SAE 4Mobility

MAPEAMENTO DE CADEIAS DE MOBILIDADE

Plano Nordeste Potência

Camilo Adas

Davi Gabriel Lopes

SAE BRASIL
A CASA DO CONHECIMENTO DA MOBILIDADE BRASILEIRA

PLANO NORDESTE POTÊNCIA

SUMÁRIO

FICHA TÉCNICA DA PUBLICAÇÃO 5

FIGURAS 6

TABELAS 8

1. INTRODUÇÃO 9

A. A ATMOSFERA ESTÁ SE AQUECENDO 9

B. ENVOLVIMENTO DA SAE BRASIL E DA SAE4MOBILITY 17

C. PROPÓSITO DO TRABALHO 18

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE 19

A. EVOLUÇÃO DO USO DE FONTES DE ENERGIA 21

B. OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E SUA UTILIZAÇÃO COMO FONTE DE ENERGIA PARA A MOBILIDADE 24

C. BIOCOMBUSTÍVEIS 28

I) O ÁLCOOL E O PROÁLCOOL 29

II) ETANOL 30

III) ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA MOTORES COM CICLO DIESEL 32

BIODIESEL 32

BIOMETANO 33

BICOMBUSTÍVEIS DROP-IN 34

DIESEL VERDE (INCLUI HVO) 34

D. O HIDROGÊNIO (H_2) COMO VETOR DE ENERGIA PARA A ELETROMOBILIDADE 35

I) A PALETA DE CORES E A FORMA DE OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO 36

II) PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO UTILIZANDO ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA 38

III) DISPONIBILIDADE NA NATUREZA E OBTENÇÃO 38

IV) PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO A PARTIR DA BIOMASSA (ETANOL, BIO-ÓLEOS, BIOGÁS) 38

V) PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DO H_2 NO BRASIL 41

3. PROPULSÃO VEICULAR 45

A. O PROCONVE E AS EMISSÕES LOCAIS 45

B. AS DIFERENTES FORMAS DE PROPULSÃO PARA VEÍCULOS DE PASSEIO 49

I) MOTOR DE CICLO OTTO 49

II) PROPULSÃO A GÁS NATURAL 49

III) TIPOS DE ELETRIFICAÇÃO 50

SUMÁRIO

C. AS DIFERENTES FORMAS DE PROPULSÃO PARA VEÍCULOS COMERCIAIS 56
I) MOTOR DE CICLO DIESEL 56
II) VEÍCULOS COMERCIAIS COM MOTORES A GÁS 57
III) TIPOS DE ELETRIFICAÇÃO 57
D. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (FUEL CELL) 59
I. PEMFC 61
II. SOFC 62
III. MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA A HIDROGÊNIO (HICE) 63

4. ESTRATÉGIA DOS PRINCIPAIS FABRICANTES DE VEÍCULOS COMERCIAIS 64
A. DAIMLER TRUCKS 65
I) ESTRATÉGIA GLOBAL 65
II) ESTRATÉGIA NACIONAL 67
B. GRUPO TRATON 67
I) ESTRATÉGIA GLOBAL 67
II) ESTRATÉGIA NACIONAL 68
C. VOLVO E SUAS EMPRESAS 69
I) ESTRATÉGIA GLOBAL 69
II) ESTRATÉGIA NACIONAL 70
D. GRUPO IVECO 70
I) ESTRATÉGIA GLOBAL 70
II) ESTRATÉGIA NACIONAL 71

5. VISÃO AMPLIADA DA DESCARBONIZAÇÃO 72
A. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 72
B. CICLO DE VIDA NA CADEIA AUTOMOTIVA 73
C. A MSBC – MOBILIDADE SUSTENTÁVEL DE BAIXO CARBONO 76
D. FERRAMENTAS PARA CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO_2 77
I) NORMA EUROPEIA EN16258 77
II) WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI) 77
III) INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) 79
IV) GLEC FRAMEWORK 80
E. CONCEITO DO POÇO À RODA PARA VEH 80

SUMÁRIO

6. A ELETRICIDADE E SUA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL 83

A. A MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA MUNDIAL E BRASILEIRA 83

B. MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO 85

C. AS CARACTERÍSTICAS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL 87

D. OS RISCOS DO USO DE FONTES NÃO RENOVÁVEIS PARA A ELETRIFICAÇÃO DOS TRANSPORTES NO BRASIL 90

7. SECTOR COUPLING 91

A. CONCEITO 91

B. SECTOR COUPLING NA EUROPA 90

C. POTENCIAIS DO SECTOR COUPLING NO BRASIL 95

8. NORDESTE BRASILEIRO – FONTE ENERGÉTICA PARA UMA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL NO BRASIL 96

A. AS VOCAÇÕES DO NORDESTE BRASILEIRO 96

B. OS POLOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NO NORDESTE 99

C. LINHAS DE AÇÃO PÚBLICAS E PRIVADAS PARA AVANÇO DA PRODUÇÃO E USO SIGNIFICATIVO DO H_2 VERDE 100

D. INFRAESTRUTURA 102

E. DEMANDAS REGULATÓRIAS 104

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS 105

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 107

FICHA TÉCNICA DA PUBLICAÇÃO

A SAE BRASIL agradece Daniel Gabriel Lopes, Mônica Saraiva Panik e todos os membros da Mentoria de Hidrogênio da entidade.

A mentoria nasceu com o propósito de criar conhecimento em uma área fundamental para a transição energética do nosso País.

É o trabalho voluntário dessas pessoas que viabiliza oportunidades como a redação deste mapeamento.

CAMILO ADAS
Presidente do Conselho e conselheiro de Tecnologia e SAE do Futuro

COORDENAÇÃO:
Camilo Adas

PESQUISADORES:
Camilo Adas
e Davi Gabriel Lopes

REVISÃO TÉCNICA:
Erwin Franieck
e André Ferrarese

REVISÃO ORTOGRÁFICA:
OK Linguística

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO
Leda C. Silva

REALIZAÇÃO:
SAE4Mobility

SAE BRASIL
A CASA DO CONHECIMENTO DA MOBILIDADE BRASILEIRA

PLANO NORDESTE POTÊNCIA

FIGURAS

FIGURA 1. CONSUMO GLOBAL DE ENERGIA PRIMÁRIA POR FONTE **09**
FIGURA 2. RADIAÇÃO SOLAR E O EFEITO DE REFRAÇÃO ATRAVÉS DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NA ATMOSFERA DA TERRA **10**
FIGURA 3. EMISSÕES ANUAIS DE CO_2 ..... **11**
FIGURA 4. AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL **12**
FIGURA 4A. POSSÍVEIS CENÁRIOS DE AUMENTO DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÉDIA **12**
FIGURA 5. EXEMPLO DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS CADA VEZ MAIS COMUNS NO MUNDO **13**
FIGURA 6. INFLUÊNCIA DO AUMENTO DE TEMPERATURA EM DIFERENTES ECOSSISTEMAS **14**
FIGURA 7. EMISSÕES DE CARBONO PER CAPITA POR PAÍS **15**
FIGURA 8. EMISSÃO DE CO_2 TOTAL – PRINCIPAIS PAÍSES EMISSORES **16**
FIGURA 9. CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS **19**
FIGURA 10. PROCESSO HISTÓRICO DE DESCARBONIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS **21**
FIGURA 11. CONSUMO DE ENERGIA POR FONTE **22**
FIGURA 12. CONSUMO GLOBAL DE ENERGIA PRIMÁRIA POR FONTE ENERGÉTICA NAS ÚLTIMAS DÉCADAS **24**
FIGURA 13. EMISSÃO GLOBAL DE GEE POR SETOR ECONÔMICO EM 2020 ..... **25**
FIGURA 14. EMISSÃO GLOBAL DE CO_2 POR SETOR ECONÔMICO **26**
FIGURA 15. EMISSÕES DE CO_2 POR SETOR ECONÔMICO NO BRASIL EM 2018 ..... **26**
FIGURA 16. ROTAS DE OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS DROP-IN UTILIZANDO DIFERENTES MATÉRIAS-PRIMAS **28**
FIGURA 17. POSTO DE GASOLINA EARL CORYELL'S, NAS RUAS 14 E N, EM LINCOLN, NEBRASKA – USO DE GASOLINA COM 10% DE ÁLCOOL DE MILHO **29**
FIGURA 18. PROPORÇÃO DA FROTA CIRCULANTE NO BRASIL POR TIPO DE COMBUSTÍVEL **30**
FIGURA 19. PROPORÇÃO DE LICENCIAMENTOS NO BRASIL POR TIPO DE COMBUSTÍVEL **31**
FIGURA 20. DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO E HIDRATADO, POR REGIÃO EM 2019 ..... **32**
FIGURA 21. EVOLUÇÃO DO MARCO LEGAL DO BIODIESEL **33**
FIGURA 22. PALETA DE CORES DO HIDROGÊNIO SEGUNDO O NAFCE **36**
FIGURA 23. PALETA DE CORES SEGUNDO O VOLVO GROUP **37**
FIGURA 24. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM PROCESSO DE ELETRÓLISE **38**
FIGURA 25. POSSÍVEIS ROTAS PARA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO **41**
FIGURA 26. APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO NOS PRINCIPAIS SETORES INDUSTRIAIS **42**
FIGURA 27. EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO DE EMISSÕES PARA VEÍCULOS LEVES **47**
FIGURA 28. EMISSÕES DE VEÍCULOS DE PASSEIO DE ACORDO COM A FASE DO PROCONVE **47**
FIGURA 29. EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO PARA VEÍCULOS PESADOS **48**

FIGURAS

FIGURA 30. EMISSÕES DE VEÍCULOS COMERCIAIS EM FUNÇÃO DA FASE DO PROCONVE **48**

FIGURA 31. TECNOLOGIAS DE ELETRIFICAÇÃO **50**

FIGURA 32. ESTOQUE GLOBAL DE VEÍCULOS ELETRIFICADOS **52**

FIGURA 33. QUANTIDADES DE MODELOS NO PBE **52**

FIGURA 34. LICENCIAMENTO DE AUTOMÓVEIS E COMERCIAIS LEVES POR TIPO DE COMBUSTÍVEL **53**

FIGURA 35. VEÍCULO HÍBRIDO PARALELO **54**

FIGURA 36. O ROTEIRO DO NIÓBIO **55**

FIGURA 37. COMPARAÇÃO DO PRÊMIO DE CUSTO E ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL DE VEÍCULOS HÍBRIDOS CONVENCIONAIS **55**

FIGURA 38. VENDAS DE CAMINHÕES NA UNIÃO EUROPEIA POR TIPO DE COMBUSTÍVEL **58**

FIGURA 39. VENDAS DE ÔNIBUS NA UNIÃO EUROPEIA POR TIPO DE COMBUSTÍVEL **58**

FIGURA 40. REAÇÕES ELETROQUÍMICAS QUE OCORREM EM CADA TIPO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL **61**

FIGURA 41. MODAIS DE TRANSPORTE DE CARGAS **64**

FIGURA 42. PARTICIPAÇÃO NO MERCADO BRASILEIRO DE CAMINHÕES **64**

FIGURA 43. PARTICIPAÇÃO NO MERCADO BRASILEIRO DE ÔNIBUS **65**

FIGURA 44. FASES DAAVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) **72**

FIGURA 45. EXEMPLO DE PROCESSOS NA FABRICAÇÃO DE PRODUTO **73**

FIGURA 46. CICLO DO POÇO AO TANQUE E CICLO DO TANQUE À RODA **76**

FIGURA 47. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) **76**

FIGURA 48. INTENSIDADE DAS EMISSÕES DE CARBONO DE ACORDO COM A FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA **81**

FIGURA 49. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL **83**

FIGURA 50. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA **83**

FIGURA 51. MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL **85**

FIGURA 52. MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA **85**

FIGURA 53. FATOR DE EMISSÕES NA MARGEM DE CONSTRUÇÃO **86**

FIGURA 54. FATOR DE EMISSÕES NA MARGEM DA OPERAÇÃO **87**

FIGURA 55. MAPA DOS INTERCÂMBIOS DOS SUBSISTEMAS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL **89**

FIGURA 56. EVOLUÇÃO DA TRANSMISSÃO BRASILEIRA DE 1960 ATÉ 2027 ..... **89**

FIGURA 57. SECTOR COUPLING E OS VÁRIOS SETORES QUE SE BENEFICIAM COM A DESCARBONIZAÇÃO A PARTIR DO HIDROGÊNIO VERDE **92**

FIGURA 58. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA COM O SECTOR COUPLING **93**

FIGURA 59. CRESCIMENTO DA DEMANDA ELÉTRICA POR SETOR COM O SECTOR COUPLING **94**

FIGURA 60. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO NORDESTE **98**

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PALETA DE CORES SEGUNDO A EPE **37**

TABELA 2. PRINCIPAIS PROCESSOS DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO **40**

TABELA 3. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL *VERSUS* BRASILEIRA **83**

TABELA 4. MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL *VERSUS* MUNDIAL **85**

TABELA 5. LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRAS **88**

TABELA 6. SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRAS **88**

TABELA 7. PREVISÃO DE EXPANSÃO DE NOVAS LINHAS DE TRANSMISSÃO **88**

TABELA 8. POTENCIAL ENERGÉTICO DAS BIOMASSAS NO NORDESTE **99**

TABELA 9. CENTRAIS GERADORAS EÓLICAS NO NORDESTE **103**

TABELA 10. CENTRAIS GERADORAS FOTOVOLTAICAS NO NORDESTE **103**

TABELA 11. PORTOS NOS ESTADOS DO NORDESTE **104**

TABELA 12. MODAL RODOVIÁRIO NO NORDESTE **104**

TABELA 13. MODAL FERROVIÁRIO NO NORDESTE **104**

TABELA 14. MODAL AEROPORTUÁRIO NO NORDESTE **104**

1. INTRODUÇÃO

A. A ATMOSFERA ESTÁ SE AQUECENDO

À medida que o tempo passa, as demandas da humanidade aumentam. Questões ligadas a conforto físico e psicológico, realização pessoal e profissional, acesso a bens de consumo e serviços intensificam a atividade econômica. A demanda por insumos energéticos para mover o setor industrial, o comércio, as pessoas e as cargas aumentam proporcionalmente à medida que mais países aumentam sua renda (figura 1)

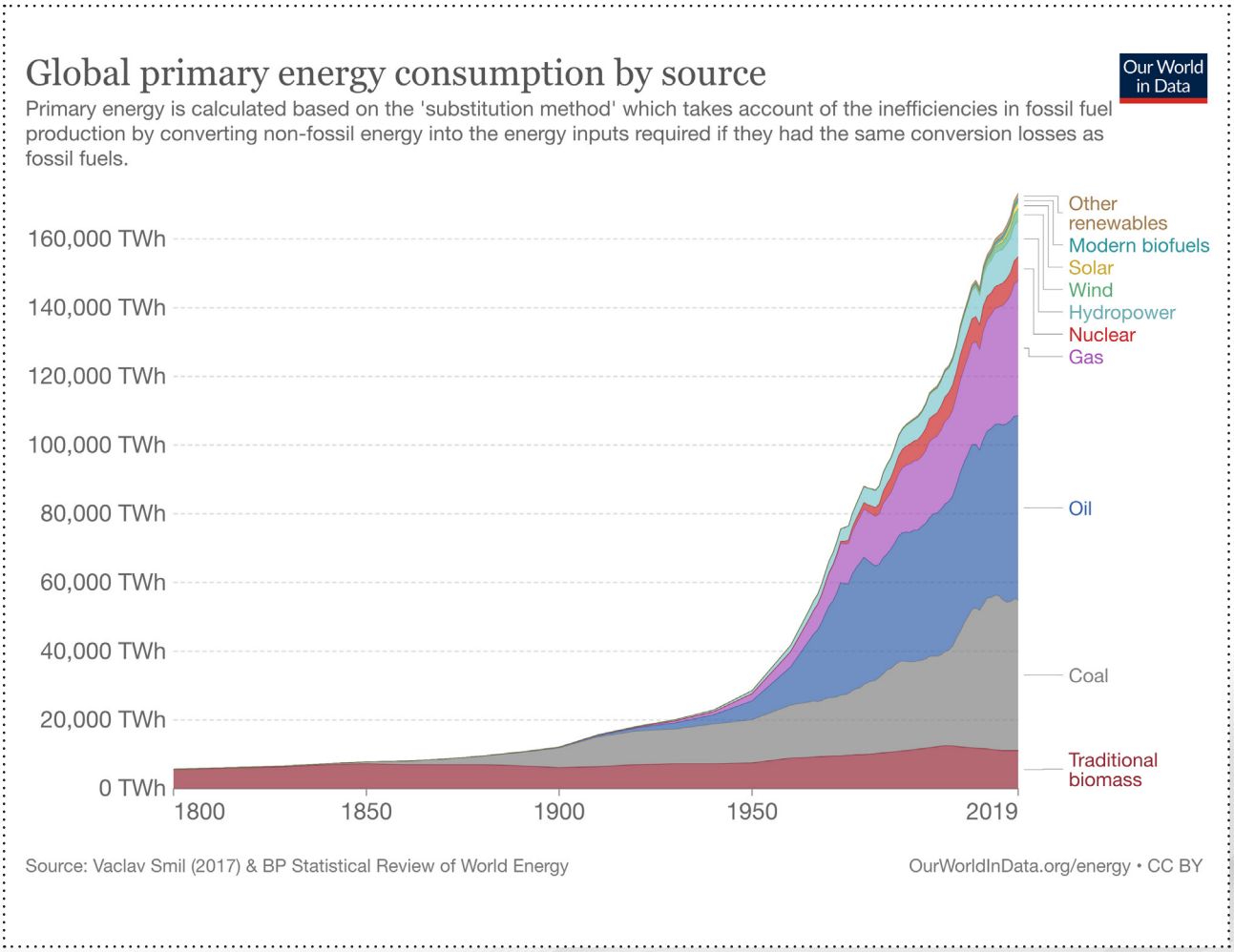


Figura 1. Consumo global de energia primária por fonte

Fonte: Ritchie e Roser, 2020.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. Energy Production and Consumption [online]. In: Our World In Data. Oxford, 2020. Disponível em: https://ourworldindata.org/energy-production-consumption. Acesso em: 1 set. 2022.

1. INTRODUÇÃO

A partir dos anos 1950, a intensificação de produtos manufaturados e com alto uso de energia passou a contribuir para um desbalanceamento da composição dos gases presentes na atmosfera terrestre, os Gases de Efeito Estufa (GEE). Se comparados a nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor de água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4) têm uma participação menor na composição dos GEE. Estes, porém, absorvem e liberam energia térmica, intensificando o efeito estufa natural da Terra. O aumento da proporção de CO_2 na composição dos GEE exerce influência significativa no processo de aumento da temperatura da atmosfera (figura2). Medições da temperatura média da atmosfera terrestre mostram uma elevação acentuada a partir dos anos 1960, cuja evolução segue um padrão de aumento similar ao aumento das emissões de CO_2 (figura3.). Dentro desse cenário, os combustíveis fósseis geram energia emitindo altos níveis de CO_2 no seu processo de extração, distribuição, transformação e uso energético.

Gases de Efeito Estufa (GEE) são os gases atmosféricos que absorvem e emitem a energia da radiação solar.

Os GEE são necessários para a manutenção da vida como conhecemos hoje.

Os principais GEE são: vapor de água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3).

Sem os GEE, a temperatura média da superfície terrestre seria de cerca de -18°C.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas

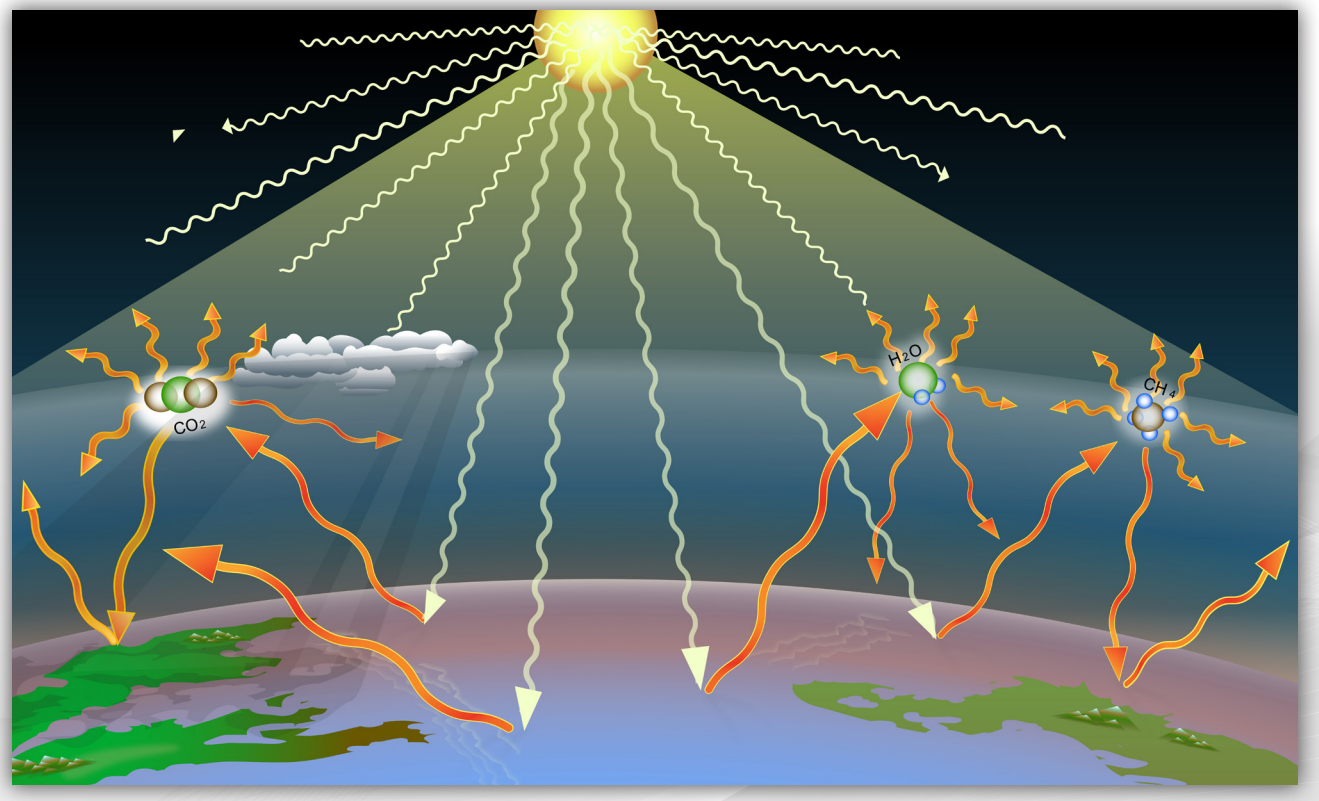


Figura 2. Radiação solar e o efeito de refração através dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera da Terra

Fonte: Wikipédia, 2022.

1. INTRODUÇÃO

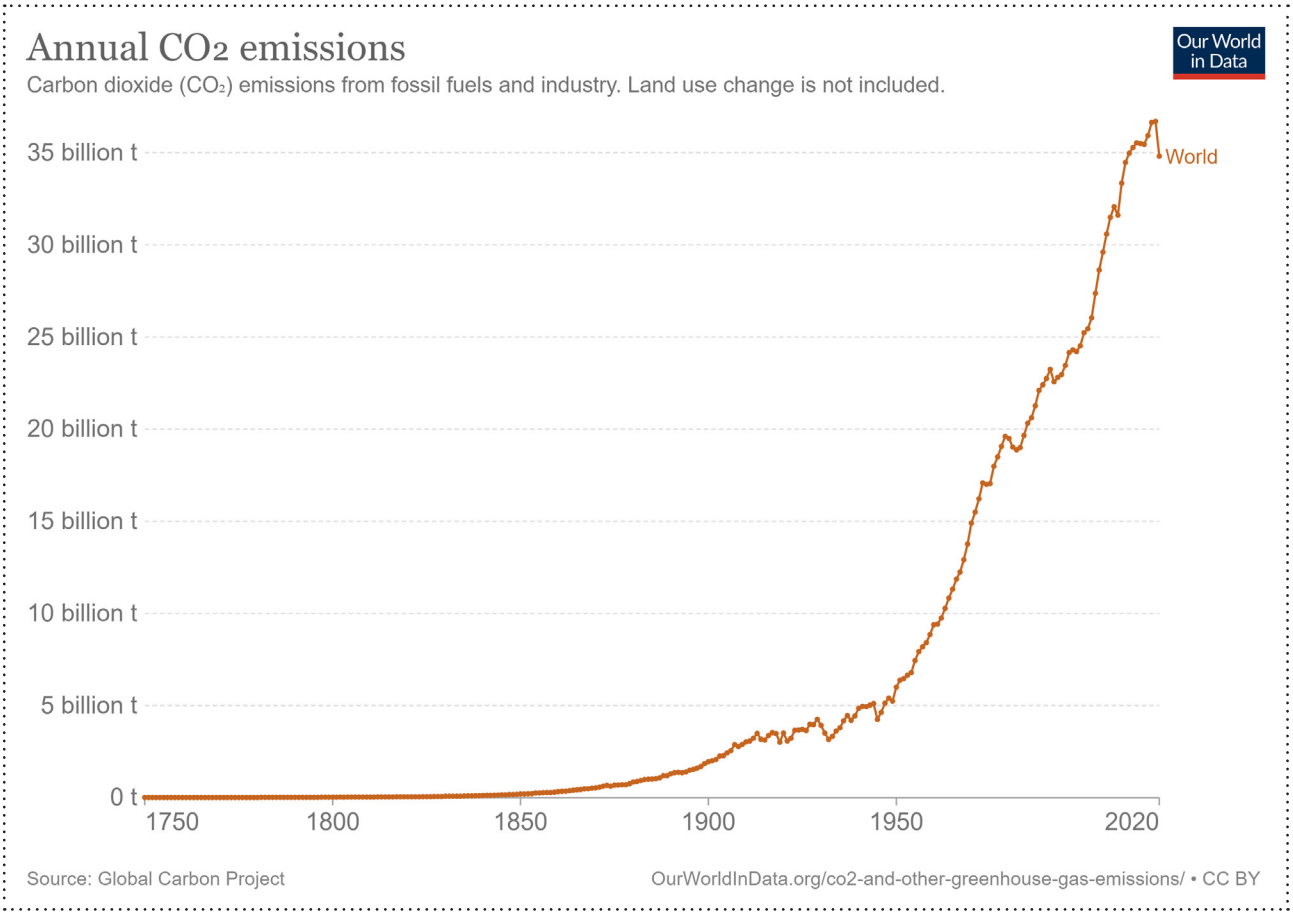


Figura 3. Emissões anuais de CO_2

Fonte: Ritchie e Roser, 2020.

Cenários que projetam os efeitos da elevação da temperatura da atmosfera terrestre definem que um aumento superior 1,5°C trará riscos e consequências ainda mais graves do que aquelas que o planeta já tem nos mostrado (figuras 4 e 4a). Espera-se que chuvas intensas ou longos períodos de secas ocorram de forma aleatória (ou imprevisível) em diferentes regiões do planeta, ou seja, com o aumento médio da temperatura terrestre haverá eventos extremos com maior frequência (figuras 5 e 6).

Fonte:
GLOBAL CARBON PROJECT. Supplemental data of Global Carbon Budget 2021 (Version 1.0) [online]. [s. l.], 2021. Disponível em: https://doi.org/10.18160/gcp-2021. Acesso em: 2 set

ANDREW, Robbie M.; PETERS, Glen P. (2021). The Global Carbon Project's fossil CO2 emissions dataset [online]. [s. l.], 14 out. 2021. In: Zenodo. Disponível em: https://zenodo.org/record/5569235#.YxyH8y3OpTY. Acesso em: 2 set. 2022.

1. INTRODUÇÃO

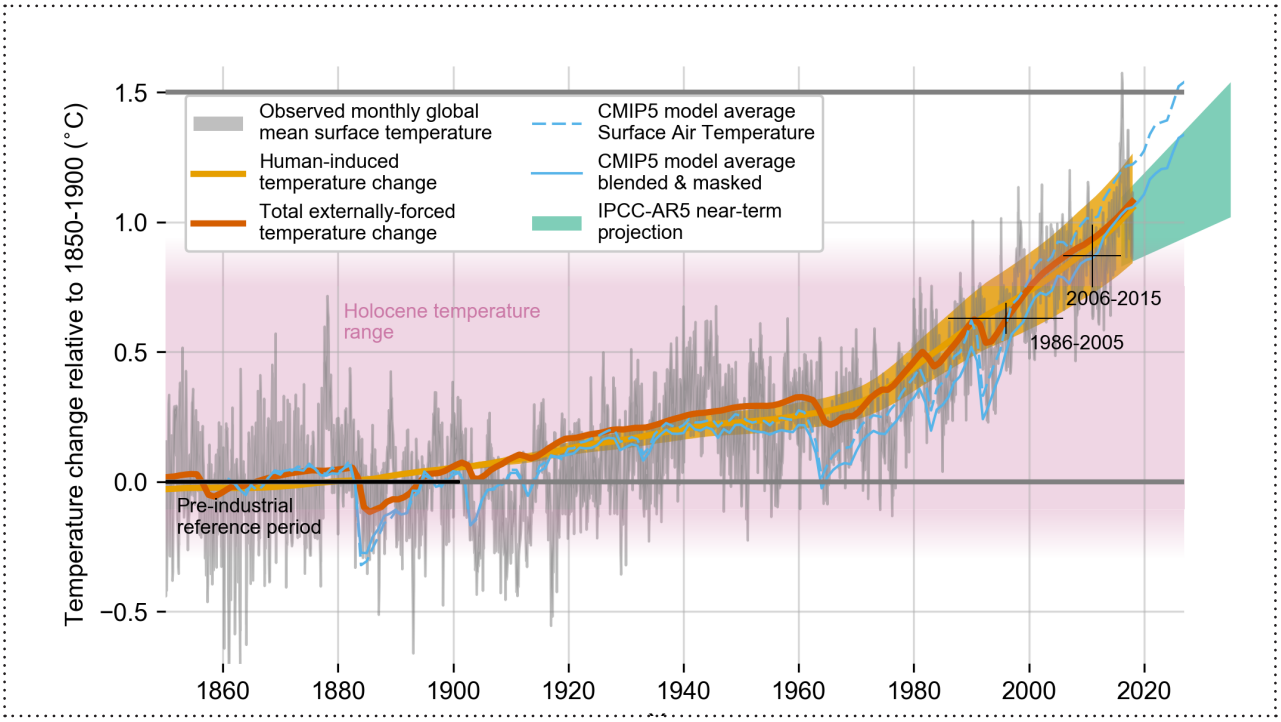


Figura 4. Aumento da temperatura média global

Na verdade, já é possível identificar o aumento da ocorrência de vários fenômenos extremos. Cada ecossistema e cada região vêm sendo afetados de formas diferentes, mas todo o planeta se transforma em função do aquecimento global e das mudanças climáticas.

