2017.11.001>
- Kesicki, F. (2010). Marginal abatement cost curves for policy making – expert-based vs. model-derived curves 33rd IAEE International Conference, https://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucft347/Kesicki_MACC.pdf
- Klitkou, A., Bolwig, S., Hansen, T., & Wessberg, N. (2015). The role of lock-in mechanisms in transition processes: The case of energy for road transport. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.005>
- Köhler, J., de Haan, F., Holtz, G., Kubeczko, K., Moallemi, E., Papachristos, G., & Chappin, E. (2018). Modelling Sustainability Transitions: An Assessment of Approaches and Challenges. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 21(1). <https://doi.org/10.18564/jasss.3629>
- Kwan, T., Philibert, C. (2024a) Optimizing Renewable Energy Integration and Grid Costs for Electrified Ammonia Production, Sustainability Research Institute, Schneider Electric
- Kwan, T. (2024b) Copper 4.0: Integrating green mining practices, smart technologies, and value chain collaboration, Sustainability Research Institute, Schneider Electric
- Kwan, T., Tu, Q. (2024c) Carbon and Beyond: Mitigating embodied impacts through building design and material selection strategies, Sustainability Research Institute, Schneider Electric
- Kwan, T. (2025a) Copper dynamics and horizons: Building sector mitigation and electric vehicle-driven growth, Sustainability Research Institute, Schneider Electric
- Kwan, T., Roulier, A., Eckelman, M.J. (2025b) Beyond Grid Dependency: Technical and Economic Case for New Energy Systems in Green Steel, Sustainability Research Institute, Schneider Electric
- Lamotte, G. (2024, May 22). Making steel with electricity. MIT News. <https://news.mit.edu/2024/mit-spinout-boston-metal-makes-steel-with-electricity-0522>
- Li, F. G. N., Trutnevyte, E., & Strachan, N. (2015). A review of socio-technical energy transition (STET) models. *Technological Forecasting and Social Change*, 100, 290-305. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.017>
- LLNL. (2022). Lawrence Livermore National Laboratory. Energy Flow Charts: Charting the Complex Relationships among Energy, Water, and Carbon. <https://flowcharts.llnl.gov/>
- Loorbach, D., & Rotmans, J. (2006). Managing Transitions for Sustainable Development. In *Understanding Industrial Transformation* (pp. 187-206). https://doi.org/10.1007/1-4020-4418-6_10
- Mahone A., Aas D., Subin Z., Mac Kinnon M., Lane B., & Price S. (2020). The Challenge of Retail Gas in California's Low-Carbon Future - Technology Options, Customer Costs, and Public Health Benefits of Reducing Natural Gas Use. CEC-500-2019-055. Energy Research and Development.
- California Energy Commission. <https://www.energy.ca.gov/publications/2019/challenge-retail-gas-californiaslowcarbonfuture-technology-options-customer>
- Martínez Arranz, A. (2017). Lessons from the past for sustainability transitions? A meta-analysis of sociotechnical studies. *Global Environmental Change*, 44, 125-143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.03.007>
- Mattauch, L., Ridgway, M., & Creutzig, F. (2016). Happy or liberal? Making sense of behavior in transport policy design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 45, 64-83. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.006>
- Mattioli, G., Roberts, C., Steinberger, J. K., & Brown, A. (2020). The political economy of car dependence: A systems of provision approach. *Energy Research & Social Science*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101486>
- McKinsey. (2022, November 4). The green hidden gem – Brazil's opportunity to become a sustainability powerhouse. <https://www.mckinsey.com/br/en/our-insights/all-insights/the-greenhidden-gem-brazils-opportunity-to-becomeasustainabilitypowerhouse>
- McMeekin, A., Geels, F. W., & Hodson, M. (2019). Mapping the winds of whole system reconfiguration: Analysing low-carbon transformations across production, distribution and consumption in the UK electricity system (1990– 2016). *Research Policy*, 48(5), 1216-1231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.12.007>
- Minier, V. (2024). Decarbonizing Buildings to the Benefits of Consumers and System Operators. Schneider Electric™ Sustainability Research Institute.
- Morgan Stanley. (2023, May 18). Greening the Steel Industry: A Tale of Cost and Opportunity. <https://www.morganstanley.com/ideas/green-steel-low-carbon>
- Myint, N. N., & Shafique, M. (2024). Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03024. <https://www.sciencedirect.com/journal/case-studies-in-construction-materials>
- <https://www.sciencedirect.com/journal/case-studies-in-construction-materials>
- Noppers, E. H., Keizer, K., Bockarjova, M., & Steg, L. (2015). The adoption of sustainable innovations: The role of instrumental, environmental, and symbolic attributes for earlier and later adopters. *Journal of Environmental Psychology*, 44, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.09.002>
- Noppers, E. H., Keizer, K., Bolderdijk, J. W., & Steg, L. (2014). The adoption of sustainable innovations: Driven by symbolic and environmental motives. *Global Environmental Change*, 25, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.012>
- Noppers, E. H., Keizer, K., Milovanovic, M., & Steg, L. (2016). The importance of instrumental, symbolic, and environmental attributes for the adoption of smart energy systems. *Energy Policy*, 98, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.08.007>
- OECD/IEA. (2013). Transition to Sustainable Buildings. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/transition-to-sustainable-buildings>