Fonte do gráfico: Center for Climate and Energy Solutions.

Fonte das informações: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: MASSON-DALMOTTE, Valérie et al. (eds.). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK: Cambridge University Press: Nova York: IPCC, 2018.

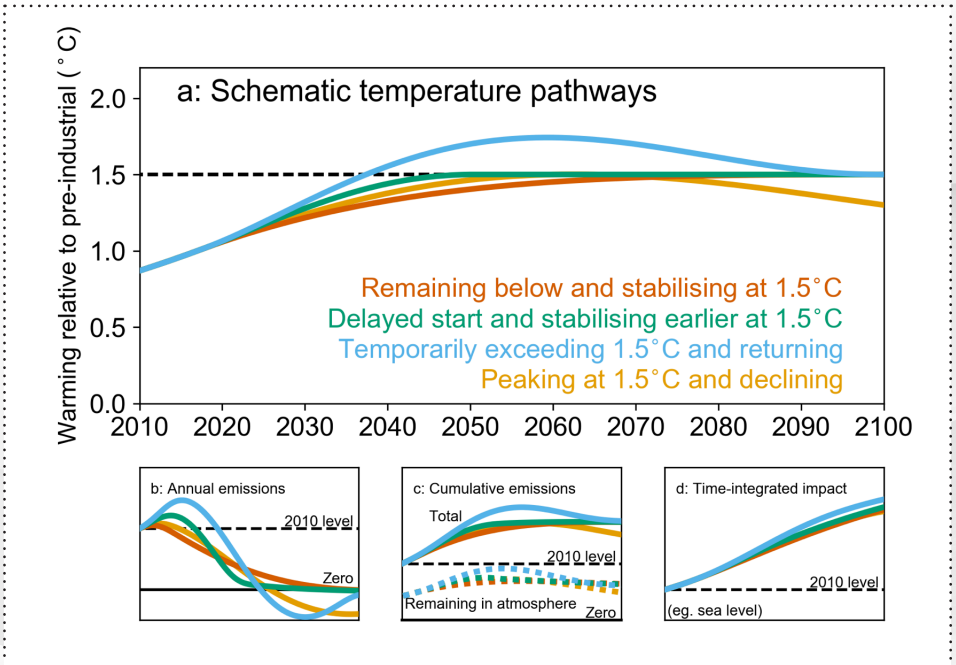


Figura 4A.Possíveis cenários de aumento da temperatura atmosférica média

1. INTRODUÇÃO

São previstas consequências significativas, dependendo do tipo de recursos naturais gerenciados e sistemas humanos. A figura 6 mostra essas consequências para diferentes ecossistemas.

Figura 5. Exemplo de eventos climáticos extremos cada vez mais comum no mundo

Fonte das imagens:

https://meioambiente.culturamix.com/blog/wp-content/gallery/6_54/historico-de-enchentes-no-brasil-12.jpg

https://segredosdomundo.r7.com/wp-content/uploads/2020/09/enchentes-principais-causas-de-inundacoes-e-historico-no-brasil.jpeg

https://imagens.ebc.com.br/1MA8b22riv_ICzcgCjuD_KN2Hlo=/1170x700/smart/https://agenciabrasil.ebc.com.br/sites/default/files/atoms/image/enchente_foto.jpg?itok=3TJl1K0h

https://static.dw.com/image/58322079_303.jpg

https://veja.abril.com.br/wp-content/uploads/2021/07/incendio.jpg?quality=70&strip=info&w=753

https://g1.globo.com/natureza/noticia/2020/09/12/em-um-ano-governo-bolsonaro-corta-verba-para-brigadistas-em-58.ghtml

1. INTRODUÇÃO

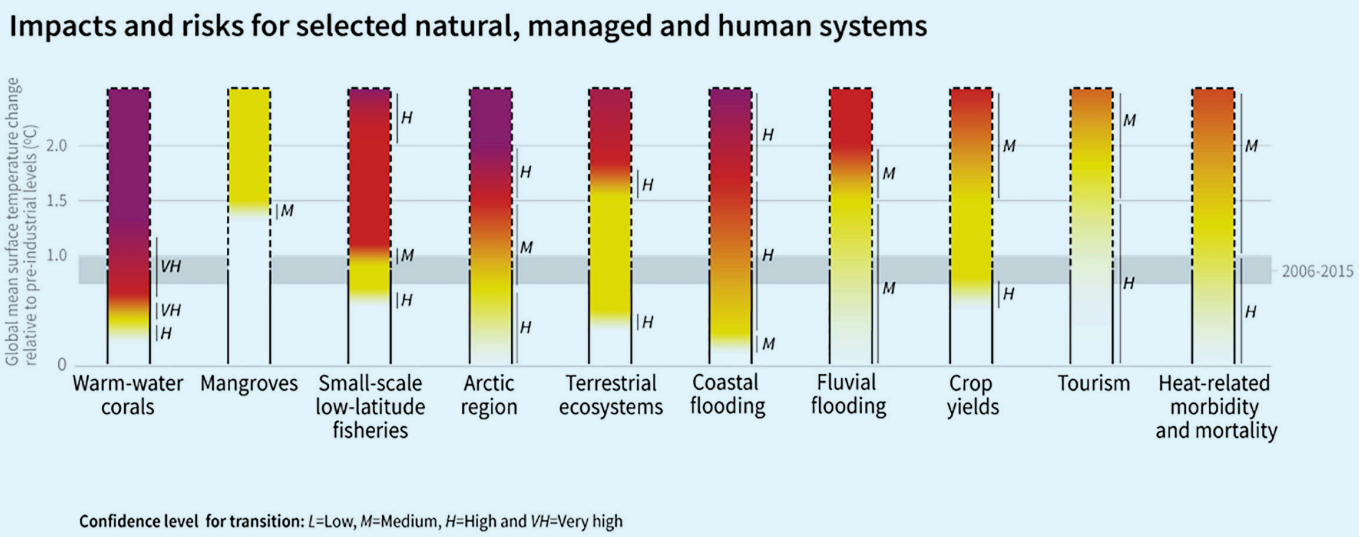


Figura 6. Influência do aumento de temperatura em diferentes ecossistemas

ROXO *(muito alto)*	Indica riscos muito altos de impactos/riscos graves e presença de irreversibilidade significativa ou persistência de riscos relacionados ao clima, combinada com capacidade limitada de adaptação devido à natureza do risco de impactos.
VERMELHO *(alto)*	Indica impactos/riscos graves e generalizados.
AMARELO *(moderado)*	Indica que os impactos/riscos são detectáveis e atribuíveis às mudanças climáticas com pelo menos confiança média.
BRANCO *(indetectável)*	Indica que nenhum impacto é detectável e atribuível à mudança climática.

Fonte: https:// Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: MASSON-DALMOTTE, Valérie et al. (eds.). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK: Cambridge University Press: Nova York: IPCC, 2018.

1. INTRODUÇÃO

Todos os países são emissores de GEE, porque toda atividade humana tem impacto sobre o ambiente. Contudo, há alguns países que são mais responsáveis pela intensificação das emissões. O olhar conjunto para o GEE total e *per capita* mostra uma preocupante percepção de que a evolução do PIB de um país sem uma preocupação com a emissão de CO_2 pode ser catastrófica. Hoje a média mundial de emissão de CO_2 *per capita* está em torno de 4,4 t CO_2.

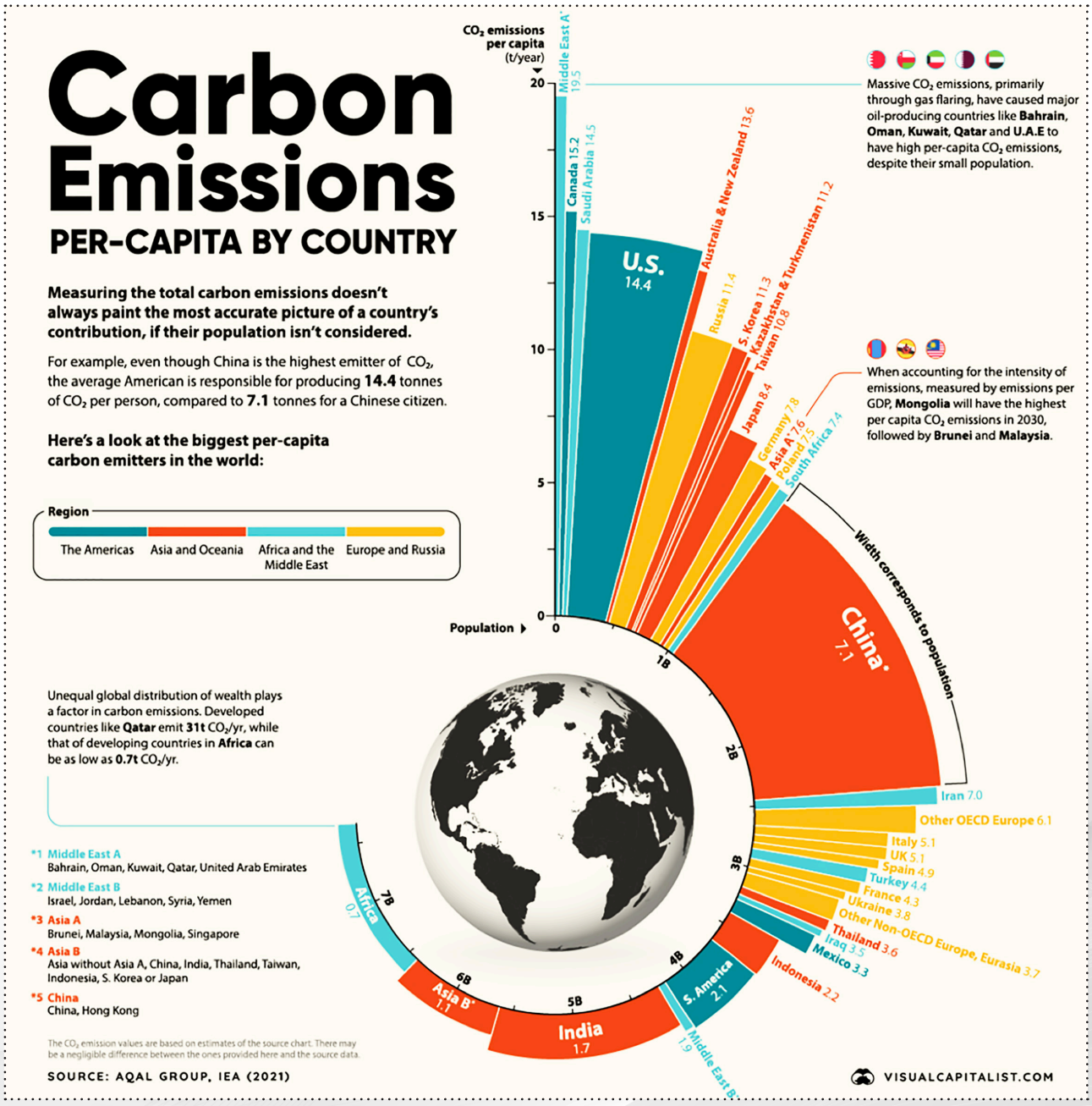


Figura 7. Emissões de carbono *per capita* por país

1. INTRODUÇÃO

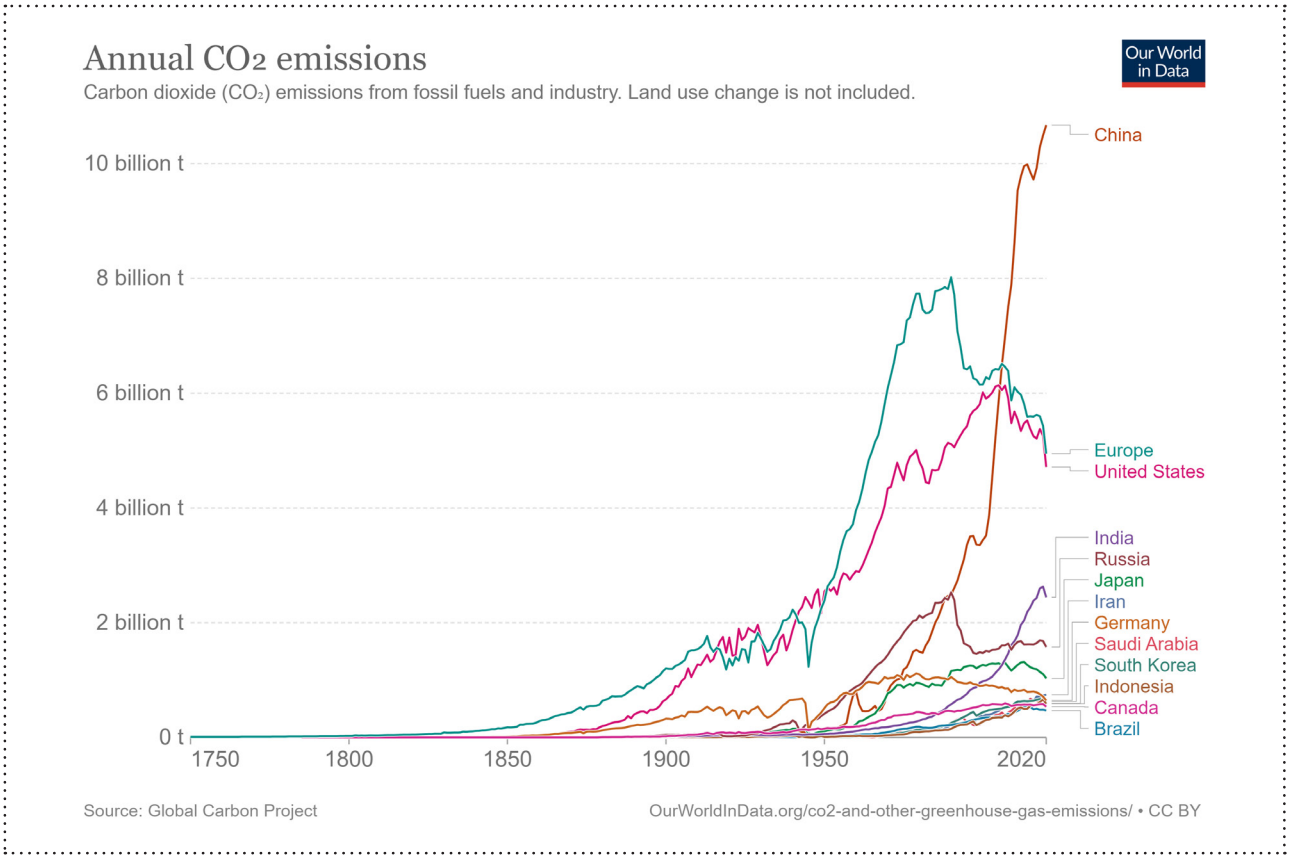


Figura 8. Emissão de CO_2 total – principais países emissores

Metade da população da Terra já ocupa países que ultrapassaram os 4,4 t CO_2. Assim, as ações em países que já ultrapassaram essa marca são de substituição de fontes fósseis, e nos que estão em evolução são de usar novas formas de energia limpa. O Brasil, por exemplo, está entre os 13 maiores emissores do mundo, sendo as atividades de uso da terra as responsáveis por mais de 50% das emissões no nosso caso.

Neste contexto, é fundamental definir políticas públicas que deem suporte ao uso de energias renováveis que não sejam dependentes dos combustíveis fósseis, como o etanol, biodiesel, biogás, hidrogênio, eólica e solar, a partir da intensificação dos estudos de impacto ambiental, a fim de reduzir significativamente as suas emissões de uso da terra.

Fonte:
GLOBAL CARBON PROJECT. Supplemental data of Global Carbon Budget 2021 (Version 1.0) [online]. [s. l.], 2021. Disponível em: https://doi.org/10.18160/gcp-2021. Acesso em: 2 set.

ANDREW, Robbie M.; PETERS, Glen P. (2021). The Global Carbon Project's fossil CO_2 emissions dataset [online]. [s. l.], 14 out. 2021. In: Zenodo. Disponível em: https://zenodo.org/record/5569235#.YxyH8y3OpTY. Acesso em: 2 set. 2022.

B. ENVOLVIMENTO DA SAE BRASIL E DA SAE4MOBILITY

A SAE BRASIL é uma entidade de natureza educacional e cultural que atua há mais de 30 anos desenvolvendo atividades que são fonte de conhecimento e atualização tecnológica da indústria, da academia e dos órgãos técnicos do governo, com foco em inovações e tendências da mobilidade brasileira. Ela é uma entidade sem fins lucrativos e apartidária.

A associação foi fundada no Brasil em 1991 por executivos dos segmentos automotivo e aeroespacial que, conscientes da necessidade de abrir as fronteiras do conhecimento para os profissionais brasileiros de mobilidade, tornaram a SAE BRASIL referência internacional.

Conhecida como "A Casa do Conhecimento da Mobilidade Brasileira", a entidade forma e qualifica profissionais, promovendo diversos eventos com abordagem técnico-científica relacionada a engenharia, competitividade, tecnologia e inovação, entre outras.

A SAE BRASIL é associada e fundadora da SAE4Mobility, um instituto de ciência, tecnologia e inovação com foco na realização de projetos visando a mobilidade sustentável e a preservação do meio ambiente.

A SAE BRASIL e a SAE4Mobility acreditam na importância das rotas de descarbonização das fontes energéticas que propulsionam os transportes de várias formas, permitindo o progresso do conforto da sociedade humana e satisfazendo muitas das suas necessidades socioeconômicas e financeiras. Somente um debate amplo, democrático e tecnicamente embasado pode colaborar na definição de estratégias públicas sustentáveis, eficazes e viáveis para o nosso País.

Imbuída desses princípios, a entidade aceitou o honroso convite da ClimaInfo para produzir o presente documento. Seu propósito está intrinsicamente ligado à construção do conhecimento que ajude na criação de políticas de Estado de longo prazo, sem qualquer viés político-partidário.

1. INTRODUÇÃO

C. PROPÓSITO DO TRABALHO

O presente relatório tem por objeto o mapeamento de cadeias sustentáveis na mobilidade que minimizem a utilização de combustíveis fósseis, privilegiando, assim, a utilização de energias renováveis como as provenientes dos biocombustíveis, da eletrificação veicular a baterias, híbridos e com células a combustível cujo vetor de energia é o "hidrogênio verde" (H_2V). As perspectivas sugeridas têm como foco um período de aproximadamente 12 anos.

O relatório visa ainda indicar direções para a criação de caminhos tecnológicos a serem incorporados ao "Plano Nordeste Potência – mais empregos, mais água, mais energia para o Brasil" e tem o objetivo de provocar um debate positivo sobre o crescimento e desenvolvimento socioeconômico e ambiental para o Nordeste brasileiro, de forma a valorizar uma transição energética justa com base na economia circular e inclusiva, buscando sempre apontar os potenciais de energias renováveis da região.

O plano é parte de uma iniciativa que reúne cinco organizações brasileiras, tendo a ClimaInfo na coordenação, o Centro Brasil no Clima, o Fundo Casa Socioambiental, o Grupo Ambientalista da Bahia e o Instituto Clima. Agora a SAE4Mobility se une a essa grande iniciativa através da formulação deste documento.

Seu lançamento é previsto para a segunda quinzena de setembro de 2022, concomitante a uma campanha de comunicação com o fim de levantar o debate aqui proposto, e seguido da apresentação dos dados que possam servir de referência para as lideranças políticas que assumirão seu mandato a partir de janeiro de 2023. Além disso, o debate será continuado na 27ª Conferência do Clima (COP 27), em novembro, e reforçado com equipes de transição dos(as) candidatos(as) eleitos(as).

Para compor o plano, tanto os temas de mobilidade elétrica e hidrogênio verde bem como as outras fontes de energia limpa são fundamentais. As análises devem observar quatro vetores:

I. potencial de descarbonização por tecnologia *versus* tempo;

II. benefícios da instalação de indústrias para mobilidade elétrica e H_2 verde (empregos, arrecadação de impostos, mercados potenciais, impactos na balança comercial);

III. regionalidade, considerando o Nordeste;

IV. como a sociedade se organiza para promover e adotar tais cadeias.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Como o presente documento tem por objetivo ajudar tomadores de decisão e lideranças políticas a compreender melhor o setor de energia e as suas oportunidades intrínsecas, se faz necessário entender alguns conceitos básicos, como, por exemplo, a classificação das fontes de energia.

I. Fontes de energia e o conceito de renovável

As fontes de energias são classificadas em primárias e segundárias (figura 9):

a. As fontes primárias de energia são um recurso energético que existe na natureza e que pode gerar energia de forma direta: geotérmica, gravitacional, solar e nuclear;

b. As fontes secundárias são provenientes de todas as outras transformações a partir das fontes primárias: maremotriz (dos oceanos), eólica, hidráulica, petróleo, gás natural, entre outras.

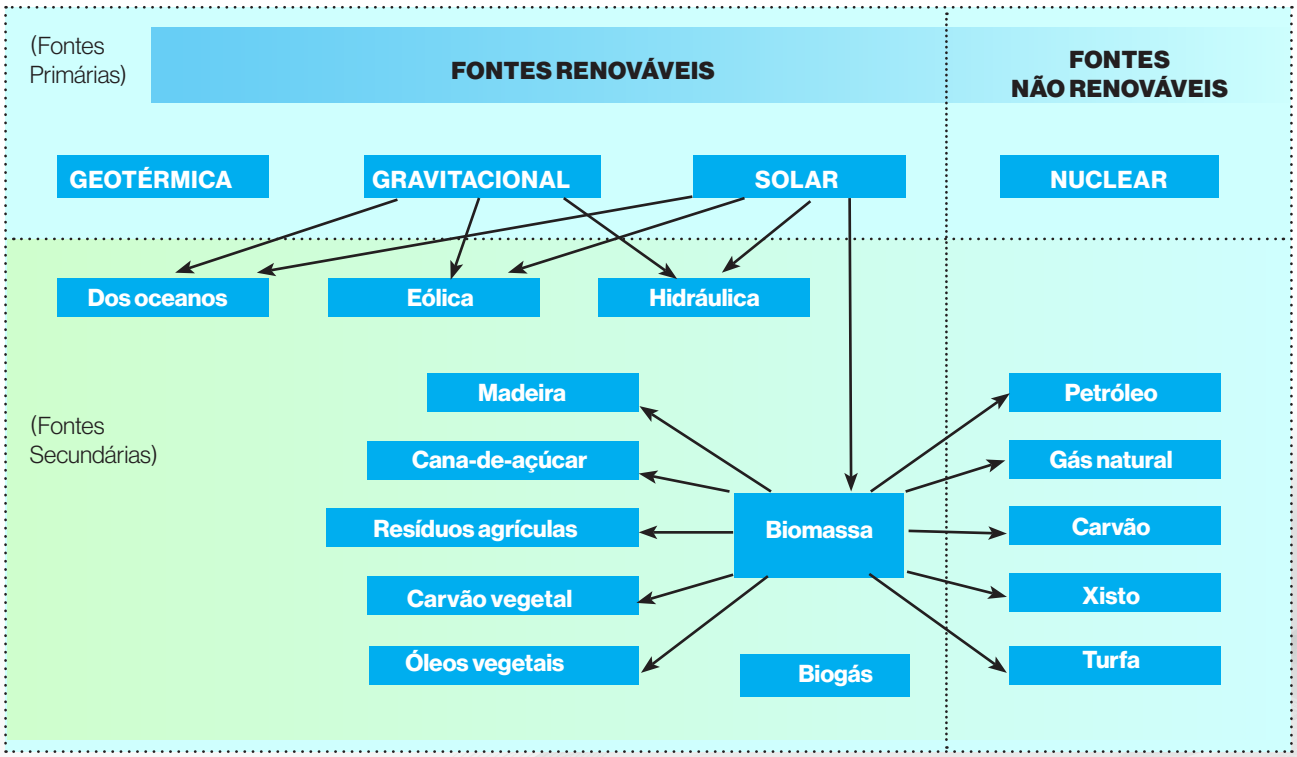


Figura 9. Classificação das fontes de energia primárias e secundárias.

Fonte: Silva, 2014.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Do ponto de vista do conceito de energias renováveis, é importante ter em mente que todas as fontes que utilizamos foram produzidas pela natureza. Então, como saber se uma fonte é ou não renovável? A questão que se deve levar em consideração é o tempo de reposição natural e se há a possibilidade dessa reposição. A reposição do petróleo, por exemplo, levará milhares de anos e depende de condições favoráveis como a pressão, portanto ela é considerada uma fonte não renovável.

Já a reposição de um plantio de cana-de-açúcar leva apenas alguns anos, por isso a classificamos como uma fonte renovável. A renovabilidade das formas de energia é definida sob a perspectiva do tempo da vida humana.

Notas importantes

Conhecer a classificação das fontes de energia permite:

I. Mapear as potencialidades de cada país ou região;

II. Planejar as formas de utilização, priorizando as fontes renováveis de energia locais;

III. Utilizar as fontes não renováveis como forma de armazenamento de energia que garanta a segurança energética de fontes intermitentes como a solar fotovoltaica e a eólica;

IV. Formação de mão de obra especializada para cada potencialidade, seja do ponto de vista técnico, seja do ponto de vista dos impactos socioambientais de cada fonte.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

A. EVOLUÇÃO DO USO DE FONTES DE ENERGIA

Examinando a evolução energética da humanidade é possível notar uma tendência para utilização de combustíveis menos intensivos em carbono e mais intensivos em hidrogênio. No início das civilizações até a primeira revolução industrial predominou a fase sólida dos energéticos com o uso da bioenergia a partir da lenha e posteriormente do carvão. O século XX marca a fase líquida dos combustíveis, e a tendência de diminuição da cadeia carbônica, aumentando a relação da molécula de hidrogênio (hidrogênio/carbono) (Camargo, 2004). Para facilitar a compreensão, podemos observar a relação de hidrogênio/carbono do petróleo que é de duas moléculas de hidrogênio para uma de carbono, ou seja, H/C = 2. Já a relação do carvão de H/C = 1.

No século XXI nasce (ou renasce) a utilização do gás natural como solução não renovável, porém menos intensiva em carbono para ajudar na transição energética justa (H/C = 4).

O desenvolvimento de uma economia à base do hidrogênio está sendo intensificado pela necessidade de uma transição energética, temática que será aprofundada mais adiante.

A figura 10 ilustra a relação entre o hidrogênio e o carbono ao longo dos últimos dois séculos.

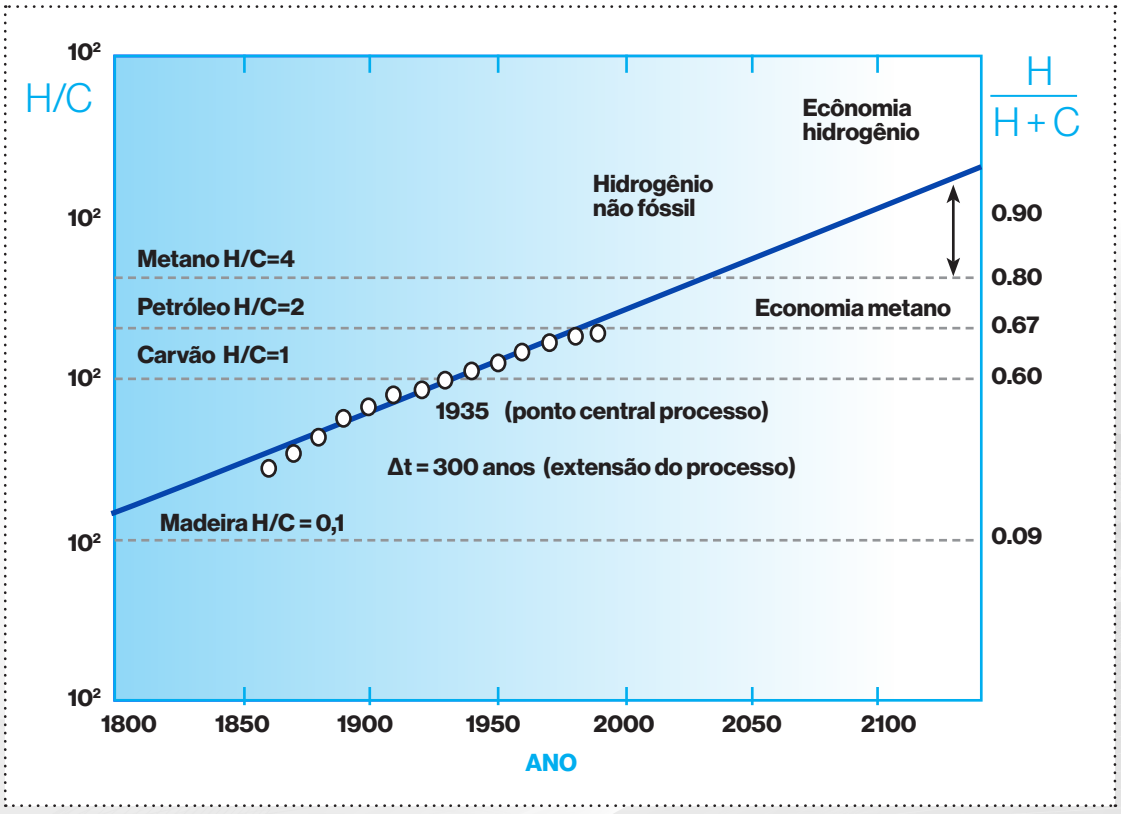


Figura 10. Processo histórico de descarbonização dos combustíveis

Adaptado de: Camargo (2004)

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

A utilização dos recursos naturais do planeta como fonte de energia é dos comportamentos mais antigos da espécie humana, porém isso transforma o meio ambiente. O consumo e o beneficiamento de matérias-primas são intrínsecos à atividade humana. Dessa forma, à medida que novas tecnologias são incorporadas ao dia a dia, também aumenta a intensidade de energia incorporada aos produtos.

Um aumento exponencial dessa transformação e consumo foi observado a partir da primeira revolução industrial em que "novas"[1] fontes de energia como carvão, gás natural e petróleo começam a beneficiar e a baratear bens de consumo, permitindo que uma quantidade maior de pessoas participem no mercado consumidor.

Intensifica-se o uso de trens e a mobilidade com motores a combustão. O crescimento econômico começa a impactar o meio ambiente, tanto em função do aumento de emissões locais, seja em função das emissões de gases de efeito estufa de forma nunca percebida antes como consequência da atividade humana (emissões antropogênicas).