- OECD/IEA. (2017). World Energy Outlook. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>
- OECD/IEA. (2022). World Energy Outlook. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Oreskes&Conway. (2011). Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Climate Change. Bloomsbury Press.
- Pangea SI. (n.d.). Advancements In The Green Steel Industry. <https://www.pangea-si.com/green-steel-industryadvancements/>
- Parag, Y., & Janda, K. B. (2014). More than filler: Middle actors and socio-technical change in the energy system from the “middle-out”. *Energy Research & Social Science*, 3, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.07.011>
- Petit. (2023). *The Next Industrial Revolution: A New Age for Innovation in Industry*. World Scientific Publishing: London.
- Petit, V. (2021). *The Age of Fire is Over: A new Approach to the Energy Transition*. World Scientific Publishing.
- Petit, V. (2022). Road to a rapid transition to sustainable energy security in Europe. Schneider ElectricTM Sustainability Research Institute. <https://www. /ww/ en/ insights/sustainability/sustainability-research-institute/ road-to-a-rapid-transition-to-sustainable-energy-securityineurope.jsp?stream=sustainability-research-institute>
- Poblete-Cazenave, M., Pachauri, S., Byers, E., Mastrucci, A., & van Ruijven, B. (2021). Global scenarios of household access to modern energy services under climate mitigation policy. *Nature Energy*, 6(8), 824-833. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00871-0>
- Reike, D., Hekkert, M. P., & Negro, S. O. (2022). Understanding circular economy transitions: The case of circular textiles. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.3114>
- Rhodes, R. (2018). *Energy: a Human History*. Simon & Schuster: New York, NJ.
- Roberts, C., & Geels, F. W. (2019). Conditions for politically accelerated transitions: Historical institutionalism, the multilevel perspective, and two historical case studies in transport and agriculture. *Technological Forecasting and Social Change*, 140, 221-240. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.019>
- Røpke, I. (2009). Theories of practice — New inspiration for ecological economic studies on consumption. *Ecological Economics*, 68(10), 2490-2497. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.015>
- Rotmans, J., Kemp, R., & van Asselt, M. (2001). More evolution than revolution: transition management in public policy. *Foresight*, 3(1), 15-31. <https://doi.org/10.1108/14636680110803003>
- Rubio, M. d. M., & Folchi, M. (2012). Will small energy consumers be faster in transition? Evidence from the early shift from coal to oil in Latin America. *Energy Policy*, 50, 50-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.>
- Schneider Electric. (2021). Back to 2050. 1.5°C is more feasible than we think. Schneider ElectricTM Sustainability Research Institute. . <https://www. /ww/en/insights/sustainability/sustainability-research-institute/back-to-2050.jsp>
- Schneider Electric. (2023a). Climate Horizon: Opportunities for a greener world in the Middle East. Schneider ElectricTM Sustainability Research Institute. <https://www. /ww/en/insights/sustainability/impact-company/ climate-horizon.jsp>
- Schneider Electric. (2023b). Path to developed and decarbonized India. Schneider ElectricTM Sustainability Research Institute. . <https://www. /ww/en/insights/sustainability/sustainability-research-institute/pathdeveloped-and-decarbonized-india.jsp>
- Schneider Electric. (2024a). Scenarios for China. Official report will be published in the course of 2024. <https://www. /ww/en/insights/sustainability/ sustainabilityresearch-institute/>
- Schneider Electric. (2024b). The untold potential and rationale of electrification for the U.S. Industry. Schneider ElectricTM Sustainability Research Institute. . <https://www. /ww/en/insights/sustainability/ sustainability-research-institute/>
- Schot, J., & Kanger, L. (2018). Deep transitions: Emergence, acceleration, stabilization and directionality. *Research Policy*, 47(6), 1045-1059. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.03.009>
- Serrenho, A. C., Sousa, T., Warr, B., Ayres, R. U., & Domingos, T. (2014). Decomposition of useful work intensity: The EU (European Union)-15 countries from 1960 to 2009. *Energy*, 76, 704-715. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.068>
- Serrenho, A. C., Warr, B., Sousa, T., Ayres, R. U., & Domingos, T. (2016). Structure and dynamics of useful work along the agriculture-industry-services transition: Portugal from 1856 to 2009. *Structural Change and Economic Dynamics*, 36, 1-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.strueco.2015.10.004>
- Seto, K. C., Davis, S. J., Mitchell, R. B., Stokes, E. C., Unruh, G., & Ürge-Vorsatz, D. (2016). Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1), 425-452. <https://doi.org/10.1146/annurev-enviro-110615-085934>
- Shove, E., & Walker, G. (2014). What Is Energy For? Social Practice and Energy Demand. *Theory, Culture & Society*, 31, 41-58. <https://doi.org/10.1177/0263276414536746>
- Simpson, K., Janda, K. B., & Owen, A. (2020). Preparing ‘middle actors’ to deliver zero-carbon building transitions. *Buildings and Cities*, 1(1). <https://doi.org/10.5334/bc.53>
- Smil, V. (2017). *Energy and Civilization: a History*. The MIT Press: Cambridge, MA.
- Smith, J., Butler, R., Day, R. J., Goodbody, A. H., Llewellyn, D. H., Rohse, M., Smith, B. T., Tyszcuk, R. A., Udall, J., & Whyte, N. M. (2017). Gathering around stories: Interdisciplinary experiments in support of energy system transitions. *Energy Research & Social Science*, 31, 284-294. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.026>

- SMS group. (n.d.). Eletrobras and SMS group explore potential supply of renewable hydrogen to industries in Brazil. <https://www.sms-group.com/en-cl/press-and-media/press-releases/press-release-detail/eletrobras-and-smgroup-explore-potential-supply-of-renewable-hydrogentoindustries-in-brazil>
- Sovacool, B. K. (2014). What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda. *Energy Research & Social Science*, 1, 1-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.003>
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>
- Sovacool, B. K., Evensen, D., Kwan, T. A., & Petit, V. (2023). Building a green future: Examining the job creation potential of eletricidade, heating, and storage in low-carbon buildings. *The Electricity Journal*, 36(5), 107274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tej.2023.107274>
- Sovacool, B. K., & Hess, D. J. (2017). Ordering theories: Typologies and conceptual frameworks for sociotechnical change. *Soc Stud Sci*, 47(5), 703-750. <https://doi.org/10.1177/0306312717709363>
- Sovacool, B. K., Iskandarova, M., & Hall, J. (2023). Industrializing theories: A thematic analysis of conceptual frameworks and typologies for industrial sociotechnical change in a low-carbon future. *Energy Research & Social Science*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102954>
- Stephenson, J., Barton, B., Carrington, G., Doering, A., Ford, R., Hopkins, D., Lawson, R. A., McCarthy, A., Rees, D., Scott, M., Thorsnes, P., Walton, S., Williams, J. R., & Wooliscroft, B. (2015). The energy cultures framework: Exploring the role of norms, practices and material culture in shaping energy behaviour in New Zealand. *Energy research and social science*, 7, 117-123.
- Suarez, F. F., Grodal, S., & Gotsopoulos, A. (2015). Perfect timing? Dominant category, dominant design, and the window of opportunity for firm entry. *Strategic Management Journal*, 36(3), 437-448. <https://doi.org/10.1002/smj.2225>
- Teece, D. J. (2018). Tesla and the Reshaping of the Auto Industry. *Management and Organization Review*, 14(3), 501-512. <https://doi.org/10.1017/mor.2018.33>
- Trotter, P. A., & Brophy, A. (2022). Policy mixes for business model innovation: The case of off-grid energy for sustainable development in sub-Saharan Africa. *Research Policy*, 51(6). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104528>
- Truffer, B., Markard, J., Binz, C., & Jacobsson, S. (2012). Energy Innovation Systems - Structure of an emerging scholarly field and its future research directions. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26395.57126>
- Turnheim, B., & Geels, F. W. (2019). Incumbent actors, guided search paths, and landmark projects in infra-system transitions: Re-thinking Strategic Niche Management with a case study of French tramway diffusion (1971–2016). *Research Policy*, 48(6), 1412-1428. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.02.002>
- UNEP. (2019). Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want - Summary for Policymakers. Accessed: January 2020. . <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27518>