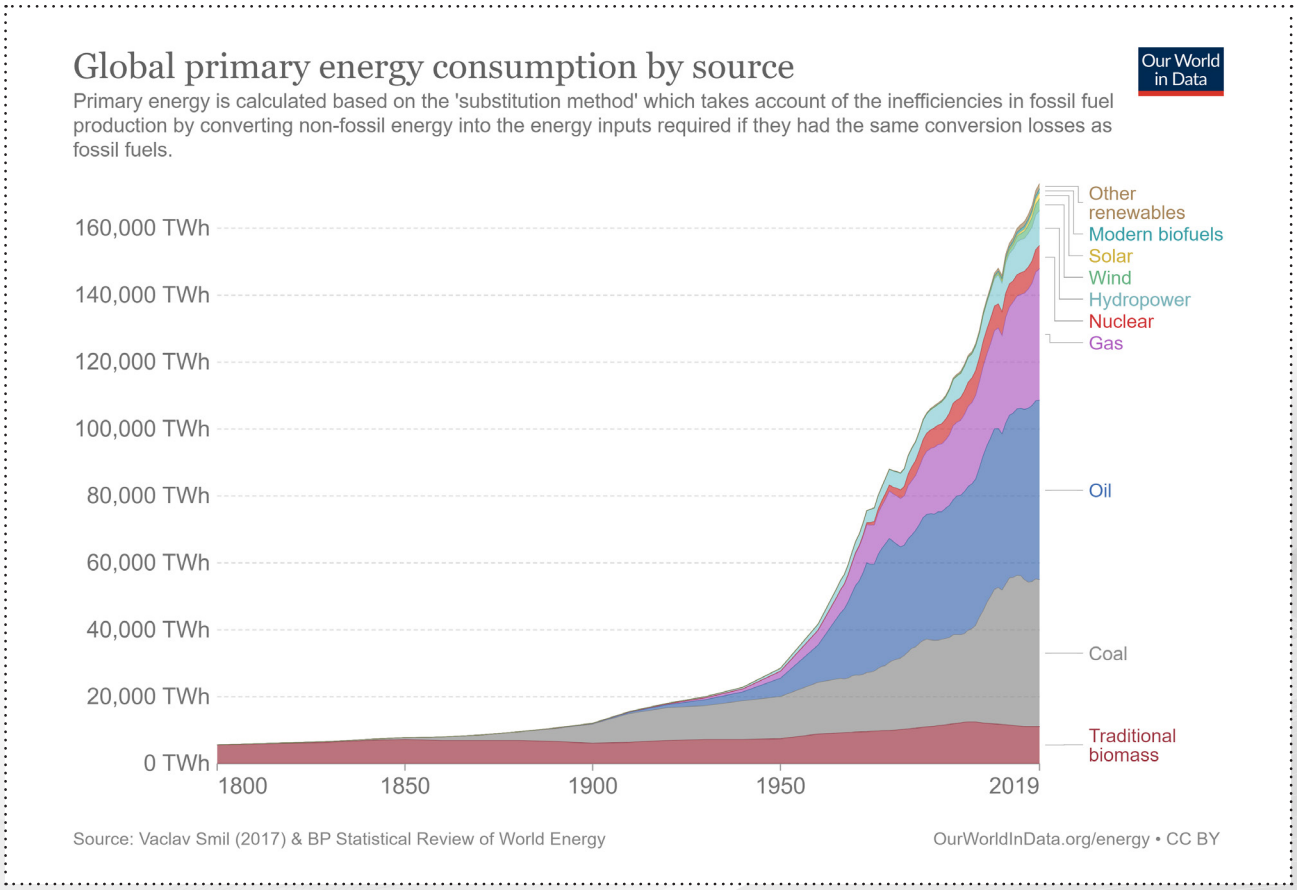


Figura 11. Consumo de energia por fonte

Fonte: Ritchie e Roser, 2020.

[1] Não existem novas fontes de energia. As transformações energéticas já existem naturalmente, bastando serem descobertas ou economicamente viáveis

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Para ser mais específico, em 1850 o uso de fontes não renováveis de energia começa a substituir a biomassa (lenha) como fonte renovável de energia. Vale a pena salientar que, em termos absolutos, o uso de biomassa como fonte de energia sempre teve uma participação significativa e constante na história.

Outras fontes energéticas começam a ter importância significativa na matriz energética mundial, e, a partir dos anos 1960, inicia-se o uso da energia nuclear. A energia solar ou a eólica, comumente chamadas de fontes renováveis "modernas", passam a ser utilizadas em escala industrial na década de 1980.

Uma análise mais detalhada das últimas décadas permite perceber um aumento significativo do uso de petróleo, carvão e gás natural como com fontes de energia para o crescimento e o desenvolvimento econômico. Após a Segunda Guerra Mundial, vários países aceleraram o consumo de energia, porém sem um planejamento estratégico que estivesse atento às necessidades ambientais globais do planeta (porque a preocupação ambiental quase sempre era considerada como entrave para a melhoria da qualidade de vida). Atualmente, as questões ambientais estão na pauta da maioria das empresas ou países, sendo que as boas práticas ambientais são fatores observados por consumidores e, consequentemente, por eleitores.

Notas importantes

I. É importante desenvolver tecnologias para tornar as fontes renováveis de energia mais viáveis economicamente;

II. Incentivar as empresas a utilizar certa porcentagem de fontes de energia limpa em suas atividades;

III. Tornar o setor público referência, dando o exemplo e utilizando uma parte de sua demanda energética de fontes renováveis, para além do Sistema Interligado Nacional, além de obrigar o setor público a somente licitar produtos com selo Procel classificado com "A";[2]

IV. Incentivar a eficiência energética e a substituição de produtos de menor eficiência;

V. Incentivar a produção nacional de equipamentos de geração de energia renovável, gerando empregos, renda e capital intelectual no País.

[2] *Para mais informações, acessar o site www.procelinfo.com.br.*

B. OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E SUA UTILIZAÇÃO COMO FONTE DE ENERGIA PARA A MOBILIDADE

Combustíveis fósseis são recursos encontrados na crosta terrestre e sua utilização gera energia a partir da combustão. Carvão, gás natural e petróleo são usados amplamente para o consumo energético. A intensificação do seu uso coincide com a evolução das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, conforme já foi apresentado neste relatório.

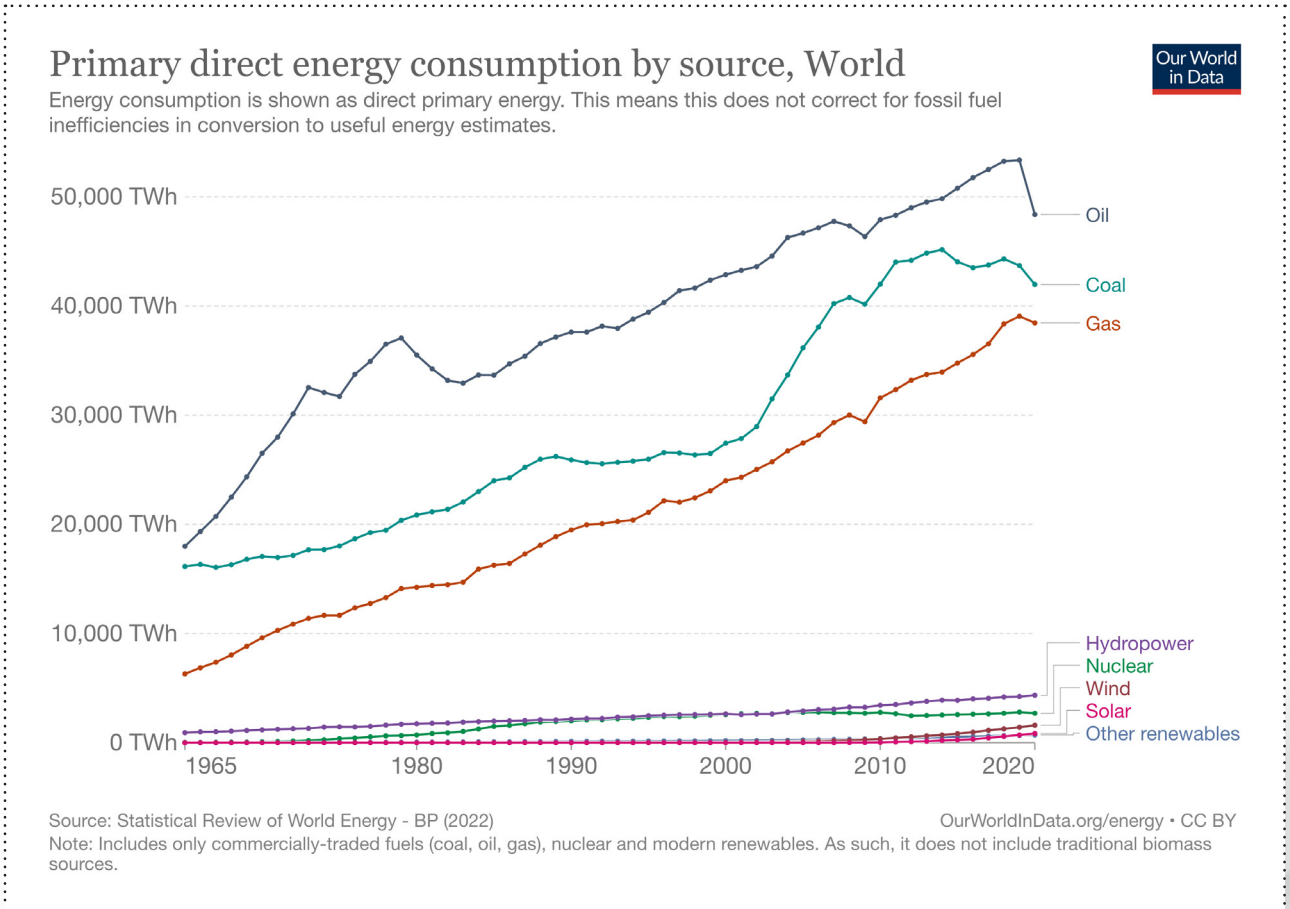


Figura 12. Consumo global de energia primária por fonte energética nas últimas décadas

Fonte: (Our World In Data, 2020)

Dados do século XIX são provenientes do trabalho de Vaclav Smil Energy Transitions: Global and National Perspectives. Os dados de 1965 em diante vêm da última versão do Statistical Review of World Energy da BP

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Segundo mostram dados do ano de 2020 do Our World in Data, 73,2% da emissão de gases de efeito estufa global são provenientes do consumo de energia. O setor de transporte é responsável por 16,2% deste total (figuras 13 e 14). Ou seja, o gás natural e o petróleo para os transportes têm uma participação significativa no aumento da concentração de CO_2 na atmosfera terrestre.

Ainda com base nos mesmos dados, a geração de eletricidade e de calor é responsável pela maior contribuição para as emissões de CO_2eq no mundo, os transportes estão em segundo lugar, seguidos de manufatura, construção (principalmente cimento e materiais similares) e agropecuária, mostrando claramente uma demanda por uso de tecnologias renováveis para produção de energia. No Brasil, a maior parcela das emissões é proveniente da agropecuária e de mudanças no uso da terra. (figura 15)

Os transportes ocupam o segundo lugar, porém com uma participação ainda maior que no cômputo mundial, ou seja, 24% de participação em 2018.

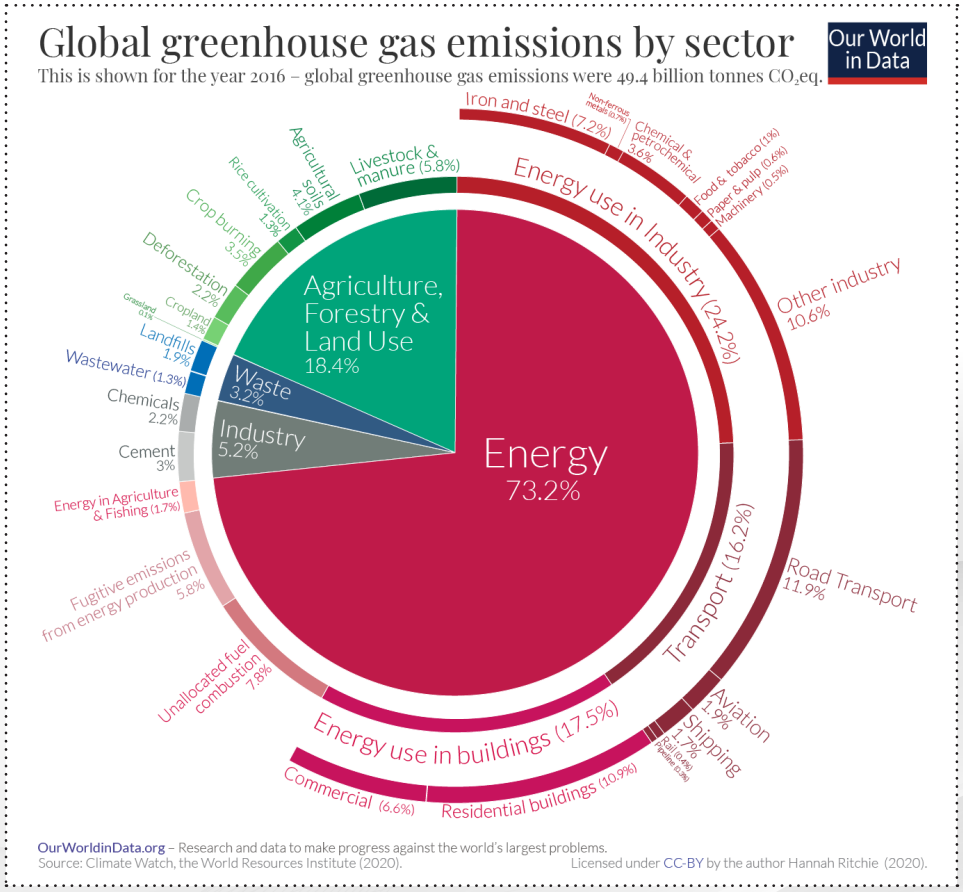


Figura 13. Emissão global de GEE por setor econômico em 2020

Fonte: Ritchie e Roser, 2020.

Dados do século XIX são provenientes do trabalho de Vaclav Smil Energy Transitions: Global and National Perspectives. Os dados de 1965 em diante vêm da última versão do Statistical Review of World Energy da BP.

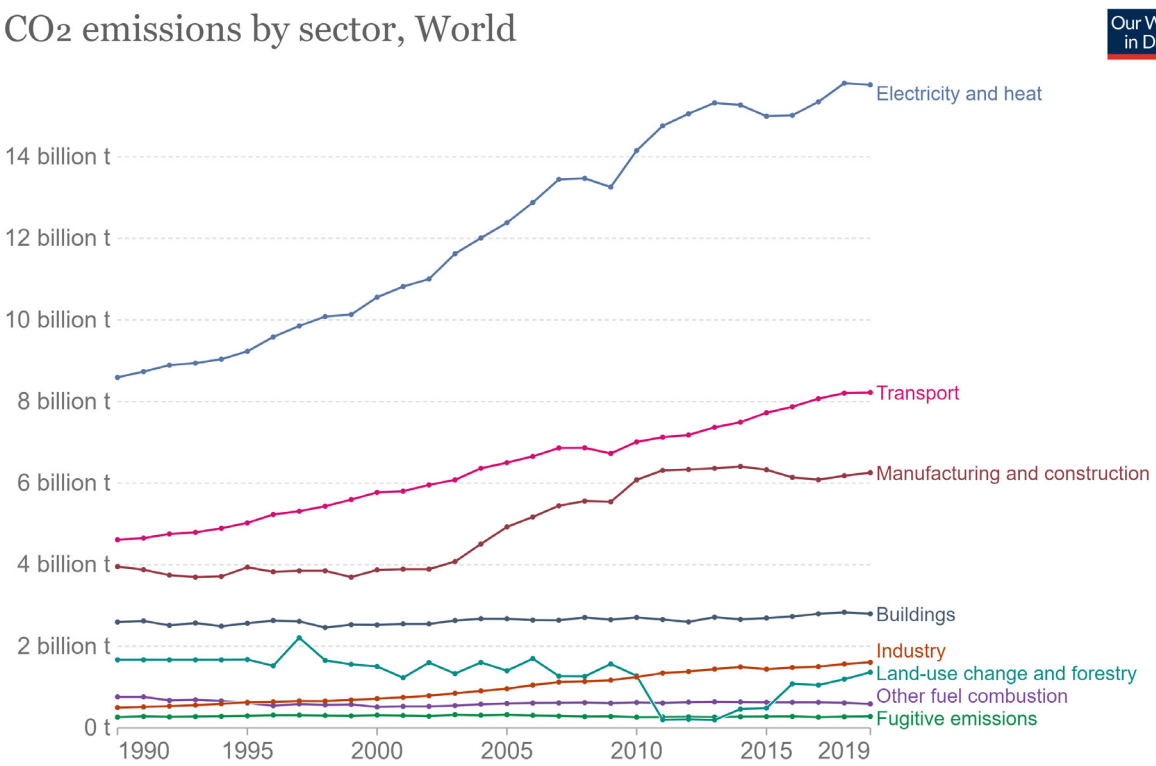
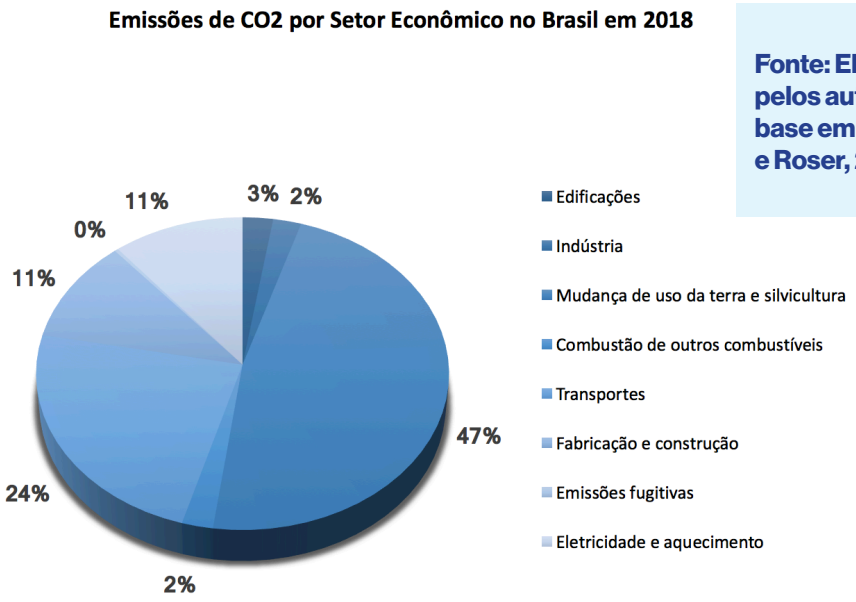


Figura 14. Emissão global de CO_2 por setor econômico / Fonte: (Our World In Data, 2020)

EMISSÕES DE CO_2 POR SETOR ECONÔMICO NO BRASIL EM 2018

Figura 15. Emissões de CO_2 por setor econômico no Brasil em 2018



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Ritchie e Roser, 2020.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Assim fica evidente a necessidade de um planejamento estratégico adequado para a promoção da descarbonização das fontes de energia para o setor de trasnportes. Esse planejamento precisa acontecer garantindo-se a matriz energética e a disponibilidade de cada região do País.

Notas importantes

Vale a pena ressaltar que, quando falamos de emissões de gases, devemos separar em dois grupos distintos, o que muitas vezes pode causar confusão em toda a sociedade. Até 2010, quando falávamos corriqueiramente em emissões de gases, nos referíamos aos gases nocivos, poluentes (NOx, HC, CO, aldeídos, particulados), porém, com a evolução do aumento de concentração do CO_2, que é um gás não poluente encontrado na atmosfera, passou-se a analisar as emissões de gases de efeito estufa, conhecidos como GEE.

Como pode-se observar, o setor de transporte tem uma importância significativa nas emissões de GEE. Dessa forma, é necessária uma transição adequada, específica para o setor de transporte, seja na esfera pública, seja na esfera privada.

I. No setor público:

a. Evitar combustíveis fósseis, principalmente nos grandes centros;

b. Restringir veículos da esfera pública para que sejam somente licitados com selo PBE veicular com classificação “A”;

II. No setor privado, incentivar a troca de veículos leves e pesados menos eficientes por outros com maiores níveis de eficiência;

Sempre que possível incentivar o setor industrial e logístico a responder por demandas menos impactantes na emissão de GEE.

C. BIOCOMBUSTÍVEIS

Os biocombustíveis são combustíveis líquidos ou gasosos derivados de biomassa. Eles podem ser obtidos da cana-de-açúcar, do milho, dos óleos vegetais, da gordura animal, de algas, da madeira ou de resíduos agrícolas e florestais. Sua produção no Brasil tem alto desenvolvimento tecnológico e são fontes renováveis de energia.

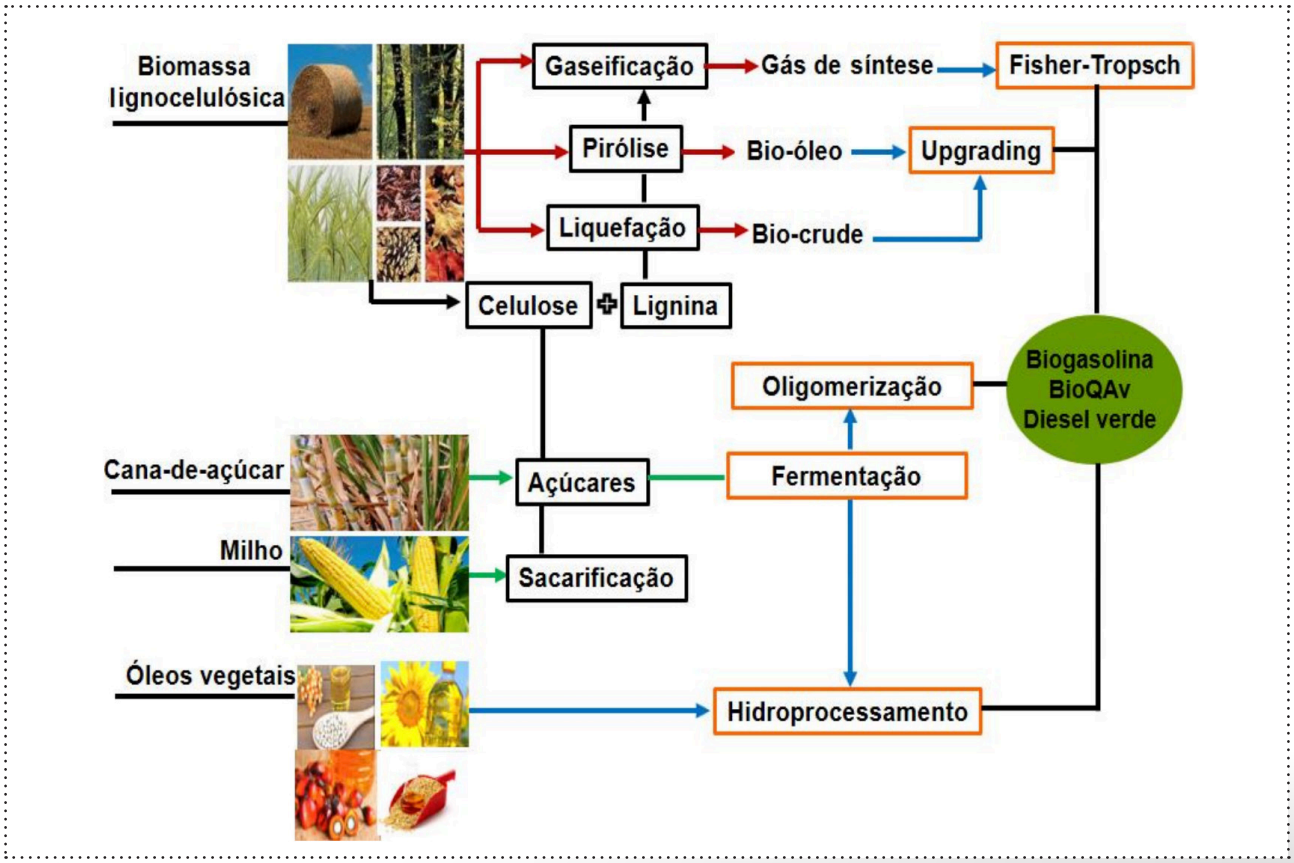


Figura 16. Rotas de obtenção de biocombustíveis *drop-in* utilizando diferentes matérias-primas

Fonte: Scaldaferri e Pasa, 2019.

O metano (CH_4) é considerado um biocombustível gasoso. Os principais biocombustíveis líquidos utilizados mundialmente são o etanol e o biodiesel. Os bicombustíveis drop-in podem ser misturados sem a necessidade de limitações de proporcionalidade, sendo classificados como diesel verde e o bioquerosene de aviação (que não será tratado neste relatório).

Várias legislações e programas de fomento à inovação incentivaram e incentivam o desenvolvimento e o uso de biocombustíveis no Brasil. Entre elas, pode-se citar o Inovar-Auto, o Renovabio, o Rota 2030 e o Plano Brasileiro de Etiquetagem Veicular, entre outros.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

i) O álcool e o Proálcool

Uma série de fatores históricos fez com que o Brasil se tornasse um dos maiores produtores de cana-de-açúcar mundial. O início da plantação aconteceu no Nordeste já no século XVI. A partir do século XIX, naturalistas europeus começaram a se interessar e a pesquisar nosso continente, na busca de novas formulações. A influência do uso de combustíveis oriundos de biomassa já começava desde então, sendo o Brasil um importante *player* mundial.

O próprio Henry Ford dirigiu um Ford 1914 abastecido com álcool. Sua previsão para o jornal americano *The New York Times* em 1925 é famosa: o álcool seria o "combustível do futuro".

In 1933, NebraskaGov. Charles Bryan and the Merrick Co. Sheriff filled up their cars with "Corn Alcohol" gasoline with 10 percent alcohol. The gas station is Earl Coryell's at 14th and N Streets in Lincoln. Photo from Nebraska State Historical Society (NSHS).

Foto: Nebraska State Historical Society (NSHS)

Figura 17. Posto de gasolina Earl Coryell's, nas ruas 14 e N, em Lincoln, Nebraska – uso de gasolina com 10% de álcool de milho

Em 1933, o então presidente brasileiro Getúlio Vargas criou o Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), já com o propósito de atenuar o uso de gasolina importada no País. Em 1975, no governo de Ernesto Geisel, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). O programa nasceu com o objetivo de diminuir a dependência dos combustíveis importados, em função da crise do petróleo de 1971 e da pressão econômica gerada pelos altos preços praticados pelos países produtores de petróleo. O Proálcool teve uma segunda fase entre 1979-1985 (segunda crise do petróleo), na qual destilarias autônomas passaram a produzir o combustível, independentemente da produção de açúcar. A partir de então, houve um aumento mais expressivo na produção desse combustível.

Nota importante

Conhecer os aproximadamente 47 anos de história desde a criação do Proálcool até os dias atuais evidencia a importância do estabelecimento de políticas de Estado de longo prazo e de uma visão estratégica e competitiva que fez com que o Brasil se tornasse um exemplo de desenvolvimento de biocombustíveis em relação ao mundo.

ii) Etanol

O etanol é um composto orgânico que, além do carbono, tem o hidrogênio e o oxigênio em sua fórmula molecular (C_2H_6O). Ele é produzido através da fermentação do amido ou de outros açúcares. De forma geral, existem dois tipos de etanol, o anidro (0,5% de água) e o hidratado (5% de água). O etanol pode ser usado como combustível veicular misturado na gasolina ou de forma direta. No primeiro caso, usa-se álcool anidro, no segundo, álcool hidratado. Atualmente, a proporção de álcool anidro misturada à gasolina brasileira está estipulada entre 25% e 27%. O etanol produzido por meio da cana-de-açúcar emite, em média, 80% menos gases de efeito estufa (GEE) do que a gasolina brasileira.

Conforme dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (Única), a utilização de veículos *flex fuel* vem aumentando significativamente desde 2009 e está atingindo aproximadamente 62% dos licenciamentos atuais.

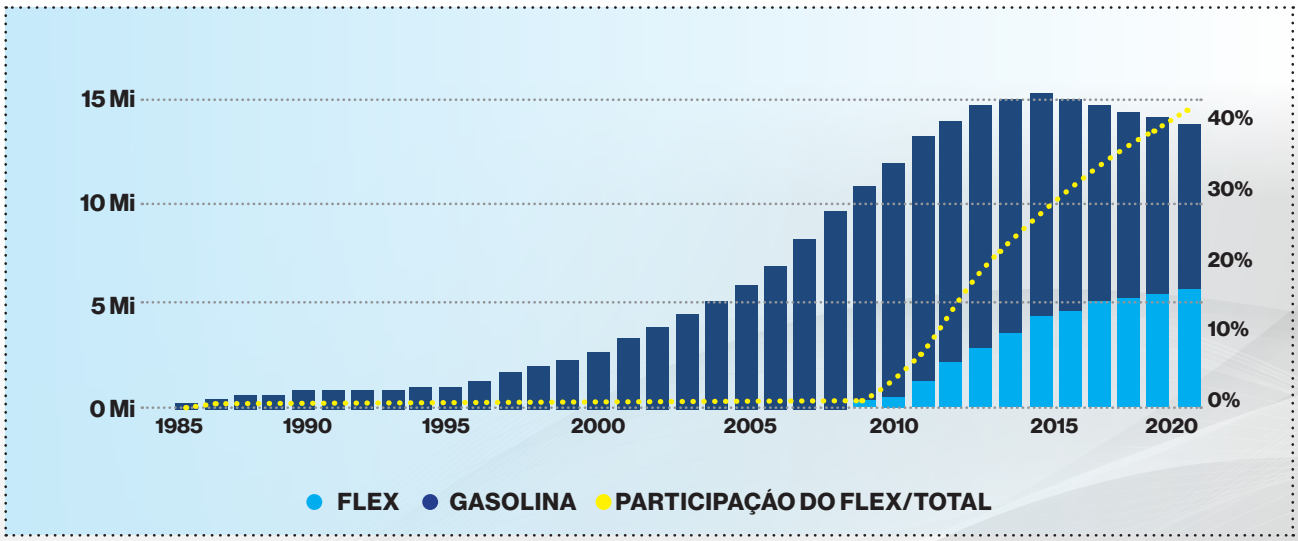


Figura 18. Proporção da frota circulante no Brasil por tipo de combustível

Fonte: https://observatoriodacana.com.br/listagem.php?idMn=147

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

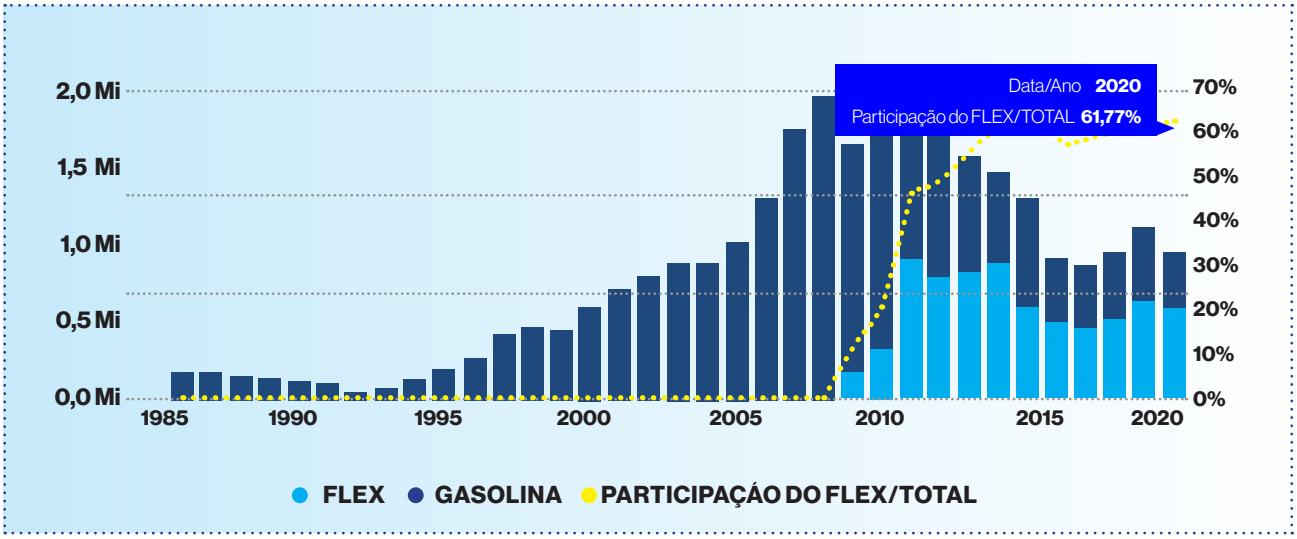


Figura 19. Proporção de licenciamentos no Brasil por tipo de combustível

https://observatoriodacana.com.br/listagem.php?idMn=147

A utilização do etanol como combustível e a participação dos veículos *flex fuel* no mercado brasileiro definem uma estratégia de descarbonização dos transportes por si sós. Há quase 50 anos o Brasil vem praticando um processo que países desenvolvidos vieram a priorizar somente no século XXI.