- UnitedNations. (2022). UN World Population Prospects. Department of Economic and Social Affairs. Population Division <https://population.un.org/wpp/>
- Unruh, G. C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, 28(12), 817-830. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7)
- Vroon, T., Teunissen, E., Drent, M., Negro, S. O., & van Sark, W. G. J. H. M. (2022). Escaping the niche market: An innovation system analysis of the Dutch building integrated photovoltaics (BIPV) sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111912>
- Wiedenhofer, D., Smetschka, B., Akenji, L., Jalas, M., & Haberl, H. (2018). Household time use, carbon footprints, and urban form: a review of the potential contributions of everyday living to the 1.5 °C climate target. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 30, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.02.007>
- Wilson, C., Grubler, A., Bento, N., Healey, S., De Stercke, S., & Zimm, C. (2020). Granular technologies to accelerate decarbonization. *Science*, 368(6486), 36-39. <https://doi.org/10.1126/science.aaz8060>
- Wilson, C., & Tyfield, D. (2018). Critical perspectives on disruptive innovation and energy transformation. *Energy Research & Social Science*, 37, 211-215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.032>
- WorldBank. (2022). Data catalog. Accessed: September 2022. <https://datacatalog.worldbank.org/home>
- World Economic Forum (WEF). (2021). Net Zero Carbon Cities: An Integrated Approach. <https://www.weforum.org/reports/net-zero-carbon-cities-an-integrated-approach>
- World Green Building Council. (n.d.). Embodied Carbon. <https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/>
- Zarazua de Rubens, G., Noel, L., & Sovacool, B. K. (2018). Dismissive and deceptive car dealerships create barriers to electric vehicle adoption at the point of sale. *Nature Energy*, 3(6), 501-507. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0152-x>

Aviso Legal

O conteúdo desta publicação é apresentado apenas para fins informativos e, embora tenham sido feitos esforços para garantir sua precisão, não deve ser interpretado como garantia de qualquer tipo, expressa ou implícita. Esta publicação não deve ser usada como base para aconselhamento de investimento ou outras decisões estratégicas.


As premissas, modelos e conclusões apresentados nesta publicação representam um cenário possível e dependem inerentemente de muitos fatores fora do controle de qualquer empresa, incluindo, entre outros, ações governamentais, evolução das condições climáticas, considerações geopolíticas e mudanças tecnológicas. Os cenários e modelos não se destinam a ser projeções ou previsões para o futuro e não representam a estratégia ou o plano de negócios da Schneider Electric.

O logotipo da Schneider Electric é uma marca comercial e de serviço da Schneider Electric SE. Quaisquer outras marcas permanecem propriedade de seus respectivos proprietários.

Autores

Vincent Petit, Vice-President Senior de Pesquisa em Transição Climática e Energética

Thomas Alan Kwan, Vice-President de Inovação Estratégica e Ecossistemas Industriais

Schneider
 **Electric**[™]