Segundo a empresa Raízen, a produção de etanol de segunda geração, obtido a partir das sobras e resíduos do processamento de cana-de-açúcar e outras fontes de celulose, pode elevar em 50% a produção sem necessidade de aumento de matéria-prima ou de área plantada, com menor emissão de carbono.

De acordo com o Ministério das Minas e Energia, atualmente existem no Brasil 361 usinas de álcool, e, em 2020, foram processados em torno de 660 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e produzidos 34 milhões de metros cúbicos de etanol.

O crescimento da produção de etanol também pode aumentar a cogeração de energia elétrica a partir da queima do bagaço, prática já adotada há muito tempo pelas usinas de álcool.

A grande extensão territorial do Brasil e a distribuição irregular da produção de etanol ao longo do País dificultam uma uniformidade de preços em relação à gasolina nas diversas regiões. Conforme o Anuário 2020 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a maior parte do etanol é produzida nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, conforme a figura 20. O Nordeste é o terceiro maior produtor.

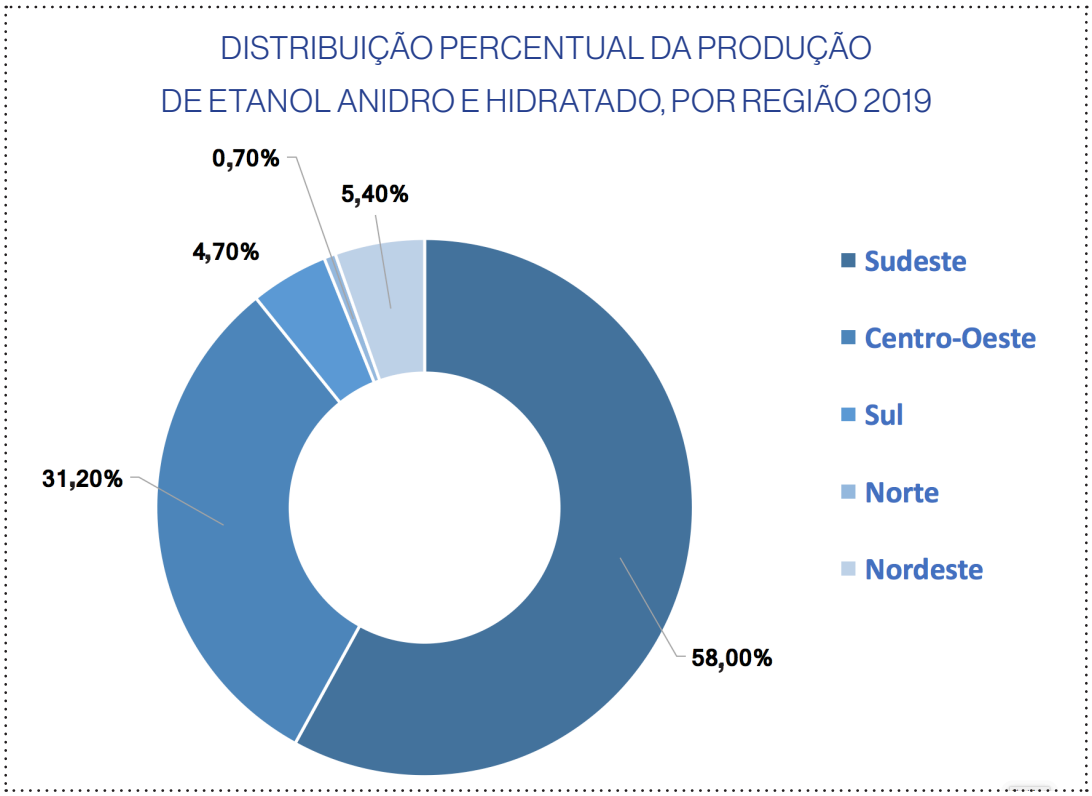


Figura 20. Distribuição percentual da produção de etanol anidro e hidratado, por região em 2019

Nota importante

Aumentar a participação do Nordeste para a produção nacional de etanol pode permitir uma maior integração da região na descarbonização do mercado de mobilidade brasileiro.

iii) Alternativas energéticas para motores com ciclo Diesel

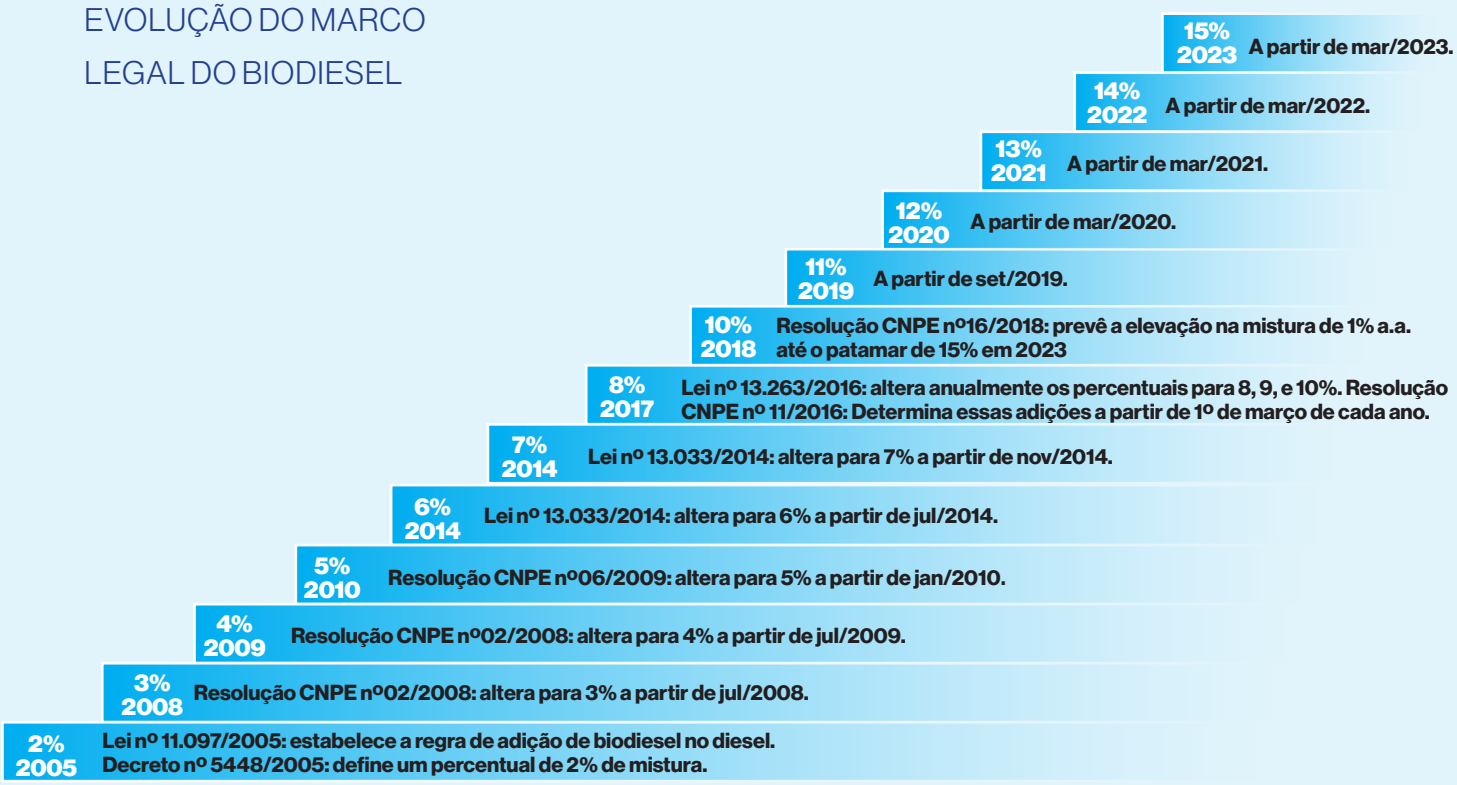
Os veículos comerciais usam motores que operam no ciclo Diesel, ou seja, motores cuja combustão é causada pela compressão da mistura ar com combustível, sem que seja necessária uma faísca elétrica para provocar a explosão que gera o movimento (ao contrário do ciclo Otto). Há alternativas de combustíveis renováveis apropriadas para o tipo de ciclo termodinâmico desse tipo de motor, entre elas estão os biocombustíveis, bicombustíveis *drop-in*, o diesel verde e o biogás (biometano).

Biodiesel

O biodiesel é uma alternativa ao diesel de origem fóssil e já vem sendo usado como uma forma de atenuar as emissões de CO_2 para veículos comerciais. Ele é utilizado como aditivo no óleo diesel em veículos pesados, picapes e utilitários movidos a diesel. Essa adição de biodiesel ao diesel passou a ser obrigatória por lei desde 2005, que estabeleceu inicialmente a adição de 2% de biodiesel ao diesel fóssil, elevando-se gradualmente com o passar dos anos, indo até 15%, conforme figura 21.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

EVOLUÇÃO DO MARCO LEGAL DO BIODIESEL



Fonte: Brasil, 2021b.

Figura 21. Evolução do marco legal do biodiesel

Conforme Nota Técnica da EPE de julho de 2021, a Lei n. 13.263/2016 autorizou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a elevar o percentual de biodiesel na mistura até o patamar de 15%, porém há testes em andamento que mostram riscos de contaminação para motores e sistemas de combustíveis. Há também relatos de contaminações em componentes de bombas de abastecimento em postos de combustíveis. O mercado ainda não conhece exatamente qual é o limite máximo de utilização de uma mistura diesel/biodiesel sem que haja risco de comprometimento da durabilidade dos componentes envolvidos.

Biometano

O biometano é uma fonte de energia obtida no processamento de detritos de processos orgânicos que permite uma otimização da economia circular, transformando dejetos em energia, os quais podem se originar dos lixos urbanos, que são de fontes diversas e devem ser minimizados pelo uso adequado de embalagens e restos de comida, além do processamento de biomassas diversas, de origem vegetal ou animal. Países europeus já usam em larga escala a geração de biogás para uso em geração de energia, porém esse gás, ao ser purificado e transformado em biometano, pode ser usado na mobilidade, em especial nos motores ciclo Diesel que possuem maior taxa de compressão, aproveitando melhor a energia de queima desse combustível que, além da descarbonização, permite uma maior efetivação da economia circular.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Nota importante

A utilização de caminhões movidos a biometano para a coleta de lixo nos centros urbanos deveria ser uma prioridade para as cidades brasileiras.

Bicombustíveis drop-in

Sem compostos oxigenados em suas composições, os bicombustíveis *drop-in* são higroscópicos (conseguem absorver água) e apresentam propriedades análogas aos combustíveis fósseis. Dessa forma são compatíveis com os componentes que equipam os veículos e a infraestrutura de armazenamento e distribuição atuais e têm um grande potencial para a descarbonização.

Diesel verde (inclui HVO)

O diesel verde é um combustível formado por uma mistura de hidrocarbonetos com composição química semelhante à do combustível fóssil (*drop-in*), podendo ser produzido a partir de óleo vegetal e animal, do processo de Fischer-Tropsch a partir de insumos renováveis, de processos fermentativos e a partir da oligomerização de álcoois.

O óleo vegetal hidrogenado (HVO) é um biocombustível de extrema importância para a descarbonização dos transportes e para as rotas de descarbonização da mobilidade. Originado a partir da hidrogenação de óleos, provenientes de sementes vegetais oleaginosas como a soja, a palma e outras, ou mesmo da gordura animal. Ele apresenta maior estabilidade de armazenamento, melhores propriedades de fluxo a frio e pode ser usado em motores de ciclo Diesel sem qualquer tipo de adaptação.

Nota importante

A extensa produção de sementes oleaginosas no Nordeste brasileiro é importante fonte de insumos energéticos renováveis para vários tipos de biocombustíveis. Essa abundância precisa ser incentivada não apenas enquanto produção agrícola, mas através do incentivo à indústria química e de transformação.

D. O HIDROGÊNIO (H_2) COMO VETOR DE ENERGIA PARA A ELETROMOBILIDADE

A energia e o hidrogênio têm um longo caminho percorrido em conjunto. Os primeiros experimentos de eletrólise da água datam do início do século XVIII. Há 200 anos os primeiros motores a combustão interna foram abastecidos com H_2. Os dirigíveis e mesmo a viagem do homem à Lua são de responsabilidade do elemento químico mais abundante da Terra: o hidrogênio (IEA, 2019).

Não há agricultura atual moderna sem o uso da amônia (NH_3) e no refino de petróleo é intensivo o uso desse elemento químico Mais além, a energia solar é proveniente da fusão de moléculas de hidrogênio, "que se transformam" em hélio, cuja explosão resultante disso são os fótons que chegam à Terra e tornam a vida possível.

Houve na década de 1970 e no início dos anos 1980 (período das crises do petróleo) estudos indicando o uso terreno do H_2 como vetor de energia, movimento que posteriormente arrefeceu.

O H_2 tem feito parte da vida contemporânea da humanidade, sendo utilizado no beneficiamento de produtos que garantem as facilidades da vida moderna. Porém, a partir do lançamento do documento "*The future of hydrogen: seizing today's opportunities*" em 2018 para a reunião do G-20, o H_2 entrou novamente em destaque, como vetor de energia.

Ainda no início do século XXI, o ex-presidente norte-americano George Bush criou política específica para o uso energético do hidrogênio, a qual também arrefeceu com a vitória do ex-presidente norte-americano Barack Obama que preferiu investir em veículos elétricos unicamente com bateria.

O professor Ennio Peres da Silva do laboratório de hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) tem mencionado que essa terceira onda favorável do hidrogênio energético é a última, pois desta vez o hidrogênio será de fato considerado como vetor de energia para uma economia com menos intensidade de carbono.

Vários são os fatores que têm intensificado a utilização do hidrogênio como insumo energético:

I. O hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo, porém de forma geral ele não é encontrado sozinho em nosso planeta. Está sempre ligado a outro elemento químico, como, por exemplo, ao oxigênio (água), ao carbono (gás natural) ou ao nitrogênio (amônia);

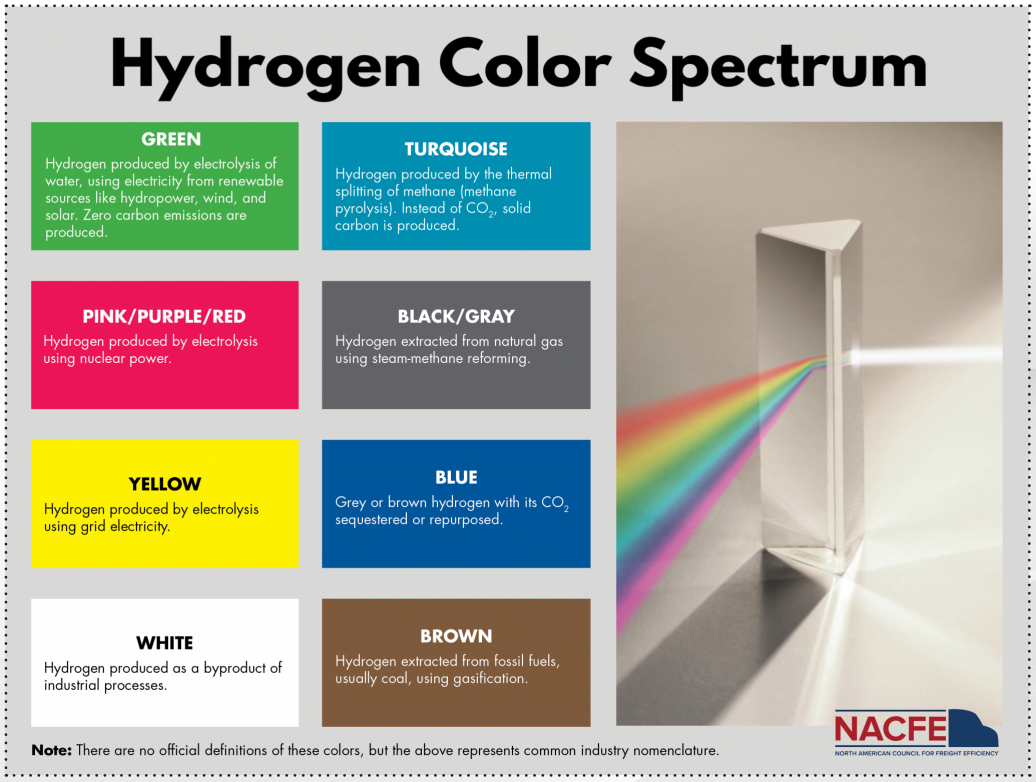
II. Não é fonte primária de energia, entretanto pode ser adquirido a partir de diversas fontes de energia primárias e secundárias, sendo classificado como vetor de energia. As paletas de cores, que serão discutidas mais à frente, resultam dessas várias formas de obtenção;

III. A economia do hidrogênio se refere a um futuro próximo em que o elemento será utilizado como vetor de energia. Como mencionado anteriormente, o hidrogênio já é utilizado em diversos produtos e processos e ganha cada vez mais atenção dos países para o desenvolvimento energético.

i) A paleta de cores e a forma de obtenção do hidrogênio

A discussão sobre uma paleta de cores definindo a origem do hidrogênio surgiu recentemente e tem se intensificado, devido à importância da análise do ciclo do "poço à roda", ou seja, o hidrogênio vai contribuir para a transição energética quanto mais sustentável for seu processo de obtenção.

Apesar da inexistência de uma norma internacional que padronize a cor do hidrogênio a partir de sua forma de produção, há um consenso sobre algumas cores do hidrogênio. Na figura 22 divulgada pelo North American Council for Freight Efficiency (NACFE) pode ser visto outra classificação publicada pela Volvo (figura. 23) e na tabela 1 pode ser visto como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no Brasil classifica esse espectro de cores.



Fonte: North American Council for Freight Efficiency, 2020.

Figura 22. Paleta de cores do hidrogênio segundo o NAFCE

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

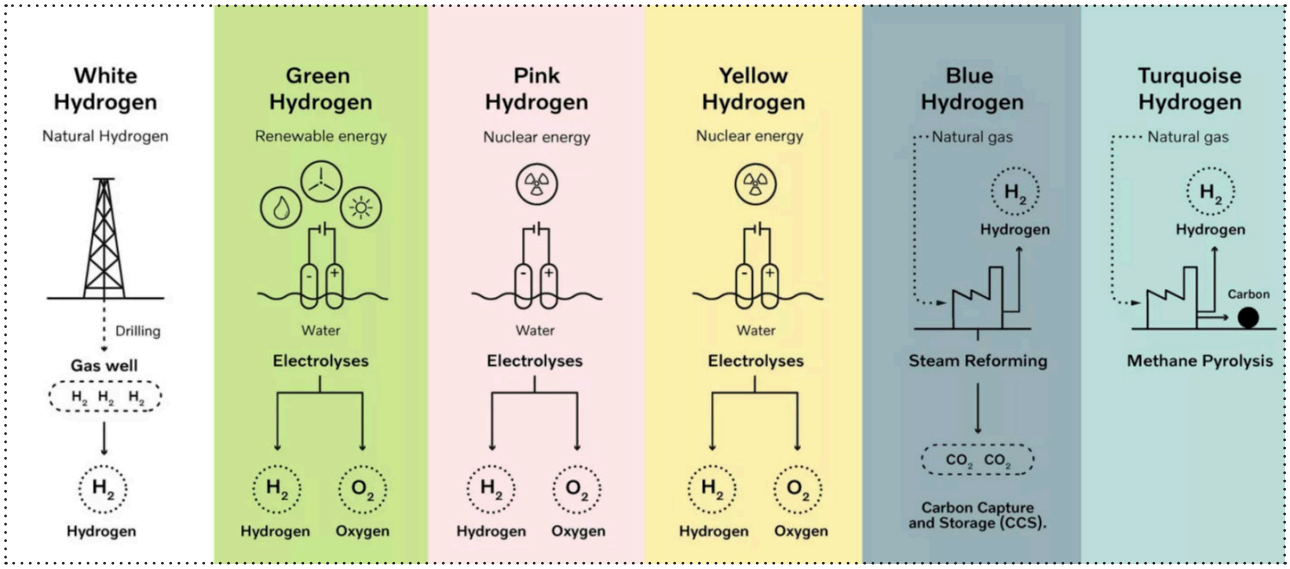


Figura 23. Paleta de cores segundo o Volvo Group / Fonte: Volvo Group, 2020.

Os exemplos de classificação de cores são apenas uma forma deste texto evidenciar que o tema ainda está em debate, sem que haja uma definição clara sobre ele.

Vale a pena comentar que tem se dado grande destaque ao hidrogênio verde a partir de fontes eólica e solar. A SAE4Mobility acredita que a padronização da produção do hidrogênio deve passar necessariamente pela avaliação de ciclo de vida que pode garantir, para além das cores, o verdadeiro impacto ambiental de cada tipo de produção do H_2. Esse tipo de sistema por cores estabelece tecnologias específicas para a obtenção do hidrogênio sem dar a dimensão das emissões durante todo o ciclo de vida de produção do H_2.

Nota Importante

A SAE4Mobility entende que deve ser criado um sistema de etiquetagem que nos permita mensurar o balanço de CO_2 e demais gases de efeito estufa por quilo de H_2 e com isso deixar as tecnologias neutras para se obter o H_2, observando a emissão de GEE em todo o processo.

PALETA DE CORES SEGUNDO A EPE

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano sem gerar CO_2
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocumbutíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Tabela 1. Paleta de cores segundo a EPE

Fonte: Brasil, 2021a.

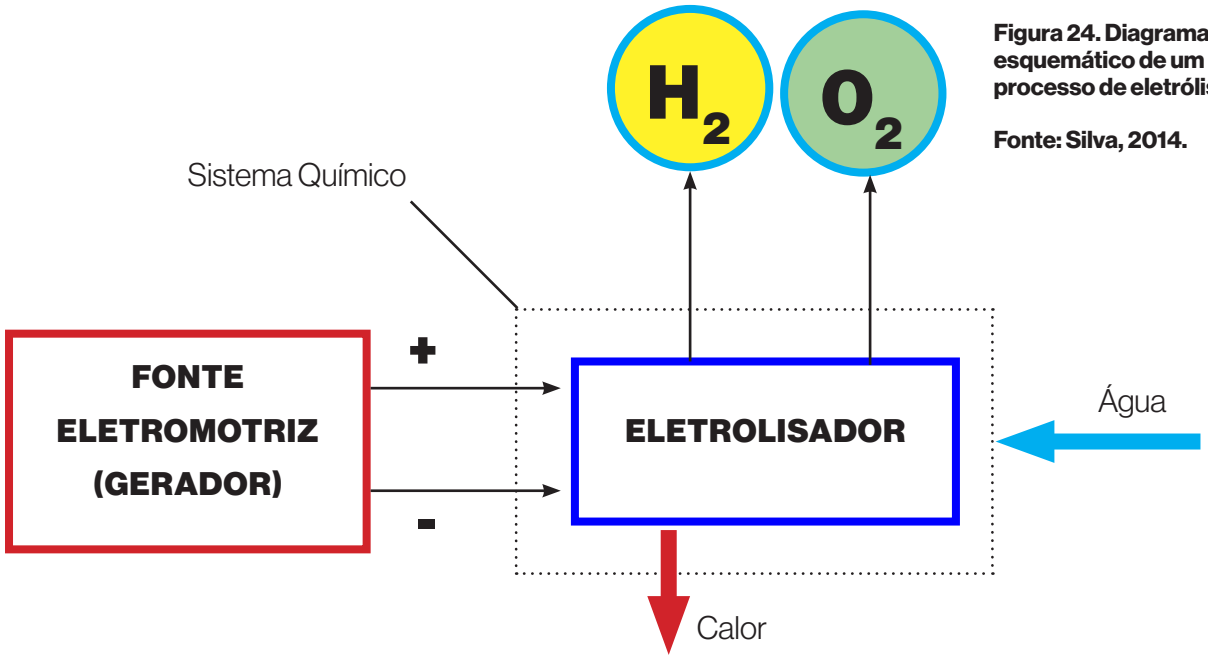


Figura 24. Diagrama esquemático de um processo de eletrólise

Fonte: Silva, 2014.

ii) Produção do hidrogênio utilizando água e energia elétrica

Uma das formas mais antigas de obtenção do hidrogênio ocorre através da eletrólise da água. Essa forma acontece pela da decomposição da água (H_2O) utilizando energia elétrica em corrente contínua. O gás H_2 resultante dessa decomposição pode ser usado em uma célula a combustível, que é a base de um veículo elétrico com esse tipo de propulsão. Na figura 24, pode-se observar um diagrama esquemático de um processo de eletrolise da água.

iii) Disponibilidade na natureza e obtenção

Como mencionado anteriormente, o hidrogênio em nosso planeta não é encontrado na sua forma "pura". Há algumas formações geológicas ou mesmo poços em que supostamente pode-se encontrar o hidrogênio sem ligação com outros elementos químicos, mas não há nenhuma comprovação científica sobre essa formação, bem como qual seria o custo de exploração.

iv) Produção do hidrogênio a partir da biomassa (etanol, bio-óleos, biogás).

O Brasil, como já mencionado anteriormente, tem uma vocação para a bioenergia, sendo o maior produtor de cana-de-açúcar e um dos maiores produtores de etanol, biogás e bio-óleos do mundo. Dessa forma, além do hidrogênio verde a partir de fontes renováveis como eólica e solar, nosso país também tem uma vocação para a produção de hidrogênio a partir dos produtos e subprodutos do agronegócio poucos intensivos em carbono.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Nota importante

A eletrificação dos veículos e dos transportes é uma tendência sem volta. Essa tendência acontece em países que precisam fazer a transição energética da mobilidade em função das características específicas de sua matriz energética, ou seja, com fontes não renováveis de energia. Já o Brasil tem a potencialidade energética de fontes como etanol, biogás e outros biocombustíveis que podem ser usados como combustível ou como vetor de energia para o hidrogênio. Dessa forma, o País tem como gerar energia elétrica a partir de biocombustíveis.

Basicamente, obtém-se hidrogênio a partir da reforma de um bioenergético. O processo de reforma é definido como uma conversão autotérmica, catalítica ou não catalítica de um combustível líquido, sólido ou gasoso em uma mistura rica em hidrogênio denominado gás de síntese (Lopes, 2009).

Há três principais métodos mais comuns de reforma e que foram descritos por Lopes (2009):

i) Reforma-vapor: o combustível pré-condicionado é injetado com vapor superaquecido em um leito de reação. Salienta-se que o precondicionamento do combustível é determinado pelo seu aquecimento, e no caso dos combustíveis aditivados por odorificantes, em geral à base de compostos de enxofre, sua pré-purificação. É uma reação endotérmica lenta, cujo calor necessário provém em geral da queima de parte do próprio combustível utilizado no processo de reforma em leito distinto, colocado em contato térmico. Resulta geralmente em sistemas com maior volume devido às trocas térmicas necessárias e que são aplicados para hidrocarbonetos leves e de peso molecular intermediário;

ii) Oxidação parcial (*POX, Partial Oxidation*): compreende uma oxidação parcial, ou incompleta, do combustível. Uma quantidade subestequiométrica de oxidante, ar ou oxigênio é utilizada. Essa reação de oxidação é exotérmica e conduz os insumos e o leito de processo a altas temperaturas, responsáveis pela reforma e decomposição térmica da fração não oxidada do combustível. Para algumas aplicações, pode-se utilizar catalisadores. Processos não catalíticos para reforma de gasolina, por exemplo, necessitam de temperaturas de aproximadamente 1.300 K (1.027°C). Esse tipo de reação possui vantagens, como o uso de um reformador mais compacto e leve;

iii) Reforma autotérmica (*ATR, Autothermal Reforming*): é a combinação dos processos anteriores em um único leito. A reforma-vapor absorve parte do calor e a água gerada pela reação de oxidação parcial, resultando em um processo levemente exotérmico, cuja característica está apenas atrelada à compensação das perdas térmicas de um sistema real, sendo essa utilizada para os bioenergéticos.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

PRINCIPAIS PROCESSOS DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

PROCESSO	TIPO	SISTEMA	INSUMO BÁSICO	FONTE DE ENERGIA	APLICAÇÃO
Eletrólise	Alcalina	Monopolar ou bipolar	Água	Eletricidade	Insumo químico (indústria, petroquímica), Insumo energético (foguetes, célula a combustível)
	Ácida	Monopolar ou bipolar	Água	Eletricidade	
	Fotoeletroquímica	Monopolar	Água	Luz em um comprimento de onda apropriado do espectro de radiação solar	
Termoquímica	Processamento químico	Reforma-vapor	Hidrocarbonetos leves, álcoois, amônia + água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos, em geral, o próprio insumo combustível	
		Oxidação parcial	Hidrocarbonetos leves, intermediários e pesados, carvão + água (opcional, dependendo do combustível e produto buscado) + oxidante	Calor gerado pela queima parcial do insumo combustível do processo	
		Reforma autotérmica	Hidrocarbonetos leves (metano, nafta), intermediários, álcoois + água + oxidante	Calor gerado pela queima parcial do insumo combustível do processo	
	Decomposição térmica	Catalítica ou não catalítica	Água, amônia	Calor gerado por usinas nucleares, aproveitamento da energia solar	

Tabela 2. Principais processos de geração de hidrogênio

Fonte: Lopes, 2009.

O Brasil tem a possibilidade de escolher qual tecnologia utilizar em cada região agricultável do país.

A utilização, por exemplo, do etanol como fonte de H_2 para eletromobilidade tem sido pesquisada no Brasil. Pode-se utilizar um reformador de etanol estacionário suprindo a demanda de H_2 em rincões do Brasil. Ou um pré-reformador junto a uma célula a combustível de óxido sólido (*SOFC, Solid Oxide Fuel Cell*) embarcado em veículos elétricos.

De toda sorte, com o programa Renovabio, o hidrogênio da biomassa pode ajudar, inclusive, o setor agrícola e o de distribuição de combustíveis a atingirem suas metas.

Notas importantes

I. Há uma oportunidade de criação de emprego e renda para o novo setor de energia renovável em que o Brasil tem *expertise*, o de bioenergia. Em média, cada MW instalado pode gerar cerca de 15 empregos diretos;

II. Os países europeus e os EUA veem o Brasil como berço mundial da produção do hidrogênio mais renovável, e isso é uma oportunidade latente da qual o país pode se empoderar, inclusive trazendo empresas estrangeiras para trocar sua forma de produção com hidrogênio cinza ou mesmo preto e agregar valor com o nosso hidrogênio verde ou a partir da biomassa que é, em última instancia, renovável, já que há captura de carbono com o processo fotossintético.

V) Produção e distribuição do H_2 no Brasil

Como mencionado anteriormente, há várias formas de obtenção de H_2 como, por exemplo, utilizando energias renováveis (solar, eólica, biomassa) e de fontes fósseis (petróleo, gás natural e carvão). Na figura 25 é possível observar as possíveis rotas de produção do hidrogênio.

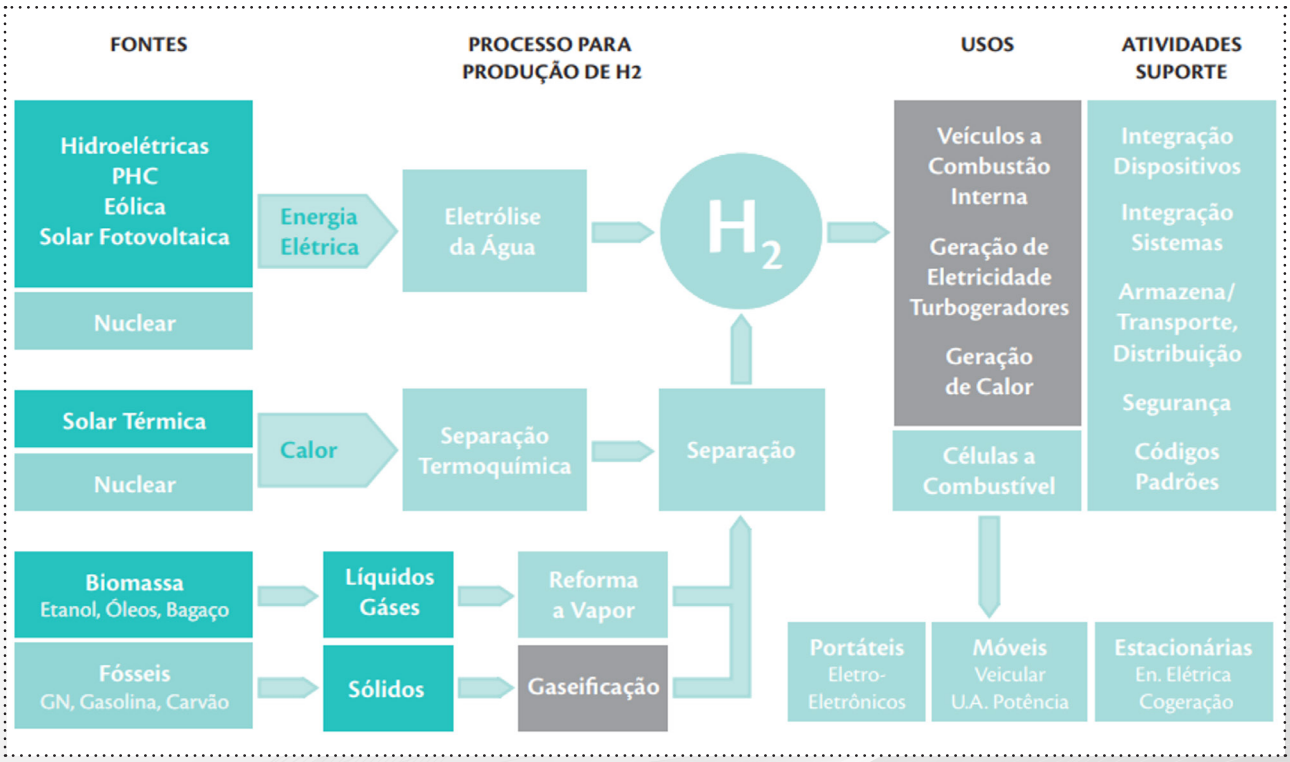


Figura 25. Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético

Fonte: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

A rota mais utilizada é a reforma do gás natural, que corresponde praticamente a 80% do hidrogênio produzido atualmente. Os outros 20% são produzidos pela eletrolise da água a partir da energia da rede de distribuição. Essa rota tem menor utilização porque o insumo energia é mais caro. E é exatamente esse *input* que deve ser levado em consideração nas novas formas de geração de energias para produção do H_2 verde: diminuição dos preços do MWh.

Do ponto de vista das aplicações industriais do hidrogênio, há uma oportunidade enorme de transição sustentável em praticamente todas as áreas, substituindo o hidrogênio a partir de fontes não renováveis para um hidrogênio de fontes renováveis. Na figura 26, observam-se essas várias aplicações.

Figura 26. Aplicações do hidrogênio nos principais setores industriais

Fonte: Silva, 2014.

2. FONTES DE ENERGIA E A RENOVABILIDADE

Notas importantes

I. A produção do hidrogênio no Brasil é praticamente centralizada na Petrobras (95%), seja em refino ou para aplicações em fertilizantes nitrogenados. Segundo a GIZ (2021), a produção média anual de H_2 no Brasil é de 6.251.530.000 (Nm^3/ano);

II. A maior parte dessa produção média é para hidrotratamentos de derivados do petróleo que utilizam hidrogênio (cinza) a partir da reforma do gás natural;

III. No que se refere à produção de fertilizantes nitrogenados, por exemplo, há uma demanda mundial por adubos devido à guerra entre Rússia e Ucrânia que tem afetado o preço internacional do petróleo. Dessa forma, a produção de H_2 verde pode agregar valor à amônia brasileira. Inclusive a recomendação é de que o transporte de hidrogênio entre o Brasil e os países europeus seja realizado em forma de amônia, por questões técnicas que não são objeto deste relatório;

IV. De acordo com a figura 27 acima, o H_2 é utilizado em enormes variedades de processos de quase todos os setores produtivos, fazendo com que haja uma oportunidade latente da troca de hidrogênio cinza (já amplamente utilizado e emissor de GEE) por um hidrogênio mais limpo como o verde, trazendo vantagens ambientais e de oportunidades de emprego e renda no Brasil;

V. O transporte de hidrogênio é o gargalo para sua exportação por conta de sua baixa densidade e o gasto energético associado a altas pressões. Dessa forma, em vez de o Brasil pensar em exportar o hidrogênio verde, deve-se incentivar as empresas multinacionais para que prefiram se estabelecer no país, fazendo com que esse hidrogênio verde seja um diferencial produtivo e ambiental, gerando empregos e renda, assim como divisas e aumento de arrecadação de impostos. Dessa forma, o gargalo do transporte é excluído da questão da produção do hidrogênio, incentivando uma nova cadeia de valores ao uso de um hidrogênio de baixo carbono;

VI. Outra questão relevante quando se fala da produção do hidrogênio verde é exatamente o custo da energia, como mencionado anteriormente neste relatório. A eletrólise é a principal forma de conversão da água em dois gases: o hidrogênio e o oxigênio. Isso faz com que o maior custo desse hidrogênio seja o valor da energia elétrica utilizada. Então, é preciso encontrar soluções para a diminuição do custo de produção da energia eólica e solar, tornando esse hidrogênio em um produto competitivo com relação ao uso do gás natural e outras formas mais baratas de produção do H_2. Vale a pena salientar que, apesar do custo menor, essa produção atual do hidrogênio cinza não leva em consideração os altos custos associados aos impactos ambientais. E, por isso, torna-se mais barato em comparação com o hidrogênio verde;

VII. Outra vantagem comparativa do Brasil em relação a outros países do mundo é que há várias formas de produção de hidrogênio limpo no país, seja da biomassa, seja da energia eólica ou solar. Cada região ou microrregião pode fornecer fonte primária e secundária de energia para produção de hidrogênio, descentralizando e barateando sua produção. Cada potencialidade regional tem poder de criar emprego, renda e de formar mão de obra especializada;

VIII. Emprego para cada tipo de geração de energia renovável em média: eólica, 15 empregos diretos por MW instalado; eólica *offshore*, 30 empregos diretos por MW instalado; solar fotovoltaico, 32 empregos direitos por MW instalado;

IX. Empregos para eletrizadores são na ordem de 150 empregos diretos para cada 100 MW instalados. Vale a pena comentar que este valor não é modular e não foram obtidos valores por MW instalado.

3. PROPULSÃO VEICULAR

A. O PROCONVE E AS EMISSÕES LOCAIS

É importante compreender a diferença entre as consequências geradas pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e aquelas geradas pelos óxidos de nitrogênio (NOx), pelo monóxido de carbono (CO) e pelo material particulado que é expelido pelo escapamento dos veículos automotores, mesmo que de maneira simples. O CO_2 é um composto químico presente nos gases atmosféricos e não é considerado tóxico. A necessidade de descarbonização das fontes energéticas para a mobilidade se dá em função do aumento da proporção desse gás na atmosfera, como consequência do intenso aumento das emissões pela atividade humana a partir do período industrial. O CO_2 tem características mais intensas de refração dos raios solares, daí seu impacto para o aumento da temperatura média global da atmosfera, à medida que aumentamos sua proporção entre os GEE.

O óxido de nitrogênio (NOx) agrupa o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2), ambos gerados durante a combustão. Eles são poluentes e podem causar problemas respiratórios e outras doenças. Os veículos automotores têm uma participação relevante na emissão de NOx. O monóxido de carbono (CO) também é gerado pelos motores pela combustão incompleta de combustíveis utilizados nos veículos. Ele é tóxico, como os óxidos de nitrogênio e os hidrocarbonetos.

As estratégias de solução para minimizar as emissões de NOx e de CO em nível automotivo são diferentes daquelas que minimizam as emissões de CO_2. O uso de catalisadores é empregado para reter o NOx. No caso dos veículos comerciais, um exemplo de estratégia é a Redução Catalítica Seletiva (SCR). Uma solução aquosa com concentração de 32,5%, em massa, de ureia técnica de alta pureza em água desmineralizada é usada como Agente Redutor Líquido Automotivo (Arla 32). A NBR ISO 22.241 normaliza sua composição. Essa estratégia é usada para estabilizar o NOx, evitando sua emissão pelo escapamento dos veículos com motores de ciclo Diesel.

A queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna de veículos, termoelétricas e indústrias e as poeiras de construção e de áreas onde a vegetação natural foi removida são as maiores fontes antropogênicas de materiais particulados (MP). Os MP são partículas muito finas de sólidos ou líquidos suspensos no ar, cujas dimensões variam desde 20 µm até menos de 0,05 µm de diâmetro.

O Brasil trilha há muito tempo a rota de minimização das emissões de NOx, CO e MP. Essa rota é definida pelo Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve).

3. PROPULSÃO VEICULAR

Conforme explica o *site* do Ibama na internet, o Proconve foi instituído a partir da Resolução Conama n. 18, de 6 de maio de 1986, com o objetivo de reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores para atender aos padrões de qualidade do ar, especialmente nos centros urbanos, promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos disponíveis para a frota nacional de veículos automotores, visando a redução de poluentes emitidos na atmosfera, entre outros.

As fases do Proconve para veículos leves utilizam a letra "L" para definir sua evolução numérica. As fases para veículos pesados (ou comerciais)usam a letra "P".

As exigências do Proconve têm evoluído ao longo dos anos, porém é importante conhecer a diferença entre as emissões globais que estão ligadas à emissão de CO_2 das emissões locais que são consequência da quantidade de material particulado (MP) e de óxidos de nitrogênio (NOx). Por muitos anos as regulações internacionais só tratavam destas últimas. A efetiva conscientização e tomada de ação com relação à necessidade de descarbonização dos transportes em face das mudanças climáticas é relativamente recente.

Se observarmos um período de dez anos no Brasil, vamos ver que o programa Inovar Auto contribui significativamente para a evolução da eficiência energética veicular. Os veículos atuais são em média 22% mais eficientes que os modelos daquela época. A melhoria exigida por lei foi em média de 50%, variando para mais ou para menos, dependendo do gás. Aqui há uma simplificação do tema, pois a análise das emissões locais não envolve apenas o controle de um único gás.

Se fizermos uma análise de ganhos desde o início dos limites do Proconve, ou seja, há mais 30 anos neste ano, associado ao impacto do crescimento de frota circulante – a frota de veículos leves cresceu de 10 milhões para 60 milhões –, os ganhos de redução de emissões foram em média de 95%, ou seja, uma queda de 20 vezes.

Nota importante

Um programa de renovação de frota é fundamental para intensificar o potencial de melhoria, uma vez que a idade média da frota circulante no Brasil é muito alta, não permitindo as vantagens das legislações Proconve mais recentes.

A imagem abaixo mostra a evolução da legislação para veículos de passeio de forma esquemática.

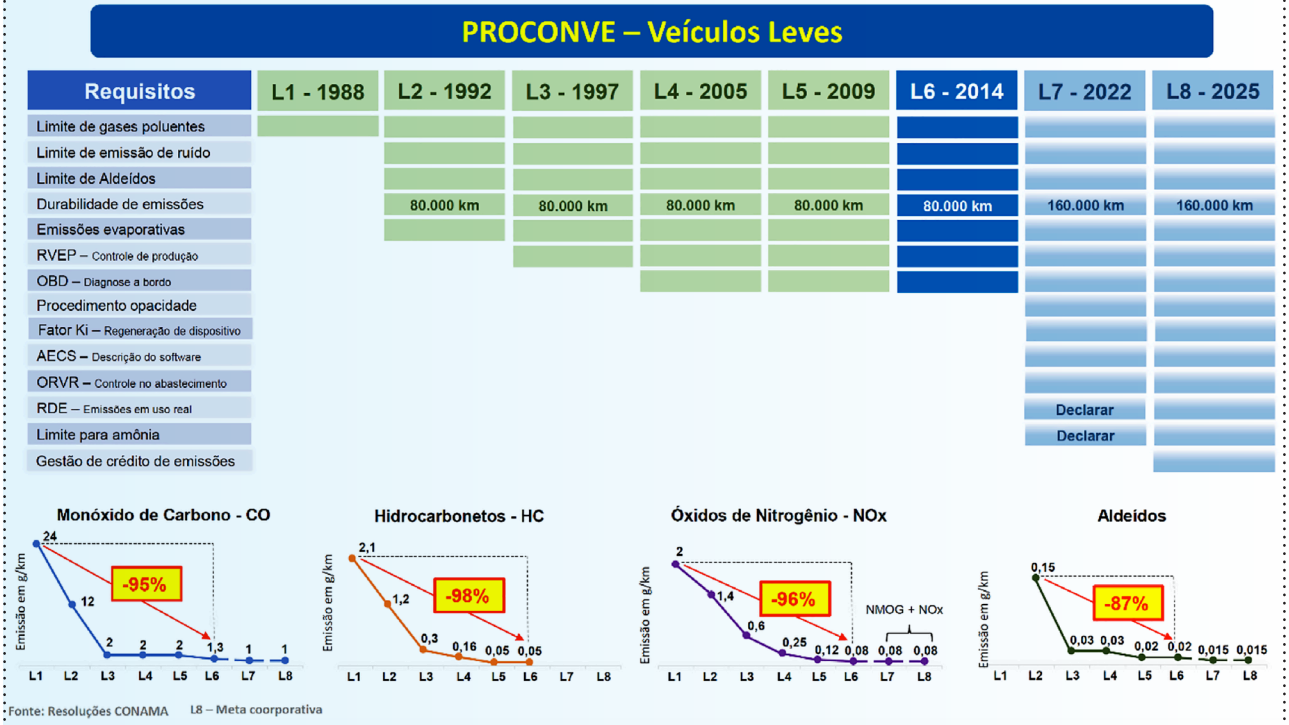


Figura 27. Evolução da legislação de emissões para veículos leves

Como se pode ver pelo gráfico da figura 28 abaixo, está definida uma redução de 96% das emissões de CO e de NOx para veículos leves, entre 1998 e 2025, quando a fase L8 do Proconve entrar em vigor.

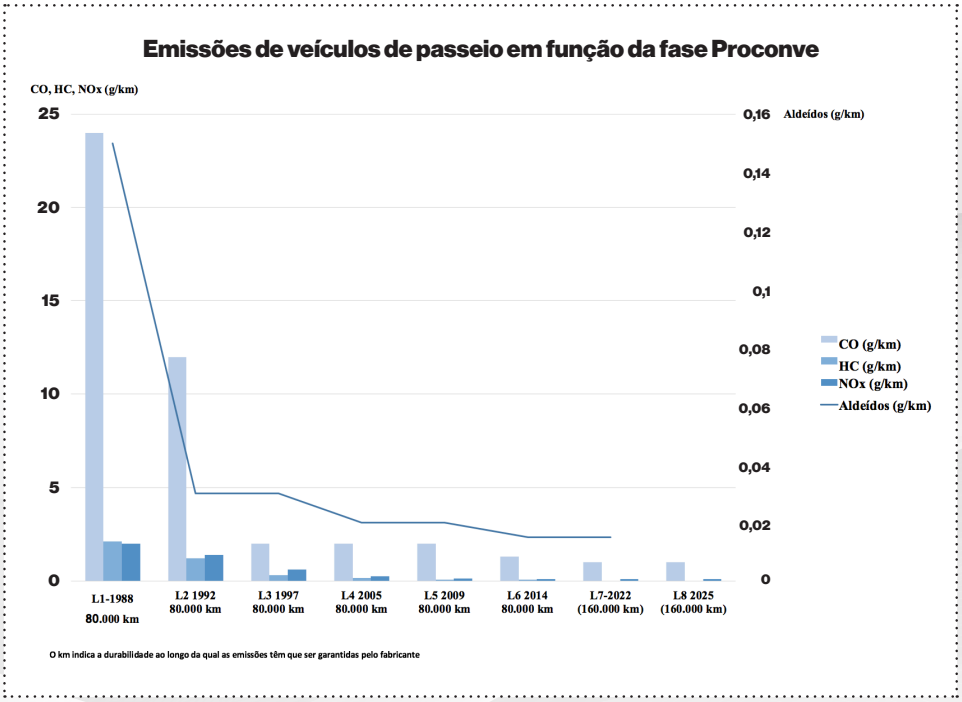


Figura 28. Emissões de veículos de passeio de acordo com a fase do Proconve

3. PROPULSÃO VEICULAR

À medida que as diferentes fases do Proconve evoluíram ao longo dos anos, a diminuição de emissões de NOx, CO e MP também foi significativa para as emissões de gases em nível local dos veículos comerciais.

A imagem abaixo mostra a evolução da legislação para veículos pesados de forma esquemática.

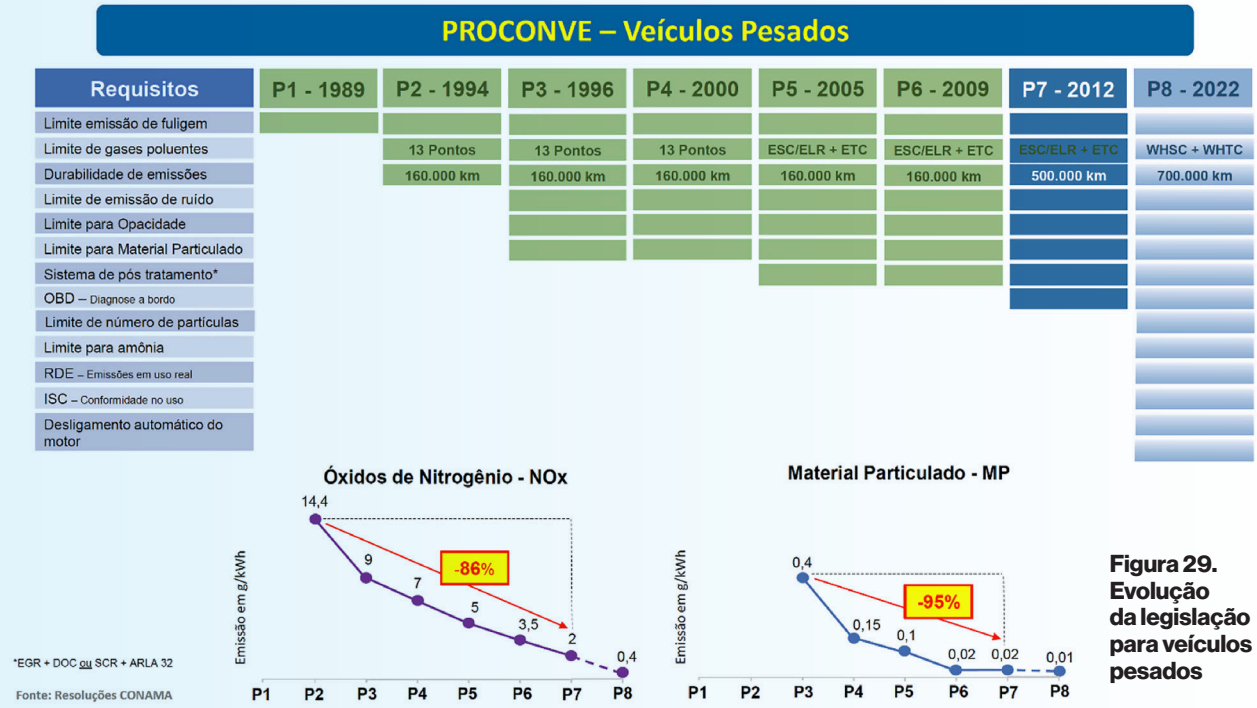


Figura 29. Evolução da legislação para veículos pesados

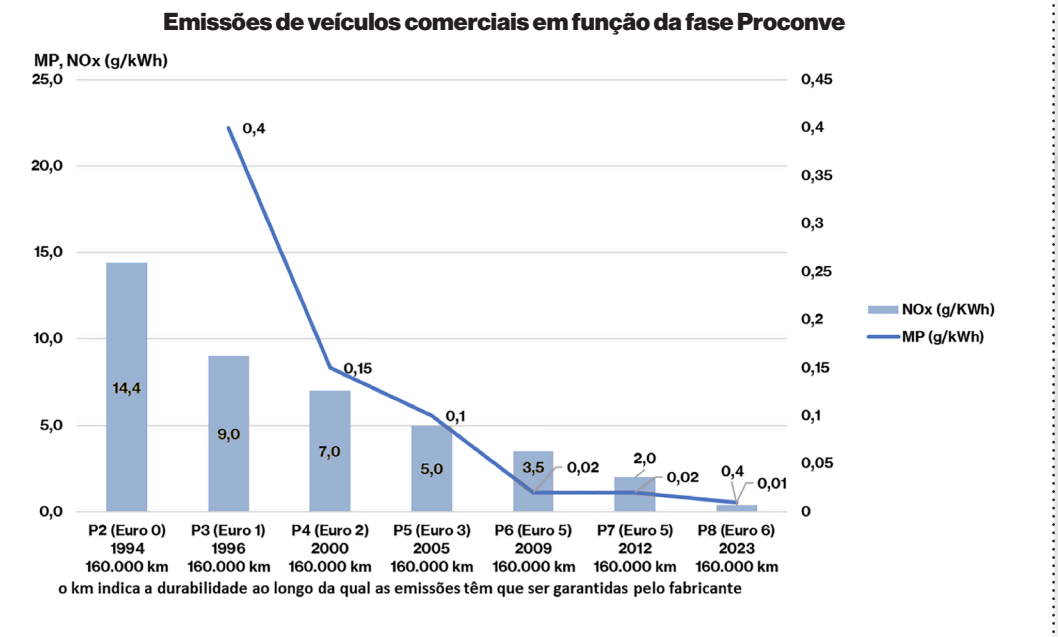


Figura 30. Emissões de veículos comerciais em função da fase do Proconve

Como se pode ver pelo gráfico da figura 29 na página anterior, está definida uma redução de 98% das emissões de material particulado entre as fases P8 e P3, e 97% das emissões de NOx para veículos pesados entre as fases P8 e P2 quando a fase P8 do Proconve entrar em vigor.

Melhorar as emissões de NOx, CO ou MP não se mostra eficiente para conter as mudanças climáticas que são consequência do aumento da emissão de CO_2, daí a necessidade de estratégias de descarbonização dos insumos energéticos para a mobilidade.

B. AS DIFERENTES FORMAS DE PROPULSÃO PARA VEÍCULOS DE PASSEIO

i) Motor de ciclo Otto

Criado por Nicolaus Otto em 1876, este motor tornou-se conhecido pelo seu típico uso em veículos movidos à combustão comprimida da gasolina. A energia que o motor usa para gerar movimento é proveniente da compressão e queima controlada da mistura de ar e combustível a partir da ignição de uma faísca elétrica.

Esse tipo de motorização foi alvo de muitos investimentos e avanços tecnológicos ao longo de décadas. Melhorias mecânicas e eletrônicas, redução de peso, utilização de novos materiais, entre vários outros itens, permitiram esses avanços. A injeção eletrônica, o comando duplo de válvulas, o cabeçote com 16 válvulas e o uso do turbo são exemplos dessa evolução.

Não se pode dizer que os aprimoramentos tenham chegado ao final, porém é senso comum que novos investimentos em pesquisa e desenvolvimento desse tipo de motor não vão resultar na diminuição significativa das emissões de GEE. Daí a indústria começou a dirigir sua atenção para a eletrificação da propulsão dos veículos de passeio.

ii) Propulsão a gás natural

A disponibilidade doméstica nos grandes centros, rede de distribuição estabelecida, o custo relativamente baixo e a taxa de emissões de gases mais baixa fazem do motor movido a gás natural veicular (GNV) uma alternativa para a propulsão veicular. As caraterísticas desse tipo de motor seguem as da combustão do tipo Otto. Porém, devido à falta de estabilidade nos preços, interferindo na demanda, essa solução não tem grande participação no mercado de veículos originais produzidos pela indústria nacional. A quase totalidade da frota em operação no Brasil é resultado da conversão de veículos feita em oficinas pelo mercado de pós-venda. Esse tipo de motorização não será tratado neste relatório.

iii) Tipos de eletrificação

No contexto do 19º Simpósio SAE BRASIL de Powertrain, organizado pela Seção São Paulo Interior, a entidade publicou o relatório "Combustíveis renováveis e estratégias de propulsão aplicados na descarbonização da mobilidade". Nesse relatório, o capítulo que fala sobre as estratégias de propulsão é importante fonte para compreender os diferentes tipos de propulsão veicular.

A eletrificação da frota pode ser representada pelas tecnologias mostradas na figura 31

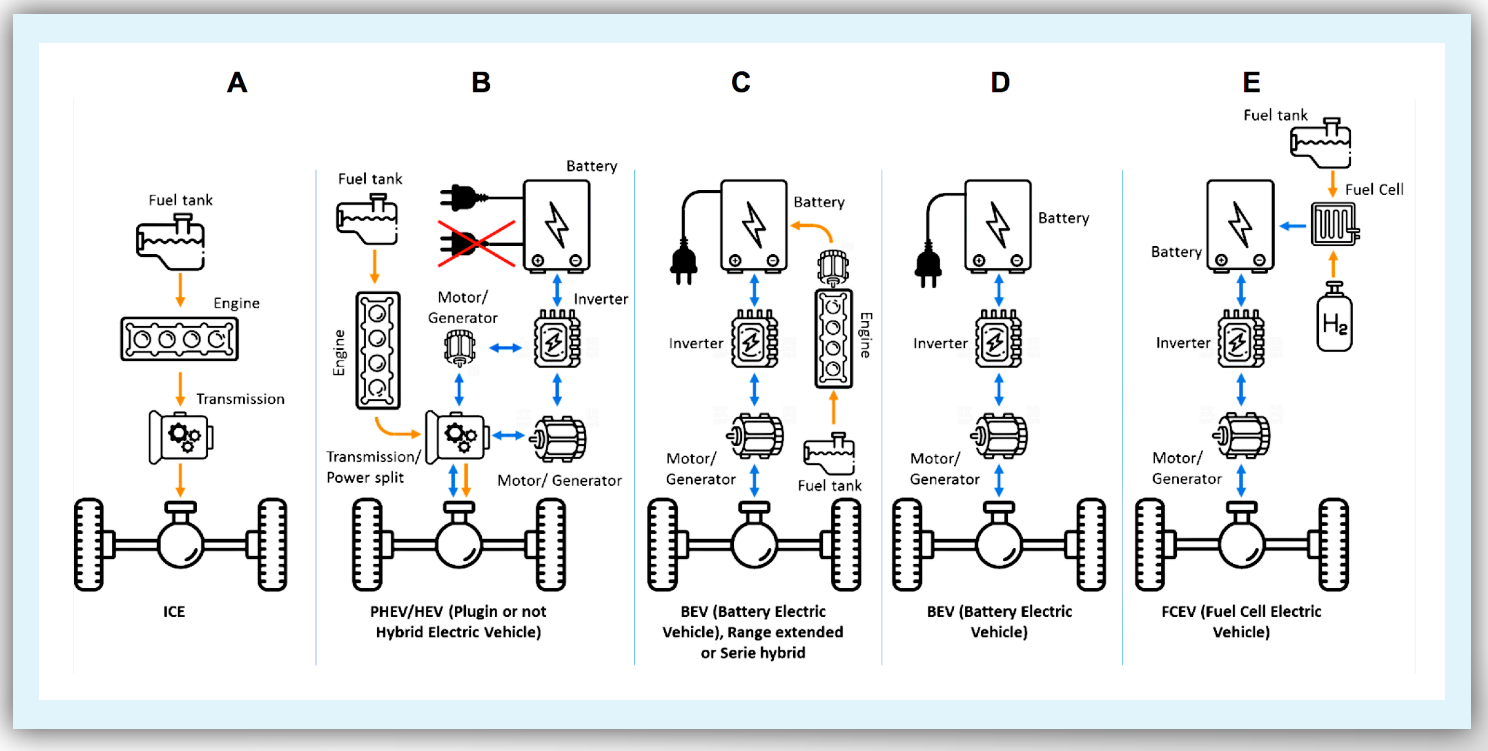


Figura 31. Tecnologias de eletrificação

No esquema A está descrita a propulsão por motor a combustão, sendo esta a única forma de energia para a mobilidade. A eletrificação de subsistemas não ligados à tração do veículo, como ar-condicionado, bombas de água e óleo, entre outros, contribui para a redução de emissões de CO_2 de forma marginal, à medida que aumenta a eficiência energética. Além desses benefícios, há o emprego em componentes de alta tecnologia eletrônica, como o *start-stop*, no qual o motor de arranque elétrico dessa configuração ganha um papel maior, pois o motor desliga quando o veículo para e religa automaticamente quando o pedal de freio deixa de ser acionado. Sistemas de gerenciamento da alimentação multicombustível (*flex fuel*), gerenciamento do consumo de baterias e sistemas de ignição com sensores de detonação e tempo de injeção com aprendizados, com elementos iniciais de inteligência artificial, também contribuem para o aumento da eficiência do veículo.

3. PROPULSÃO VEICULAR

No esquema B a propulsão já combina motores elétricos atuando na tração do veículo juntamente ou em separado com os motores a combustão interna. Nessa configuração, a propulsão do veículo pode ocorrer exclusivamente pelo motor de combustão interna, motor/gerador elétrico ou pela combinação dos dois. Existem também arranjos nos quais divisores de potência são instalados no câmbio do veículo, permitindo que o motor de combustão interna carregue a bateria do sistema de propulsão elétrica, através de um segundo motor/gerador. No Brasil, veículos híbridos elétricos com motor de combustão interna *flex fuel* já são oferecidos comercialmente como um caminho ao uso de combustíveis renováveis aliados à eletrificação veicular. Os veículos híbridos podem possuir conexão para recarga externa ou não da bateria, a depender da sua capacidade de armazenamento de energia. Existem também os sistemas de baixa tensão, sendo o sistema de 48V o mais utilizado, no qual sua capacidade de potência é reduzida, porém ainda sim ajudando na eficiência energética do veículo.

O esquema C mostra a propulsão elétrica com alcance estendido. Esta configuração consiste em um motor de combustão interna ligado a um gerador, responsável por fornecer energia elétrica para a bateria, e estes fornecem energia aos motores/geradores elétricos que fazem a propulsão do veículo.

A configuração representada pelo esquema D mostra a propulsão elétrica exclusiva (*BEV, Battery Electric Vehicle*), em que a propulsão do veículo é realizada exclusivamente pelo motor/gerador elétrico, alimentada apenas por baterias. Nessa arquitetura há variações de forma que um ou mais motores elétricos podem fazer a propulsão do veículo. Em um futuro próximo, as baterias poderão ser alimentadas também por um gerador de eletricidade a célula de combustível, conforme esquema E, empregando fonte energética renovável, permitindo baterias menores e reduzindo o tempo de recarga. O uso do hidrogênio pode combinar as rotas de eletrificação com os biocombustíveis porque pode ser produzido no próprio veículo, proveniente de biocombustíveis.

Conforme o relatório Global Outlook 2022, publicado pela Agência Internacional de Energia, após uma década de rápido crescimento, em 2021 o estoque global de carros cuja propulsão usa energia elétrica atingiu a marca de 16,5 milhões. Uma quantidade ainda pequena se comparada ao tamanho total da frota de veículos do mundo, com cerca de 1,4 bilhão de unidades, ou seja, pouco mais que 1%. Figura 32

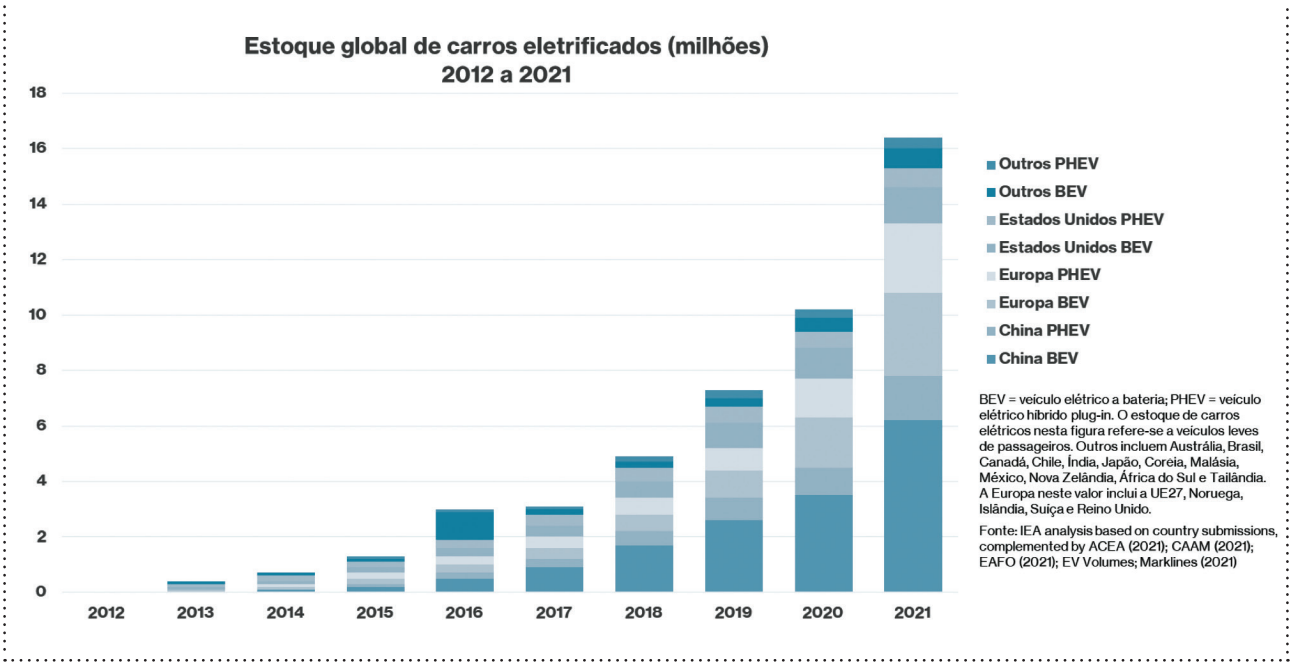


Figura 32. Estoque global de veículos eletrificados

Conforme dados do Inmetro, estão cadastradas no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE) 33 marcas e 671 modelos/versões. Estes modelos estão subdivididos nas categorias elétricos, *plug-in,* híbridos, *flex fuel*, gasolina e diesel. No gráfico da figura 33 é possível ver a quantidade de modelos e sua participação percentual por categoria (independentemente da quantidade licenciada).

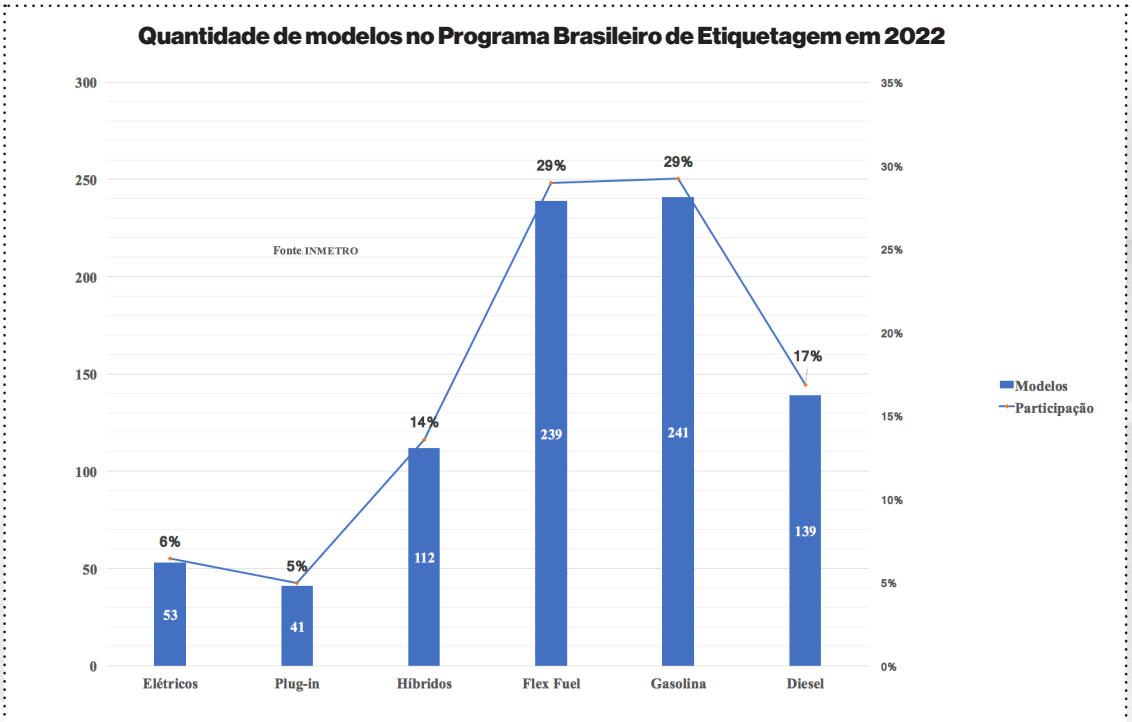
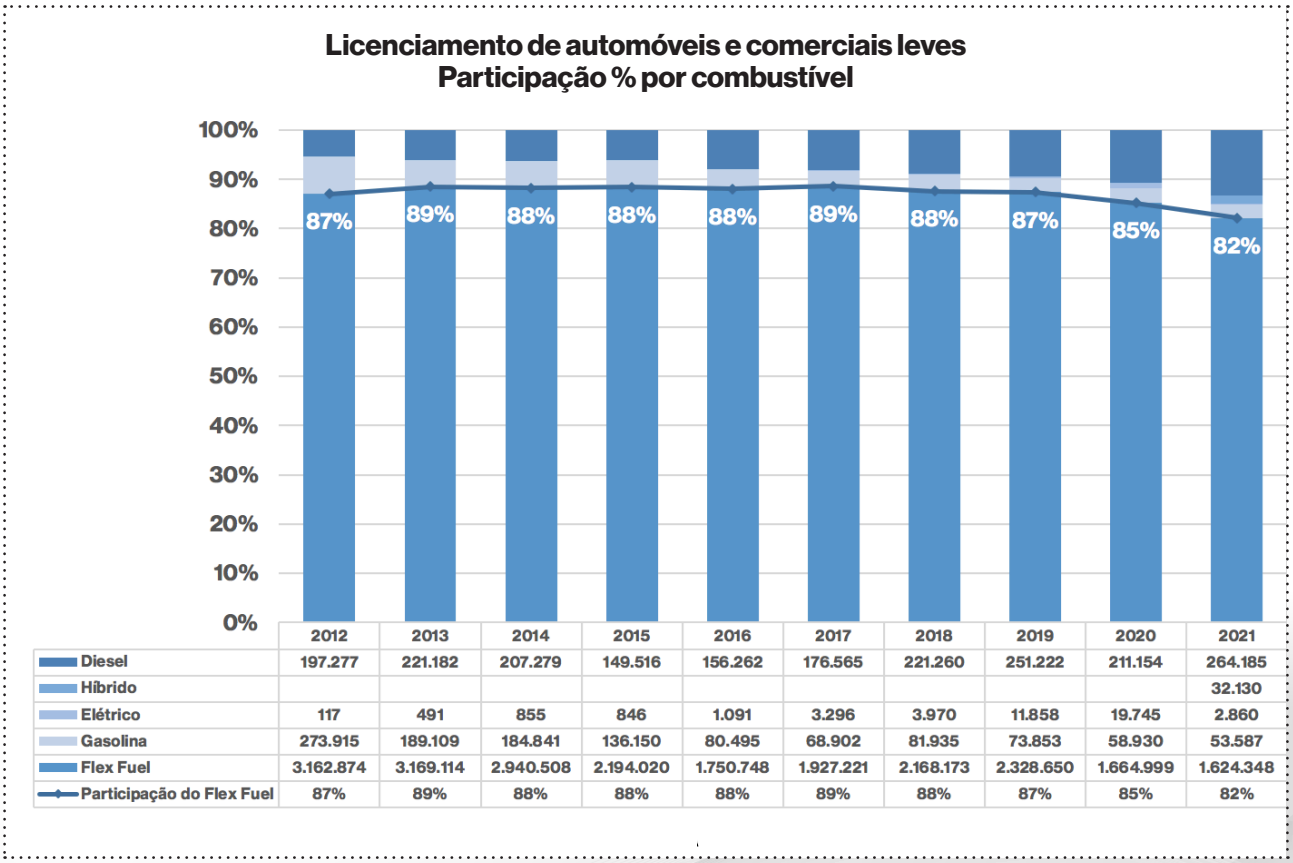


Figura 33. Quantidades de modelos no PBE

3. PROPULSÃO VEICULAR

O mercado brasileiro também vem eletrificando seus modelos de veículos de passageiros, porém a análise dos dados publicados pela Anfavea mostra a clara predominância do licenciamento de veículos *flex fuel* nos últimos dez anos. A partir de 2019, os veículos elétricos começam a ter relevância no número de licenciamentos, e em 2021 surgem os veículos híbridos *flex fuel*, os quais já começam com números significativos. De qualquer forma, os veículos *flex fuel* continuam representando aproximadamente 82% dos licenciamentos, fato que merece atenção quanto à efetividade de uma descarbonização em um curto prazo, em contrapartida a uma estratégia de mais longo prazo que irá depender da diminuição do preço do veículo eletrificado ao consumidor.



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Diesel	197.277	221.182	207.279	149.516	156.262	176.565	221.260	251.222	211.154	264.185
Híbrido										32.130
Elétrico	117	491	855	846	1.091	3.296	3.970	11.858	19.745	2.860
Gasolina	273.915	189.109	184.841	136.150	80.495	68.902	81.935	73.853	58.930	53.587
Flex Fuel	3.162.874	3.169.114	2.940.508	2.194.020	1.750.748	1.927.221	2.168.173	2.328.650	1.664.999	1.624.348
Participação do Flex Fuel	87%	89%	88%	88%	88%	89%	88%	87%	85%	82%

Figura 34. Licenciamento de automóveis e comerciais leves por tipo de combustível

Fonte: Anfavea

3. PROPULSÃO VEICULAR

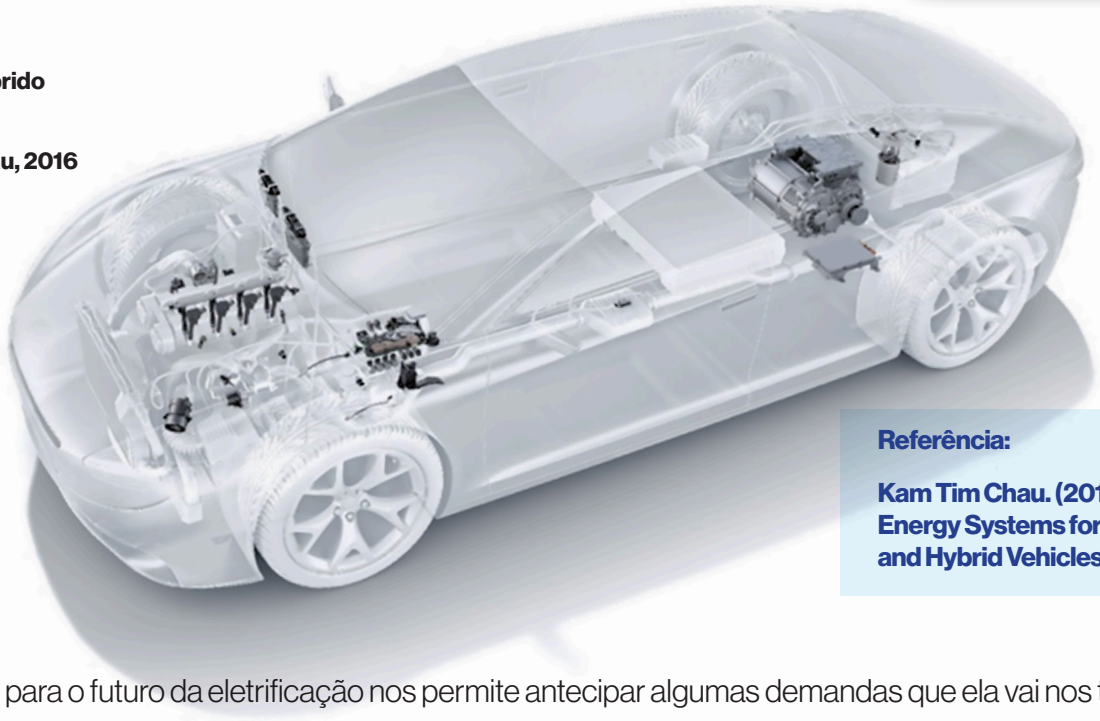


Figura 35.
Veículo híbrido paralelo

Fonte: Chau, 2016

Referência:

Kam Tim Chau. (2016). Energy Systems for Electric and Hybrid Vehicles.s.

Um olhar para o futuro da eletrificação nos permite antecipar algumas demandas que ela vai nos trazer já nesta década com a introdução de novas tecnologias, o que pressupõe novos materiais e seus minérios em escalas crescentes. Esta perspectiva de tornar a eletrificação e as novas fontes de energia limpa, uma revitalização para as cadeias produtivas nacionais, pressupõem uma reorganização das organizações do país na criação de mecanismos para viabilizar as cadeias produtivas descarbonizadas, considerando a análise de ciclo de vida otimizada a nível global.

Entre os itens mais importantes com relação ao aumento das demandas são:

1. As baterias de Lítio e seus diversos minerais,
2. Motores elétricos compactos e de alta eficiência,
3. Eletrônica de controle de potência com toda a evolução digital,
4. Sistemas de carregamento rápido promovendo energias limpas.
5 Melhoras no manejo da produção de Bio energia,
6. Revitalização das siderurgias nacionais para uso de tecnologias limpas e mais eficientes.

Entre uma série de evoluções que são demandadas para a reindustrialização nos padrões ESG.Temos grandes empresas no Brasil trabalhando em desenvolvimento de soluções para estes quatro novos segmentos, sendo que todos estão espalhados pelo Brasil, como WEG, CBMM, Marcopolo, Moura, Tupy, além de praticamente todas as multinacionais em colaboração com suas matrizes.

Mencionando alguns exemplos: a CBMM está desenvolvendo soluções para baterias de lítio à base de grafeno e nióbio extraídos no Brasil, trazendo evoluções importantes para o mundo da eletrificação.

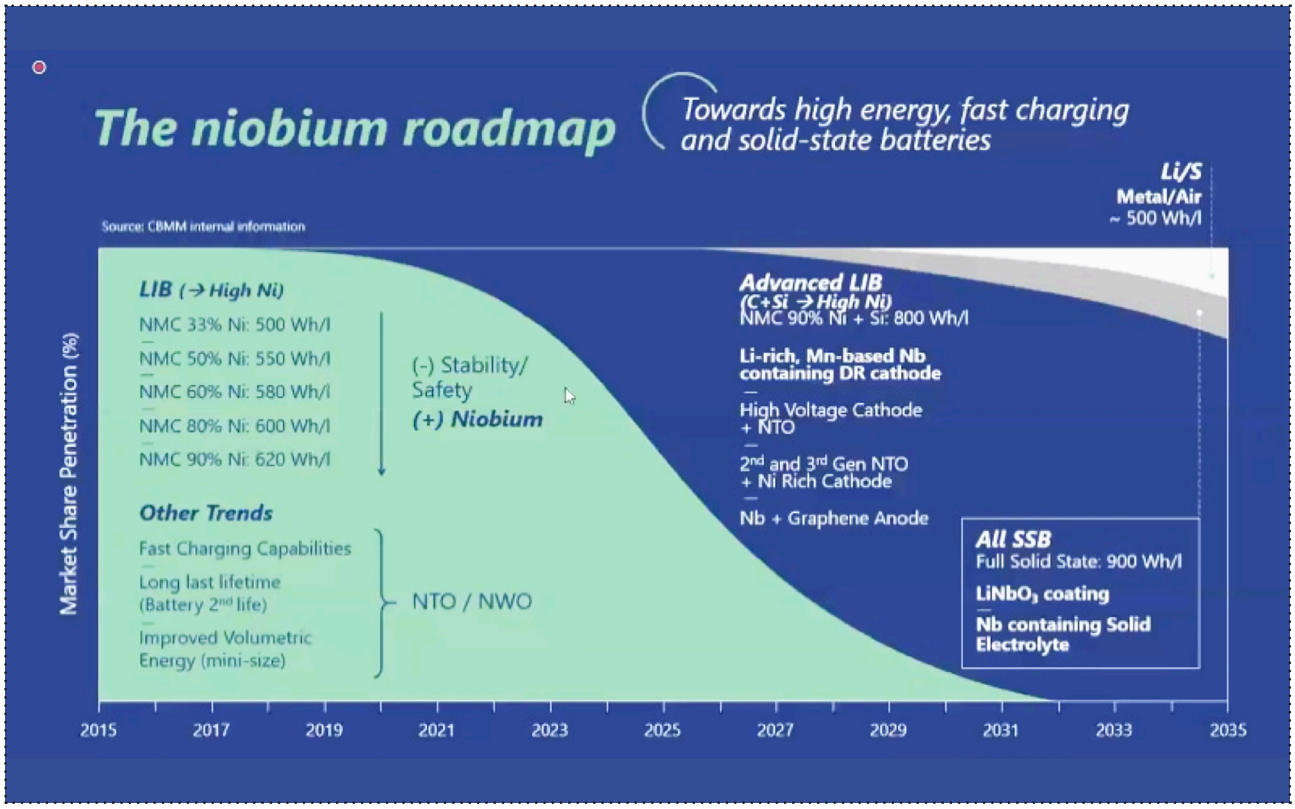
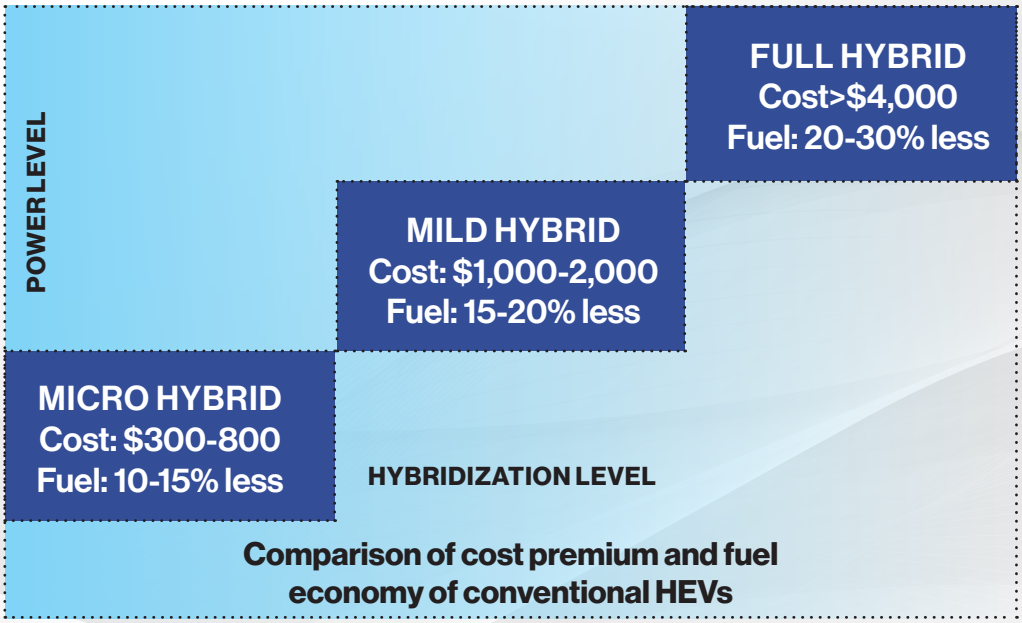


Figura 36. O roteiro do nióbio

O desenvolvimento de soluções de eletrificação habilita o Brasil a adotar tecnologias novas com base no hidrogênio, as quais, mesmo usando biomassa ou H_2 verde, acabam por transformá-lo em eletricidade e usando-o em baterias menores.



Referência:
Kam Tim Chau. (2016). Energy Systems for Electric and Hybrid Vehicles.s.

Figura 37. Comparação do prêmio de custo e economia de combustível de veículos híbridos convencionais

No quadro na página anterior, retirado de uma publicação do Chau (2016), podemos ter uma visão de ordem de grandeza dos custos dos pacotes de Eletrificação. Em valores de 2019, a eletrificação ainda agrega custos significativos para os veículos de passeio, fazendo com que os veículos híbridos surjam como os veículos de maior valor no portfólio das OEMs.

Hoje em dia o custo de um sistema de eletrificação micro híbrido (48V), um dos primeiros passos de hibridização, que traz um ganho em média de 10% na economia de combustível, se assemelha ao custo de um motor de combustão interna convencional. Esses valores têm uma tendência de queda conforme a ampliação dos volumes e surgimento de novas tecnologias no futuro que permitirão a produção em maior escala.

O custo de um sistema eletrificado completo ainda dobra os custos de um automóvel médio à combustão, sendo viável apenas com grandes subsídios governamentais para que seja implantado atualmente. Todos estão trabalhando para que as baterias e seus controladores atinjam juntos o valor de US$ 100/KWh para que haja competitividade com os motores de combustão que vêm se tornando mais caros pela adoção de sistemas de otimização da combustão para torná-los mãos eficientes e limpos.

Existem previsões para se atingir esses valore entre 2025 e 2027, porém isso sempre dependerá de um equilíbrio entre oferta e demanda dos novos materiais empregados, quer seja nas baterias, quer seja nos motores elétricos com seus ímãs de terras raras.

Por isso é importante para o Brasil desenvolver alternativas para essas matérias-primas estratégicas para o futuro da mobilidade descarbonizada e justa.

C. AS DIFERENTES FORMAS DE PROPULSÃO PARA VEÍCULOS COMERCIAIS

i) Motor de ciclo Diesel

O motor Diesel recebeu este nome em função do trabalho de Rudolf Diesel e é um motor de combustão interna onde a ignição do combustível acontece em função da alta temperatura do ar que é comprimido mecanicamente. Nos motores Diesel mais modernos, pode-se encontrar um sistema de recirculação dos gases de escapamento (EGR) com o objetivo de reduzir as emissões locais de óxido de nitrogênio[5] (NOx). O torque que um motor Diesel produz é controlado pela manipulação da relação ar-combustível. A alta taxa de expansão e a queima otimizada faz com que o motor Diesel seja uma máquina térmica das mais eficientes em relação a outros motores de combustão.

[5] Os óxidos de nitrogênio (NOx) são gases venenosos e altamente reativos que se formam quando o combustível é queimado em altas temperaturas.

3. PROPULSÃO VEICULAR

O motor diesel vem evoluindo há mais de um século a ponto de estar se atingindo o nível máximo de redução da emissão de CO_2 que esse tipo de tecnologia pode alcançar. Essa limitação faz com que se aumentem os investimentos para otimizar a propulsão à base de outras fontes de energia para veículos comerciais.

ii) Veículos comerciais com motores a gás

Os veículos pesados a gás natural (GNV) funcionam de maneira muito semelhante aos veículos movidos a gasolina com motores de combustão interna. O gás natural é normalmente armazenado em cilindros e fica a uma alta pressão. Um regulador reduz a pressão a um nível compatível com o sistema de injeção de combustível do motor.

Atualmente, no Brasil, Scania e Iveco estão desenvolvendo soluções de descarbonização com motores a gás.

Há várias empresas que atuam no mercado de reposição que fazem a transformação de motores Diesel para motores a gás, porém não há um sistema padronizado ou uma estratégia clara para essa transformação, resultando numa regulação que não passa pelos mesmos critérios que empregam as montadoras na indústria automotiva.

iii) Tipos de eletrificação

Na categoria de transporte de cargas e passageiros, não há variantes para a eletrificação como há para os veículos de passageiros. Basicamente existem os veículos carregados eletricamente (ECV) e os veículos híbridos (HEV).

Apesar de todos os fabricantes mundiais de veículos comerciais já apresentarem suas estratégias futuras para a descarbonização da propulsão para caminhões, a participação dessas novas tecnologias no mercado não evoluiu muito nos últimos anos. Dados da associação dos fabricantes europeus de automóveis (Acea) mostram que em 2021, o diesel continuou a dominar as vendas de veículos comerciais novos médios e pesados na União Europeia, representando 95,8% do mercado (96,5% em 2020). Os veículos com carregamento elétrico representaram 0,5% das vendas de caminhões novos em toda a região.

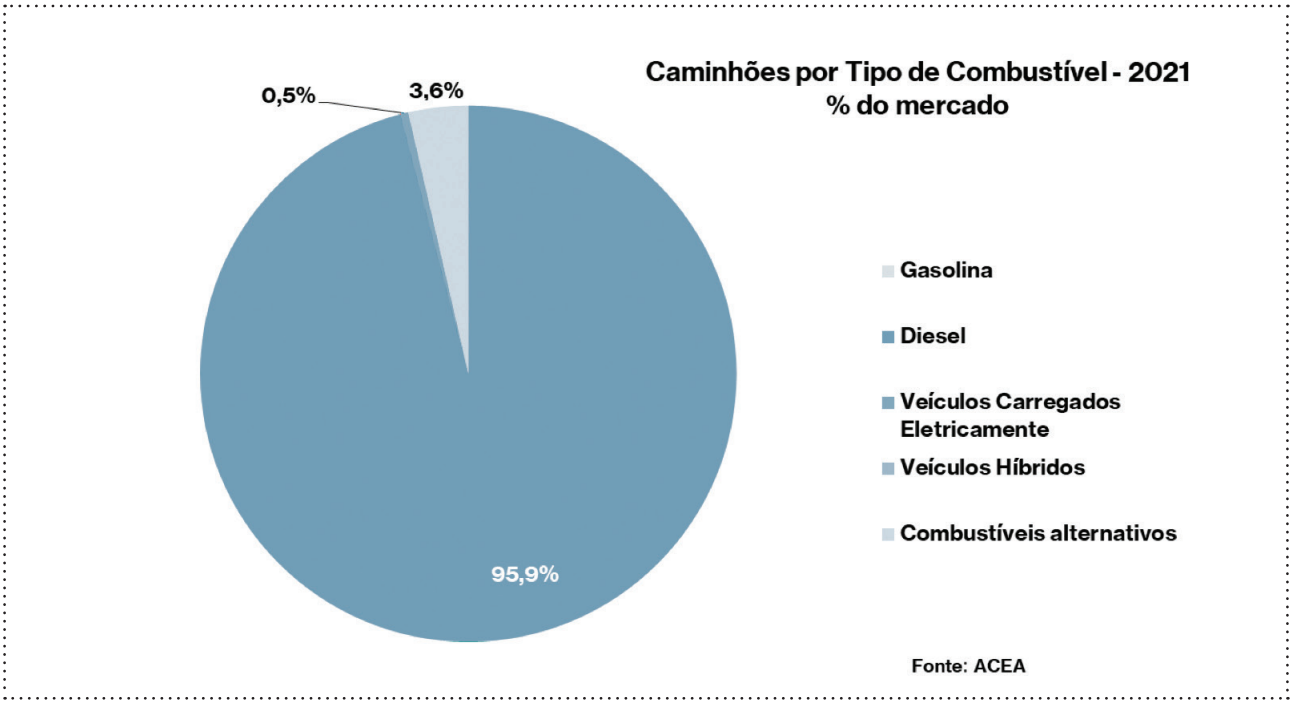


Figura 38. Vendas de caminhões na União Europeia por tipo de combustível

Ainda de acordo com a Acea, pode-se notar que há uma participação maior de fontes alternativas aos motores Diesel no mercado mundial de ônibus, como provável influência das leis municipais que visam à descarbonização dos transportes

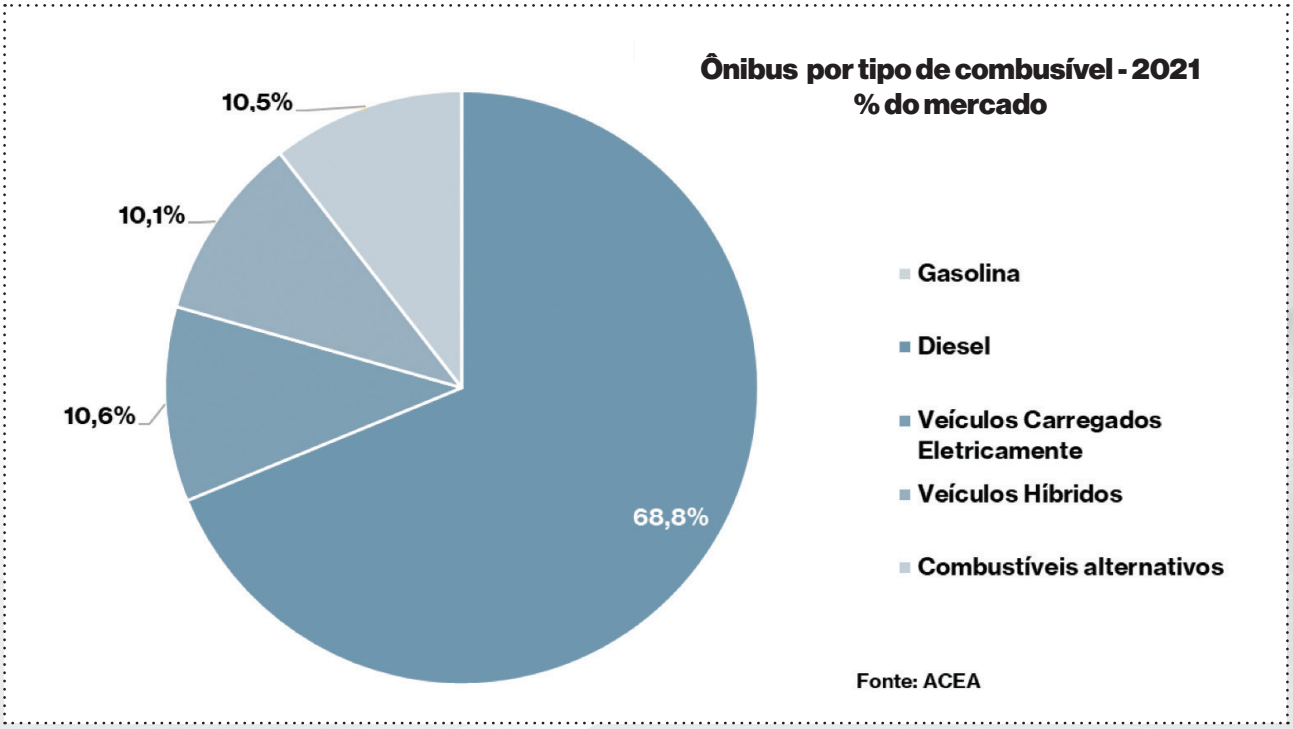


Figura 39. Vendas de ônibus na União Europeia por tipo de combustível

D. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (FUEL CELL)

As células a combustível (CaC) têm muitas características que as tornam desejáveis, como dispositivos de conversão de energia. Duas delas têm sido relevantes em direcionar o interesse para as aplicações terrestres, a combinação de alta eficiência de conversão e baixo impacto ambiental. A conversão direta da energia química em energia elétrica torna o processo mais eficiente, e a reação entre hidrogênio e oxigênio na célula produz água como subproduto, além da conversão ser isenta de ruídos.

O desenvolvimento da tecnologia das células a combustível ocorreu, inicialmente, para as naves espaciais e, nas últimas três décadas, para geração de energia elétrica tanto estacionária como embarcada (Camargo, 2004; Today, 2020).

As CaCs geram eletricidade por uma reação eletroquímica na qual oxigênio e um combustível rico em hidrogênio se combinam para formar água. Ao contrário dos motores de combustão interna, o combustível não é queimado, a energia é liberada eletrocataliticamente. Isso permite que as células a combustível sejam altamente eficientes em termos de energia (em torno de 55%, sem contabilizar o uso da energia térmica) (E4TECH, 2019).

O processo de conversão de energia do hidrogênio em energia elétrica é denominado de eletrólise reversa e, por isso, como mencionado anteriormente, o subproduto é água (equação 1) (Silva, 2014).

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + Q$$

Em que: Q é a energia produzida na forma de calor e energia elétrica.

É importante salientar que uma célula a combustível é como uma bateria, pois gera eletricidade a partir de uma reação eletroquímica. As baterias e as células a combustível convertem a energia química potencial em energia elétrica e, como subproduto desse processo, energia térmica. Diferentemente das baterias que têm ciclo de vida determinado, uma célula a combustível, por outro lado, utiliza um suprimento externo de energia que pode, teoricamente, funcionar indefinidamente, desde que seja fornecida com uma fonte de hidrogênio e uma fonte de oxigênio (geralmente o próprio ar) (Today, 2020).

3. PROPULSÃO VEICULAR

Toda unidade de célula a combustível consiste em um número de células individuais. Cada célula possui dois eletrodos, um negativo (cátodo) e um positivo (ânodo). As reações que produzem eletricidade ocorrem nos eletrodos. Toda célula a combustível também possui um eletrólito sólido ou líquido, que transporta íons de um eletrodo para o outro, e um catalisador, que acelera as reações nos eletrodos. O eletrólito desempenha um papel fundamental – deve permitir que apenas os íons apropriados passem entre os eletrodos. Ao migrar pelo eletrólito, elétrons livres ou outras substâncias interrompem a reação química e diminuem a eficiência da célula (Today, 2020).

Há vários tipos de células a combustível sendo desenvolvidas. Algumas operam somente com hidrogênio puro, enquanto outras podem utilizar, além do hidrogênio, o monóxido de carbono (CO) e alguns álcoois (metanol e etanol). Também diferem por sua temperatura de operação, o tipo de eletrólito que utilizam e a pressão de operação. Cada tipo possui características mais adequadas a certas aplicações.

Do seu desenvolvimento original para aplicações espaciais à sua aplicação em sistemas terrestres automotivos ou estacionários, as células a combustível estão cada vez mais encontrando aceitação devido principalmente à sua eficiência superior de transformação e baixa emissão de poluentes e ruídos.

Vale a pena comentar que a classificação das células a combustível dá-se normalmente pelo tipo de eletrólito e temperatura nas quais operam. Assim, as principais tecnologias atualmente em desenvolvimento e em utilização são:

- *Alkaline Fuel Cell* (AFC) – Célula a combustível alcalina;
- *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC) – Célula a combustível de carbonato fundido;
- *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC) – Célula a combustível de ácido fosfórico;
- *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) – Célula a combustível de membrana de troca de prótons (a mais utilizada em sistemas embarcados);
- *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) – Célula a combustível de metanol direto;
- *Solid Oxid Fuel Cell* (SOFC) – Célula a combustível de óxido sólido (para sistemas estacionários, mas pode ser utilizado em sistema embarcados).

Na figura 40 pode-se observar as diferentes reações eletroquímicas dos diferentes tipos de CaC.

i) PEMFC

A célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) fornece alta potência e oferece algumas vantagens como baixo peso e volume em comparação com outras células a combustível. Essas células usam um polímero sólido como eletrólito contendo um catalisador de platina ou liga de platina e precisam apenas de oxigênio e hidrogênio para funcionar (EERE, 2022).

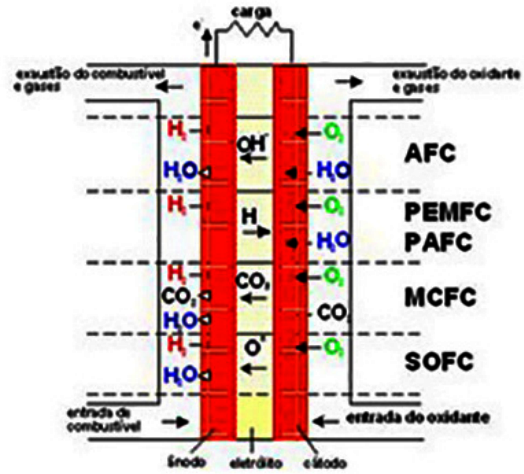


Figura 40. Reações eletroquímicas que ocorrem em cada tipo de célula a combustível

Fonte: Camargo, 2004.

As PEMFCs operam em temperaturas relativamente baixas, em torno de 80°C. Esse funcionamento a baixas temperaturas permite que inicie sua operação rapidamente (porque demanda menos tempo para o aquecimento se comparada às SOFC) e resulta em menos desgaste dos componentes do sistema, matérias mais resistentes e maior durabilidade. No entanto, requer que um catalisador de metal nobre (tipicamente platina) seja usado para separar os elétrons e os prótons do hidrogênio, aumentando o custo do sistema (Silva, 2014).

O catalisador de platina é extremamente sensível ao envenenamento por monóxido de carbono (CO), tornando necessário empregar hidrogênio ultrapuro para que não haja traços de CO no caso de o hidrogênio ser fornecido a partir de hidrocarboneto. Essa forma de produção do H_2 eleva os custos do processo.

Apesar de serem usadas em sistemas estacionários, as células do tipo PEMFC são as melhores opções atuais para a eletromobilidade (veículos leves, pesados, trens, navios, etc.). Isso porque, devido à relativa baixa temperatura em comparação às SOFC (1.000ºC), facilita o uso de matérias isolantes embarcadas. Os veículos elétricos com células a combustíveis (FCEV) comerciais da atualidade utilizam a PEMFC para gerar energia elétrica embarcada.

ii) SOFC

A célula a combustível de óxido sólido (SOFC) é também considerada uma célula de segunda geração e uma das mais promissoras para geração de eletricidade a partir de combustíveis hidrocarbonetos e biocombustíveis. Isso porque é tolerante às impurezas e, também, altamente eficiente. A SOFC trabalha em altas temperaturas entre 800°C e 1.000°C, o que pode ser utilizado como fonte de energia térmica. Uma das grandes vantagens da SOFC é que o eletrólito é um sólido. Isso significa que não há necessidade de bombas para reciclar o eletrólito quente.

Outra grande vantagem é que tanto o hidrogênio quanto o monóxido de carbono são usados na célula. Isto significa que a SOFC pode usar combustíveis tais como gás natural, gasolina, etanol e gás de carvão. A SOFC necessita de algum tempo para atingir uma temperatura mínima de 650°C, que é conseguida com a queima de combustível ou qualquer fonte de energia. O calor gerado pela célula é então usado no reformador do combustível. Essas células possuem eficiência em torno de 55%. Se a energia térmica for aproveitada, essa eficiência pode ser superior a 80% (EERE, 2022).

A alta temperatura de operação é considerada uma desvantagem para uso em veículos elétricos. Contudo, para a realidade brasileira, o uso de SOFC pode ser vantajoso. Como ela pode ser alimentada com o combustível de forma direta, necessitando apenas de um pré-reformador, tem-se estudado o uso do etanol para supri-la com hidrogênio. Dessa forma, o veículo elétrico com célula a combustível não precisa ter postos com hidrogênio, mas sim um tanque normal abastecido com etanol.

A empresa Nissan tem avançado bastante com os testes em sua van elétrica e-NV200 com uma SOFC embarcada que utiliza etanol como fonte de H_2. Recentemente, a Volkswagen também tem apoiado pesquisas nesse sentindo.

As SOFCs também são o tipo de célula de combustível mais resistente ao enxofre. Elas podem tolerar qualquer magnitude de enxofre em relação a outros tipos de células. Além disso, não são envenenadas pelo monóxido de carbono, que pode até ser usado como combustível. Essa propriedade permite que as SOFCs usem gás natural, biogás, etanol e metanol. A operação em alta temperatura tem desvantagens. Isso resulta em uma inicialização lenta e requer blindagem térmica significativa para reter o calor e proteger as pessoas, por outro lado este calor pode ser vantajoso para aplicações estacionárias (EERE, 2022).

As altas temperaturas de operação também impõem requisitos rigorosos de durabilidade dos materiais. O desenvolvimento desses materiais de baixo custo e com alta durabilidade para as temperaturas de operação da célula são o principal desafio técnico dessa tecnologia (EERE, 2022).

iii) Motores a Combustão Interna a Hidrogênio (HICE)

Os veículos com motor de combustão interna a hidrogênio (*HICEV, hydrogen internal combustion engine vehicle*) não são propriamente uma novidade. A Mazda, a Toyota e a BMW têm veículos testados com o hidrogênio como combustível. Não há nenhuma questão técnica que deva ser solucionada. As principais questões que devem ser levadas em consideração para o uso dessa tecnologia são:

1. Apesar de não haver emissão de monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos, pode haver a produção de NOx como todo processo de motores a combustão interna. Desta forma, não são considerado uma tecnologia limpa, haja vista que o NOx tem potencial de aquecimento (*global warming potencial*) 265 vezes maior que o CO_2;

2. Os motores a combustão interna têm sua eficiência baseada nas leis da termodinâmica. Desta forma, os motores a combustão interna de ciclo Otto não terão eficiências maiores que 25%, mesmo trocando por um combustível com maior eficiência de queima (ciclo Diesel tem eficiências maiores);

3. Com isso, os tanques de hidrogênio para uso em MCI terão que ser maiores e mais custosos para garantir uma autonomia igual à da utilização de combustível líquido convencional;

4. As células a combustíveis têm eficiência de 50% por serem um processo eletroquímico, por isso vêm sendo consideradas como um substituto em potencial do MCI.

Nota importante:

Os países desenvolvidos têm investido altas quantias no desenvolvimento de veículos movido através de células a combustível. No Brasil os investimentos têm priorizado a geração do hidrogênio, porém é preciso intensificar os investimento em P&D e na formação de profissionais especializados na mobilidade através de células a combustível, para evitar que a dependência tecnológica seja uma barreira para o desenvolvimento no nosso País.

4. ESTRATÉGIA DOS PRINCIPAIS FABRICANTES DE VEÍCULOS COMERCIAIS[6]

Conforme dados da Plataforma de Infraestrutura em Logística de Transportes (Pilt) da Fundação Dom Cabral, o modo de transporte rodoviário correspondia a 53% do total de toneladas-quilômetros-úteis (TKU) em 2015 e continuará em níveis semelhantes até 2035. Dessa forma, o foco nesse modal é prioritário para a definição de estratégias de descarbonização dos transportes no Brasil. Por isso vamos analisar a seguir a estratégia das principais montadoras de caminhões e ônibus com presença global que atuam no mercado brasileiro, por serem elas que irão oferecer produtos importantes dos quais a descarbonização no nosso País depende.

Nos últimos três anos, a MAN/Volkswagen e a Mercedes-Benz dividem a liderança pela maior participação de licenciamentos no mercado de caminhões. No mesmo período, Mercedes-Benz e MAN dividem a liderança de licenciamento de ônibus, como mostram os gráficos abaixo. Dessa forma, é importante conhecer as estratégias das principais empresas que atuam no mercado nacional, com base nas suas diretrizes globais.

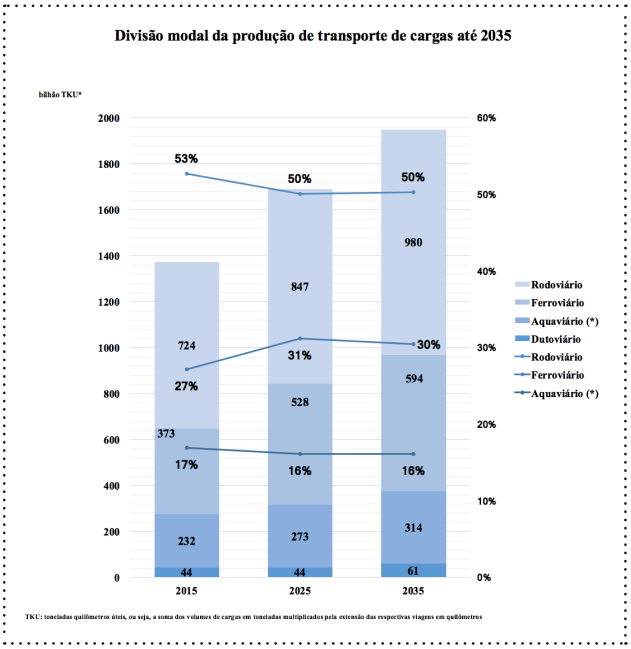


Figura 41. Modais de transporte de cargas

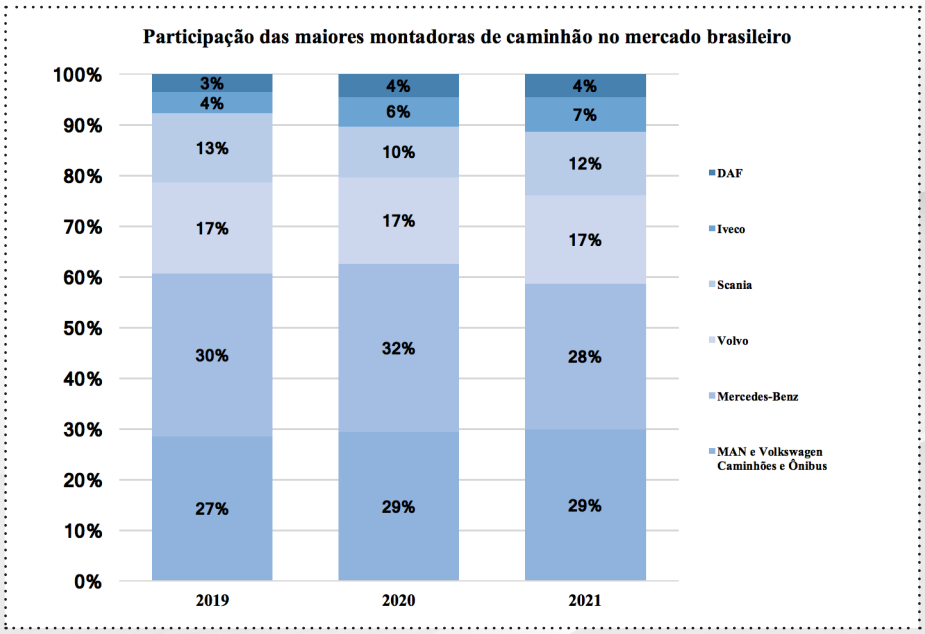


Figura 42. Participação no mercado brasileiro de caminhões

[6]Apenas no que se refere à descarbonização.

4. ESTRATÉGIA DOS PRINCIPAIS FABRICANTES DE VEÍCULOS COMERCIAIS

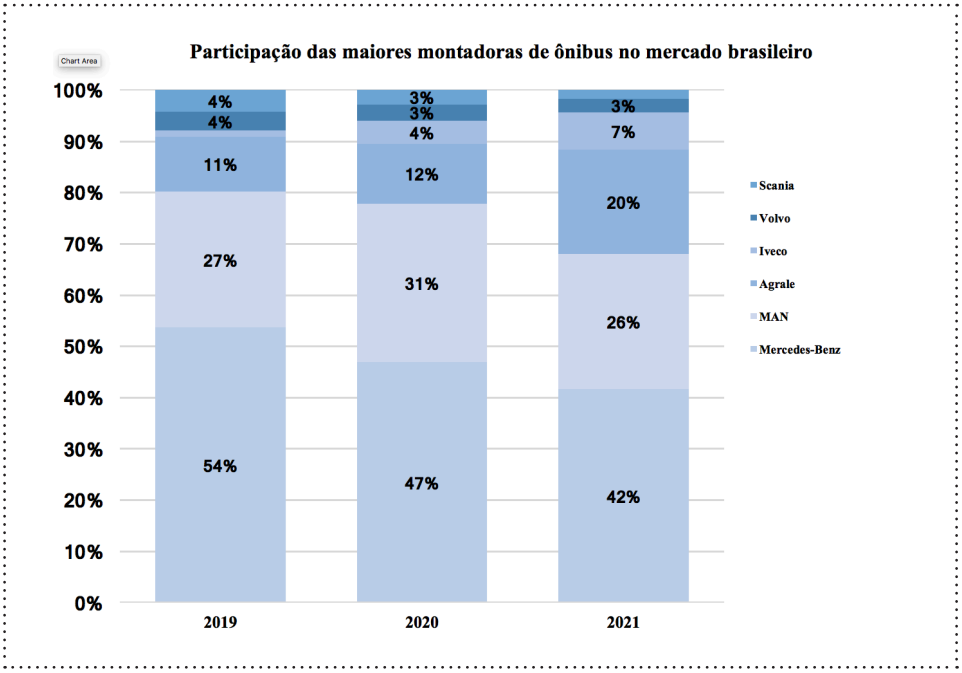


Figura 43. Participação no mercado brasileiro de ônibus

Historicamente, as montadoras de caminhões e ônibus não têm uma estratégia arrojada para emissões de poluentes, atendendo apenas os requisitos de cumprimento das legislações, à medida que estas evoluem. A principal legislação para veículos comerciais é aquela que segue as definições do Proconve, como já foi apresentado no item 3.a., mais acima.

Dando sequência, vamos examinar as estratégias das principais montadoras que atuam no Brasil, com base nas informações que elas disponibilizam na internet. Nem todas as montadoras disponibilizam o mesmo nível de informação, de forma que a descrição a seguir limita-se ao que está publicamente disponível.

A. DAIMLER TRUCKS

i) Estratégia global

Em dezembro de 2021 ocorreu a oferta pública inicial (IPO) que deu origem à Daimler Trucks AG, empresa que até então pertencia à Daimler AG. A nova empresa dedica-se exclusivamente ao mercado de veículos comerciais, deixando a produção de veículos de passeio para a Mercedes-Benz Group AG. Ambas as empresas são agora totalmente independentes.

4. ESTRATÉGIA DOS PRINCIPAIS FABRICANTES DE VEÍCULOS COMERCIAIS

A holding Daimler Trucks opera de forma global através das marcas Mercedes-Benz (caminhões leves, médios e pesados, ônibus urbanos e rodoviários), Trucks North America, que detém as marcas Freightliner (vans, caminhões médios e pesados), Western Star (caminhões pesados) e Thomas Built Buses (ônibus escolares), Trucks Asia, com a marca Fuso (caminhões leves, médios e pesados), e BharatBenz (caminhões para o mercado da Índia), havendo ainda outras marcas e serviços em várias áreas da mobilidade.

No seu plano estratégico, a empresa afirma que vai cumprir os requisitos do Acordo Climático de Paris, introduzindo no mercado o transporte completamente neutro em CO_2 até 2050.

Sua estratégia envolve caminhões e ônibus elétricos a bateria ou movidos a hidrogênio seguindo o conceito "tanque à roda". Curiosamente, a Daimler Trucks & Buses não menciona o conceito "poço à roda" na sua estratégia.

Na Europa, a empresa produz caminhões elétricos para o transporte urbano desde 2021. Ela anuncia para 2024 o transporte interestadual de média distância e afirma que a partir de 2027 vai disponibilizar veículos de longa distância movidos a célula a combustível. A Daimler Trucks AG ressalva que sua estratégia depende da instalação de infraestrutura de abastecimento adequada.

A empresa vai gerenciar a desaceleração dos motores a combustão interna (ICE) enquanto mantém a competitividade tecnológica. Para isso, ela trabalha em parceria com a firma Cummins em uma estratégia de motores para caminhões médios. No caso dos veículos pesados, ela explica que a estratégia é buscar ativamente parceiros para compartilhar os custos de desenvolvimento de motores para veículos pesados que venham a atender a legislação Euro VII (emissões locais de gases), não tendo anunciado publicamente até hoje se já definiu como irá viabilizar essa etapa da evolução dos seus motores. A empresa está reduzindo significativamente os gastos com ICE, e a grande maioria dos gastos em P&D deve priorizar os ZEV (*Zero Emissions Vehicles*).

Para ônibus, a empresa já oferece modelos eletrificados através das diferentes marcas e mercados que atuam nos países desenvolvidos.

ii) Estratégia nacional

A Daimler Trucks AG atua no Brasil há mais de 65 anos através da marca Mercedes-Benz. Com fábrica em São Bernardo do Campo, no estado de São Paulo, mantém um centro de desenvolvimento e um campo de provas dos mais modernos no Brasil.

Apesar da sua tradição de desenvolvimento de produto, a Mercedes-Benz não tem mostrado uma estratégia agressiva rumo à descarbonização. Há alguns trabalhos evidenciando a importância do uso dos biocombustíveis, como o HVO. Há o lançamento de um modelo de chassis de ônibus elétrico para o transporte urbano. Não obstante, a empresa deve atingir as especificações do Proconve P8 que entram em vigor a partir de 2023.

B. GRUPO TRATON

i) Estratégia global

O Grupo Traton é um dos maiores fabricantes de veículos comerciais do mundo. O Grupo é composto pelas marcas MAN, Scania, Navistar e Volkswagen Caminhões e Ônibus, que atuam em diferentes mercados. De acordo com o relatório publicado pela empresa em 2020, ela vendeu cerca de 190.200 veículos em 2020. A linha de produtos inclui caminhões leves, médios e pesados, além de vans e ônibus. Em 31 de dezembro de 2020, a Traton empregava cerca de 82.600 pessoas em todo o mundo.

A Scania tem produção na Europa, na América do Sul e na Ásia. Ela produz ônibus urbanos, intermunicipais e de viagem, veículos pesados para transporte de longa distância e distribuição. A empresa adota um sistema que se baseia em três pilares: eficiência energética (otimização do veículo e da condução), combustíveis renováveis e eletrificação (otimização da energia) e transporte inteligente e seguro (otimização do sistema de transporte).

A MAN fabrica caminhões leves a pesados, através de fábricas na Rússia, na África do Sul e na Turquia. Ela fabrica ônibus urbanos e intermunicipais.

A VW Trucks & Buses fabrica caminhões leves a pesados e chassis de ônibus para a América Latina e a África.

A Navistar produz caminhões comerciais da marca International®, motores a diesel proprietários e ônibus escolares e comerciais da marca IC Bus®.

Apesar de o Grupo Traton apontar para a rota de eletrificação no longo prazo, ele acredita nos biocombustíveis usados em motores de combustão interna como a melhor escolha de curto prazo para reduzir as emissões de CO_2 do transporte comercial. As soluções elétricas serão 10% do volume total de vendas de veículos até 2025 e 50% até 2030. A análise do custo total da operação (TCO) é uma prática estratégica na empresa que busca desenvolver veículos elétricos com TCO equivalente aos veículos com trem de força convencional. Está no plano estratégico do Grupo Traton unificar o trem de força (motor, transmissão e eixos) para todas as marcas da empresa.

Nas aplicações urbanas, a MAN testou, na cidade de Munique, na Alemanha, o projeto MAN Lion's City E, cujo objetivo é reduzir a zero as emissões locais das operações da empresa até 2030. O projeto entrou em produção em série em outubro de 2020, oferecendo uma autonomia de 200 a 270 quilômetros. A empresa anuncia pesquisas para chegar até 400 quilômetros de autonomia nos próximos cinco anos.

A Scania informa que vai produzir veículos que vão operar sem combustíveis fósseis até 2040, e a empresa planeja equipar todos os novos caminhões que produz com sistemas de acionamento sem combustíveis fósseis. Para a categoria de caminhões até médio porte, a estratégia se baseia em veículos movidos a bateria. A Scania adota o conceito do "poço à roda" para medir as emissões de carbono dos veículos em uso.

ii) Estratégia nacional

No âmbito nacional, é possível ver a Scania focando toda a sua estratégia em caminhões movidos a biogás, através de demonstração pública de veículos com este tipo de propulsão, anúncio de resultados de testes e declarações dos seus dirigentes no Brasil. Em fevereiro de 2022, a empresa anunciou os primeiros veículos movidos a gás natural liquefeito do Brasil.

A empresa afirma que, mesmo quando a eletrificação chegar, ainda haverá mercado para caminhões a gás, que ela pretende produzir seguindo o conceito de TMA (*Taylor Made for Application*) da Scania, ou seja, a customização do veículo conforme a demanda do cliente. A Scania também firmou parceria com a Comgás para acelerar o desenvolvimento do mercado de GNV e biometano para veículos comerciais pesados.

A Volkswagen Caminhões & Ônibus aponta os biocombustíveis como o principal caminho para a descarbonização da frota brasileira, porém sem perder de vista a tendência global de eletrificação e outras tecnologias que estão transformando a indústria de transporte.

Os e-Delivery 11 e 14 já estão em produção desde julho de 2021. Os modelos são montados na fábrica de Resende-RJ na mesma planta do Consórcio Modular (lançado há mais de 25 anos). A empresa também trabalha no desenvolvimento de baterias de nióbio para veículos elétricos, em parceria com a empresa CBMM.

Os produtos da marca MAN no Brasil estão migrando para a marca Volkswagen Caminhões.

C. VOLVO E SUAS EMPRESAS

i) Estratégia global

O Grupo Volvo tem produção em 19 países e vende seus produtos e serviços em 190 mercados em todo o mundo. O portfólio de marcas do Grupo Volvo é composto por Volvo, Volvo Penta, Rokbak, Renault Trucks, Prevost, Nova Bus, Mack e Arquus. A cellcentric é uma parceria com a Daimler Trucks para a produção de células a combustível tipo PEM, as quais vão equipar os caminhões pesados para longa distância de ambas as marcas.

O Grupo Volvo se comprometeu com metas internacionais que visam evitar o cenário de aumento da temperatura média da atmosfera acima de 1,5°C. Ela coloca o desenvolvimento de ônibus como prioridade. Para caminhões e equipamentos de construção, a transição está em um estágio inicial, mas espera-se que se acelere com veículos elétricos a bateria, combustíveis de baixa emissão usados em motores de combustão e, no final desta década, veículos elétricos a célula de combustível. O Grupo Volvo está na vanguarda desse desenvolvimento e está ansioso para impulsionar a mudança, mas também ciente dos desafios. Em 2021, o grupo entregou 942 veículos totalmente elétricos, principalmente na Europa e na América do Norte.

Na sua estratégia de descarbonização global, a Volvo informa 50% menos emissões em 2030 e 100% menos emissões até 2040. A empresa pretende atingir esses níveis através de três tecnologias: motores a combustão passam de 100% em 2020 para cerca de 25% até 2040, motores a célula a combustível começam na metade da década de 2020 e são cerca de 50% a partir de 2020, e veículos elétricos a bateria completam o portfólio a partir de 2040, porém esses números vão variar em função de vários fatores. A empresa também declara que a visão do "poço à roda" faz parte da sua estratégia.

A Renault Trucks está desenvolvendo caminhões elétricos para a distribuição urbana. Além disso, a empresa projetou um novo sistema para aumentar a eficiência energética dos caminhões totalmente elétricos equipados com carroceria refrigerada, mostrando um viés para nichos específicos.

Conforme a Volvo informa em seu Relatório Anual e de Sustentabilidade de 2021, em 1º de março de 2021, o Grupo Volvo e a Daimler Truck AG formaram a cellcentric (com 50% de participação societária para cada empresa). A cellcentric conta mais de 300 especialistas altamente qualificados trabalhando de forma interdisciplinar. Cerca de 700 patentes individuais foram emitidas até agora em temáticas ligadas ao uso de células a combustível.

Criada em fevereiro de 2021, a Volvo Energy apoiará a jornada de eletrificação do grupo, garantindo a infraestrutura de carregamento e outros serviços de eletromobilidade relacionados, além de gerenciar o fluxo de negócios de baterias do Grupo Volvo ao longo do ciclo de vida.

ii) Estratégia nacional

Em fevereiro de 2022, a Volvo anunciou que vai investir 1,5 bilhão de reais no Brasil até 2025, mas a empresa não esclarece exatamente qual é a sua estratégia para a descarbonização no mercado brasileiro.

D. GRUPO IVECO

i) Estratégia global

O Grupo Iveco é composto por oito marcas que produzem veículos comerciais leves, médios e pesados (Iveco), trem de força (FPT Industrial), ônibus (Heuliez, Iveco Bus), além de serviços financeiros (Iveco Capital) e veículos especiais (IDV, Astra e Magirus). São 20 centros de manufatura e 21 centros de P&D na Europa, um centro de P&D nos Estados Unidos, cinco plantas e três centros de P&D na América do Sul e mais três manufaturas e quatro centos de P&D em outras partes do mundo.

A empresa pretende atingir de zero emissão de carbono até 2040, através de novos processos de fabricação em toda a cadeia de valor e no desenvolvimento de novos produtos. Há também uma abordagem ligada à econômica circular. Ela também informa sua estratégia de curto prazo anunciando o desenvolvimento de motores alternativos de última geração movidos a GNV e GNL e compatíveis com biometano, para reduzir ainda mais as emissões de CO_2 e o Custo Total de Propriedade (TCO), com foco em tecnologias de motores a gás natural (GN) para alcançar emissões ultrabaixas de NOx em aplicações urbanas.

O Grupo Iveco está trabalhando no desenvolvimento da próxima geração Electric Daily (incluindo produção interna de e-drivelines e baterias), na implementação de soluções híbridas leves em veículos a diesel e GNV e no desenvolvimento de novos veículos para carga pesada totalmente elétrica e a célula a combustível (incluindo a produção interna de eixos elétricos).

A empresa anuncia a implementação de tecnologias alternativas de transmissão (elétrica/híbrida) em todos os veículos até 2030, para atingir -50% nas emissões de CO_2.

ii) Estratégia nacional

A empresa anuncia que vai investir 1 bilhão de reais nas operações na América Latina até 2025. No mercado brasileiro, há o claro foco no uso de Gás Natural Veicular (GNV) e biometano. A empresa já oferece o modelo Tector com motorização a gás, que parece ser a principal estratégia da empresa para a descarbonização no Brasil.

Nota importante

Como descrito nos itens acima, há um intenso desenvolvimento de novas tecnologias, investimentos e debates em todos os países desenvolvidos. Isso pode ser visto pelo posicionamento estratégico das montadoras. No Brasil, porém, nada está claro.

I. O setor público brasileiro precisa se especializar no tema, para que possa legislar a respeito;

II. O setor público brasileiro precisa compreender que as principais decisões estratégicas das montadoras são tomadas em nível global, e não em nível nacional. Até porque os números do nosso mercado não têm tido uma participação significativa nas receitas mundiais das montadoras;

III. O setor público precisa exercer um papel de protagonismo e liderança, negociando com os líderes das subsidiárias das montadoras no nosso território, para que definam estratégias coerentes para os recursos energéticos do País;

IV. O setor privado brasileiro precisa criar estratégias de exportação dos veículos nacionais para mercados que tenham matriz energética semelhante à nossa, como forma de viabilizar a produção de veículos no nosso mercado.

A. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

As questões ambientais têm sido cada vez mais utilizadas como ferramentas de escolhas pelos consumidores. As empresas utilizam o "*marketing* verde" como forma de se diferenciar em um mercado cada vez mais consciente. Dessa forma, o desempenho ambiental de produtos e processos se tornou uma questão fundamental. A ferramenta mais utilizada atualmente é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV tem uma abordagem metodológica do "berço ao túmulo" para avaliar sistemas industriais, ou seja, ela permite estimar os impactos ambientais acumulativos resultantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima, fabricação, passando pelo transporte, manutenção até a eliminação final do produto (SAIC, 2006).

Para a ACV há uma norma internacional, a ISO 14040:2014, e guias/manuais internacionalmente aceitos como o ILCD (*International Life Cycle Data System*), desenvolvidos pela Comissão Europeia desde 2005. Na figura 44, encontram-se as fases da ACV.

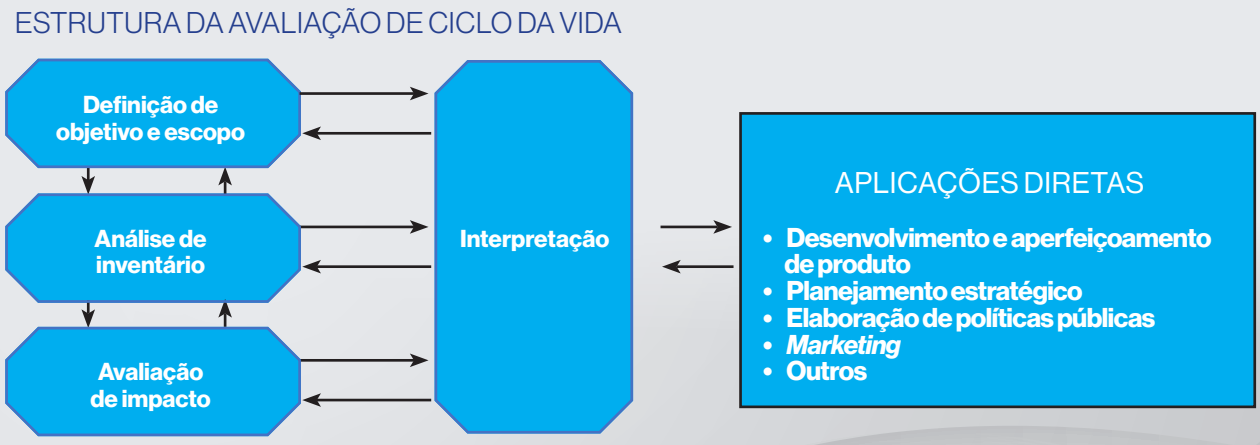


Figura 44. Fases da ACV

Fonte: ABNT, 2014.

De maneira geral, a ACV de produtos e processos tem ajudado as empresas e governos a tomar as melhores decisões ambientais. Tendo em vista que com essa metodologia e sua revisão constante, é possível mapear os impactos ambientais em cada fase de produção e criar normas e leis que ajudem a minimizar os impactos ambientais. Na figura 45 é possível observar um exemplo de processos na fabricação de um produto.

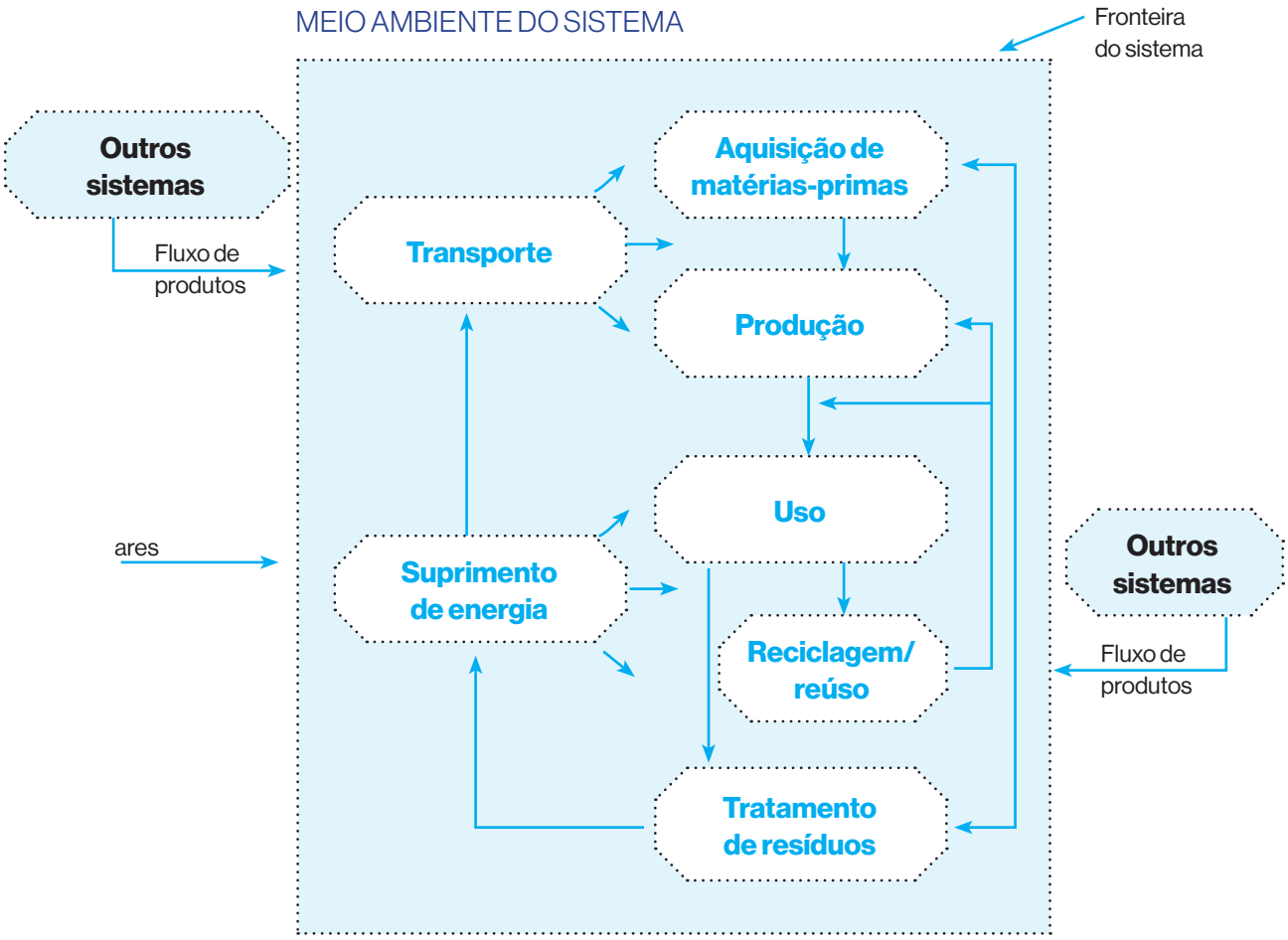


Figura 45. Exemplo de processos na fabricação de produto

Fonte: ABNT, 2014.

Nos próximos tópicos serão descritos de forma bastante simplificada os termos da ACV aplicados aos veículos automotores.

B. CICLO DE VIDA NA CADEIA AUTOMOTIVA

No caso da indústria automotiva, uma avaliação completa do tipo ACV precisa incluir todos os aspectos de produção e uso dos veículos.

A cadeia começa na produção do veículo, desde os fornecedores de componentes mais básicos da cadeia logística até as montadoras que entregam o produto final ao mercado. Os insumos energéticos para a produção dos componentes e dos veículos devem ser provenientes de fontes renováveis de energia.

5. VISÃO AMPLIADA DA DESCARBONIZAÇÃO

O combustível que vai alimentar o sistema de propulsão veicular também precisa ser oriundo de fontes renováveis, e as emissões gasosas do veículo precisam ser isentas de carbono e outros gases tóxicos.

O projeto precisa prever, desde a sua concepção, como será feito o descarte dos materiais de consumo e o reaproveitamento dos materiais recicláveis, adotando os princípios da economia circular, algo ainda incipiente na indústria automotiva brasileira.

O ciclo do "poço à roda" para veículos com motores a combustão considera a fonte de energia para a industrialização do combustível, a forma que esse combustível é transportado até os postos distribuição e o resultado da queima do combustível no motor do veículo para gerar a energia necessária para o movimento.

A ISO 14040:2006+A1:2020 é importante normalização para se compreender os princípios e para se estruturar a avaliação do ciclo de vida e dos aspectos ambientais.

O JEC (JRC-Eucar-Concawe) é uma colaboração entre o Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia, a Eucar, e o Concawe. Os objetivos do JEC são a avaliação do uso de energia e emissões relacionadas às tecnologias de motores e veículos, qualidades do combustível e a interação entre eles. A Comissão Europeia usa os estudos do JEC como base para suas análises estratégicas.

As análises do "poço à roda" do JEC têm como objetivo estimar a emissão de gases de efeito estufa (GEE), a eficiência energética e os custos industriais de uma ampla gama de opções de combustíveis automotivos e trens de força significativos para a Europa em 2020 e além.

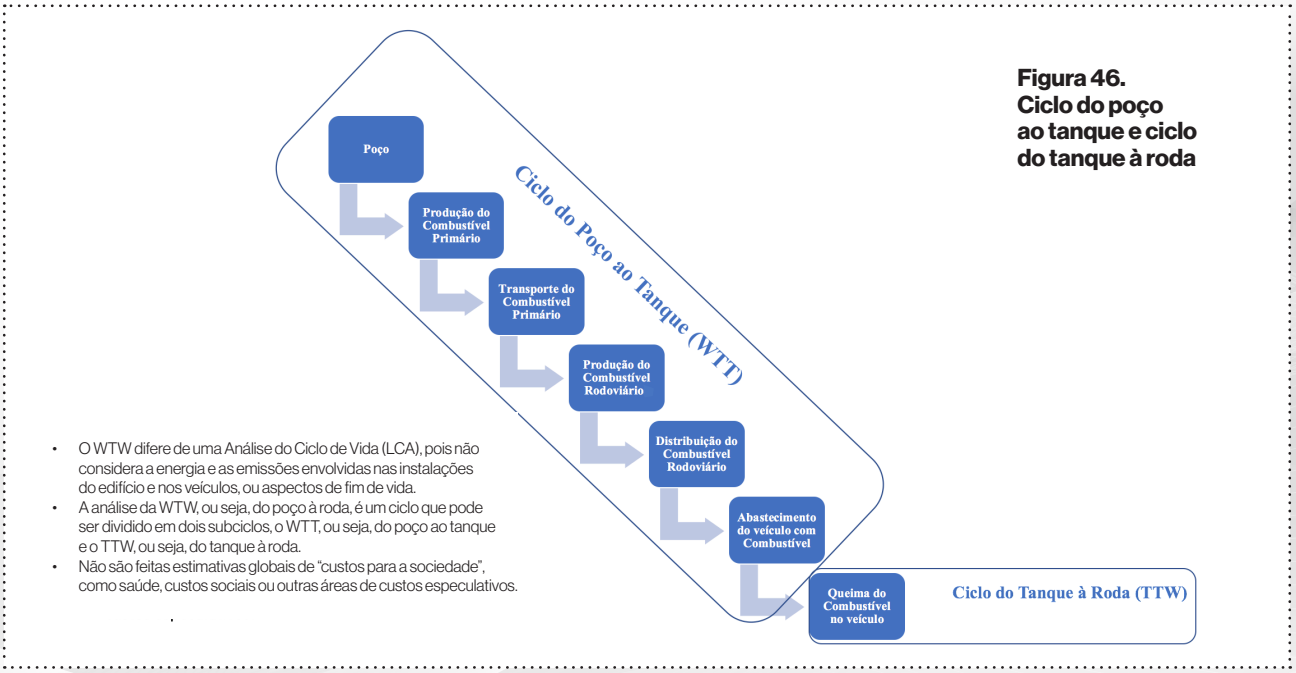


Figura 46. Ciclo do poço ao tanque e ciclo do tanque à roda

5. VISÃO AMPLIADA DA DESCARBONIZAÇÃO

O JEC esquematiza o conceito do "poço à roda" através das seguintes etapas:

O Ciclo do Poço ao Tanque (WTW) difere de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV), pois não considera a energia e as emissões envolvidas nas instalações do edifício e nos veículos, ou aspectos de fim de vida. A análise do WTW se concentra em avaliar o ciclo a partir da produção do combustível, seu transporte – que são os principais contribuintes para distribuição – e finalmente o uso de energia ao longo da vida e as emissões provenientes do uso dos veículos de GEE. Nesses estudos não são feitas estimativas globais de "custos para a sociedade", como saúde, custos sociais ou outras áreas de custos especulativos.

O trabalho de De Souza *et al.* (2018) é uma excelente referência para compreender a ACV para as principais rotas de veículos no Brasil. Esse trabalho é um estudo de atribuição da ACV para cinco cenários alternativos de consumo de combustíveis de cinco veículos leves de passageiros no Brasil. Ele quantifica e compara os impactos ambientais causados pelos veículos movidos a motor de combustão interna a gasolina; motor de combustão interna abastecido por uma mistura de etanol (E25) e etanol; veículo com motor de combustão interna movido a etanol; veículo elétrico híbrido *plug-in* e veículo elétrico de bateria pura. A quantificação se dá através da análise das seguintes variáveis: potencial de destruição de ozônio, potencial de destruição abiótico, potencial de destruição de combustíveis fósseis, potencial de aquecimento global (GWP), potencial de toxicidade humana (HTP), potencial de formação de oxidantes fotoquímicos, potencial de acidificação e potencial de eutrofização.

O estudo apresenta muitas conclusões interessantes ao comparar os cinco cenários e não é necessário detalhá-las todas aqui. Como foco no escopo do presente relatório, cabe resumir os aspectos ligados ao aquecimento global e à ACV. Nesse sentido, o estudo salienta o mix da rede elétrica brasileira que inclui um percentual significativo de fontes renováveis de energia e a ampla utilização do etanol como combustível utilizado nos veículos *flex fuel*, bem como a mistura de etanol com gasolina, como importantes fatores de influência na análise. Apesar de não existir uma única tecnologia com bom desempenho em todas as categorias de impacto ambiental, o estudo mostra os veículos com motor de combustão interna movido a etanol com o menor GWP, seguido dos veículos elétricos de bateria pura (BEV). Por outro lado, aponta os BEV com maior índice de HTP em função dos riscos para ACV das baterias elétricas.

Permanece o desafio de se estabelecer e validar uma metodologia que permita definir a análise completa do ciclo de vida do produto para a indústria automotiva.

Novos trabalhos têm surgido, mas esse é um tema que ainda está distante de uma compreensão e disseminação prática nessa indústria. Enquanto isso acontece, é importante concentrar esforços na definição das emissões de CO_2 para o ciclo do "poço à roda". Cabe notar que o termo "campo à roda" começa a ser usado e se refere às emissões de gases de efeito estufa para rotas energéticas que utilizam os biocombustíveis.

C. A MSBC – MOBILIDADE SUSTENTÁVEL DE BAIXO CARBONO

Em 24 de novembro de 2021 foi lançado o movimento Mobilidade Sustentável de Baixo Carbono (MSBC). Conforme *folder* explicativo, a MSBC tem por objetivo estabelecer a cooperação técnico-científica, o intercâmbio de conhecimentos, informações, experiências e estudos, visando a uma estratégia de mobilidade sustentável para o Brasil, com a ampliação de tecnologias, a partir das fontes de bioenergia disponíveis no País, para um desenvolvimento econômico equilibrado e socialmente inclusivo. É importante reforçar que a estratégia de mobilidade sustentável visa contemplar as rotas tecnológicas de forma ampla, sem exclusão de nenhuma, complementando as linhas de eletrificação a bateria. A MSBC é composta por: Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA), Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos (Anfavea), SAE BRASIL, Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças) e União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica). Ricardo Simões de Abreu e Antonio Megale têm um papel de liderança importante na MSBC.

A figura 47 é a representação gráfica da ACV para o grupo.

Figura 47. Avaliação do ciclo de vida

A MSBC trabalha em sintonia com os estudos definidos no Programa Combustível do Futuro do governo federal, tendo contribuído para seu amadurecimento. Hoje está estudando o tema e em breve vai publicar estudos específicos. Um dos estudos em andamento na MSBC tem avaliado o uso da ferramenta *Alternative Fuel Life-Cycle Environmental and Economic Transportation* (Afleet), do centro multidisciplinar de pesquisa em ciência e engenharia Argonee National Laboratory da Universidade de Chicago. A ferramenta foi concebida para examinar os custos e benefícios ambientais e econômicos de combustíveis alternativos e o uso de novas tecnologias de propulsão veicular. Seu objetivo é estimar o uso de petróleo, emissões de gases de efeito estufa, emissões de poluentes atmosféricos e custo de propriedade de veículos leves e pesados usando planilha de entradas simples. A Mobilidade Sustentável de Baixo Carbono (MSBC) está promovendo grupos de trabalhos para desenvolver a base de dados usando esta ferramenta para se levantar referências da frota nacional e ser uma base de apoio para futuras análises de medidas de descarbonização .

D. FERRAMENTAS PARA CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO_2

Definir uma metodologia de cálculo para as emissões do "poço à roda" (WTW) também é um desafio complexo e há diferentes ferramentas sendo desenvolvidas.

i) Norma Europeia EN16258

Conforme explica o *site* da European Standards, a norma EN16258 é uma metodologia para cálculo e declaração de consumo de energia e emissões de GEE dos serviços de transporte (cargas e passageiros). Ela estabelece uma metodologia comum para o cálculo e declaração de consumo de energia e emissões de GEE relacionados com qualquer serviço de transporte (de carga, passageiros ou ambos). Além disso, ela especifica princípios gerais, definições, limites do sistema, métodos de cálculo, regras de rateio (alocação) e recomendações de dados, com o objetivo de promover declarações padronizadas, precisas, críveis e verificáveis sobre consumo de energia e emissões de GEE relacionados a qualquer serviço de transporte quantificado.

ii) World Resources Institute (WRI)

Como explica o *site* do World Resources Institute, o WRI é uma organização global sem fins lucrativos que trabalha com líderes governamentais, empresariais e da sociedade civil para pesquisar, projetar e executar soluções práticas que melhorem simultaneamente a vida das pessoas e garantam que a natureza possa prosperar. O instituto tem mais de 1.400 funcionários em 12 escritórios internacionais que trabalham com parceiros em mais de 50 países para colocar o planeta em um caminho mais sustentável. O WRI tem escritórios no Brasil em São Paulo e Porto Alegre. O principal foco do WRI no Brasil são os programas ligados ao clima, às cidades e às florestas.

5. VISÃO AMPLIADA DA DESCARBONIZAÇÃO

A Calculadora Global é uma ferramenta gratuita e interativa que se destina a explorar como será um mundo de baixo carbono em 2050. Ela é um modelo de código aberto dos sistemas mundiais de energia, terra e alimentos que permite projetar sua própria versão do futuro até 2050 e ver as implicações para o clima. A calculadora mostra que é possível evitar mudanças climáticas perigosas e garantir que os padrões de vida das pessoas continuem a melhorar se agirmos agora. Essa ferramenta pode ser obtiva através do *site* http://www.globalcalculator.org/.

O Relatório da Calculadora Global está disponível em língua portuguesa e traz *insights* interessantes sobre como viabilizar um estilo de vida que permita atingir os objetivos climáticos e garantir que todos tenham bons padrões de vida até 2050. Nela, os impactos climáticos de diferentes rotas também são ilustrados, ligando-se o modelo à ciência climática mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A ferramenta da Calculadora Global mostra que há rotas diferentes para manter o aquecimento global nos limites de 2ºC (a ferramenta não trabalha com o limite de 1,5ºC, como indicado na introdução deste relatório). Ela indica a necessidade de redução de pelo menos 90% da quantidade de emissões de CO_2 até 2050. O relatório alerta para a limitação da Calculadora Global com relação aos detalhes geográficos de cada país ou região.

Através da Calculadora Global se estabelece como os setores de transporte, edificações, manufatura, geração de eletricidade, uso do solo, alimentos e bioenergia poderiam se adequar para atingir a meta de 2°C até 2050.

Em termos de estilo de vida, a Calculadora Global sugere uma média de viagens domésticas por pessoa por ano (por meio de passageiros-km por pessoa por ano), uma proporção de viagens domésticas de carro (por meio de porcentagem), uma distância média percorrida por pessoa por ano por via aérea (por meio de passageiros-km por pessoa por ano) e, finalmente, o número de carros por pessoa.

Em termos de tecnologias e combustíveis, a Calculadora Global sugere uma eficiência do automóvel médio de passageiros, indicando características para todos os tipos de propulsão, como motor de combustão interna, elétrico e hidrogênio (por meio de litros por 100 km), uma eficiência do passageiro médio por carro, mas aqui a ferramenta é limitada apenas ao motor de combustão interna (por meio de litros por 100 km), um número de carros com motor de combustão interna na estrada, um número de carros elétricos na estrada, um número de carros a hidrogênio na estrada e, finalmente, uma série de carros híbridos e *plug-in* na estrada.

É curioso perceber que sem uma mudança na forma de avaliar a influência das leis de mercado e do estilo de vida do consumidor, conforme a Calculadora Global da WRI, não atingiremos as metas de descarbonização do planeta. O Relatório de *insights* da Calculadora Global fala que o crescimento da população global e do consumo médio *per capita* levará a grandes aumentos na demanda global de energia e alerta que sob um cenário onde se mantêm os mesmos padrões de estilo de vida atuais a demanda de energia aumentaria cerca de 70% entre agora e 2050. O relatório sugere a adoção de um novo estilo de vida para evitar que o aumento da temperatura média da atmosfera ultrapasse os 2ºC até 2050 e indica quatro caminhos para se atingir esse objetivo. Os quatro caminhos indicados estão ligados a um esforço distribuído, à relutância do consumidor, a uma baixa ação nas florestas e a um ativismo de consumo. Não iremos detalhar cada um desses quatro caminhos, uma vez que eles não são escopo do presente relatório.

É possível conhecer a adaptação do método corporativo para o contexto nacional através do Programa Brasileiro GHG Protocol, desenvolvido pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas (FGVces) e pelo WRI, em parceria com Ministério do Meio Ambiente, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), World Business Council for Sustainable Development (WBSCD) e 27 empresas fundadoras. Esse programa oferece uma ferramenta de cálculo para as emissões de GEE.

iii) International Energy Agency (IEA)

Também de acordo o seu *site* da internet, a Agência Internacional de Energia (IEA) foi criada em 1974 para ajudar a coordenar uma resposta coletiva a grandes interrupções no fornecimento de petróleo. Embora a segurança do petróleo continue sendo um aspecto fundamental do trabalho da agência, a agência evoluiu e se expandiu significativamente desde sua fundação. Adotando uma abordagem de todos os combustíveis e todas as tecnologias, a IEA recomenda políticas que melhorem a confiabilidade, a acessibilidade e a sustentabilidade da energia.

O relatório Tracking Transport 2020 é referência fundamental para a análise do tema.

iv) GLEC Framework

Conforme explica seu *site*, o Smart Freight Center é uma organização internacional sem fins lucrativos com foco na redução da emissão de gases de efeito estufa no transporte de cargas. Ele tem o objetivo de orientar o setor de logística global a rastrear e reduzir suas emissões de GEE em 1 bilhão de toneladas até 2030 e atingir zero emissões até 2050 ou antes. Essa organização publica o *GLEC Framework*.

O *GLEC Framework* fornece orientações complementares para contabilizar e relatar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em todo o setor de logística para incentivar a comunicação voluntária de emissões corporativas de GEE por empresas com operações logísticas. Este documento foi desenvolvido para funcionar em conjunto com o padrão voluntário de contabilidade e relatórios corporativos do *GHG Protocol (The Corporate Standard)*, gerenciado em conjunto pelo World Resources Institute (WRI) e pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), sem que o substitua.

E. CONCEITO DO POÇO À RODA PARA VEH

Como apresentado acima, as emissões de GEE totais são aquelas que acontecem desde a produção do insumo energético para mobilidade até a efetiva transformação da energia em movimento na roda dos veículos. Dessa forma, não basta que a emissão veicular do "tanque à roda" seja satisfatória, é preciso avaliar as emissões totais. A comparação das emissões entre veículos movidos a motores a combustão e veículos movidos a motores elétricos é algo complexo, já que a fonte de energia elétrica para utilização veicular tem influência nas emissões totais de CO_2.

Ocorre que a energia disponível na rede elétrica é um conjunto complexo de fontes que proveem de diferentes centros de produção, todos interconectados entre si, todos gerando e distribuindo energia com redundância e interações constantes. Isso é necessário para garantir que não haja desabastecimento de uma região, caso seu sistema caia. Considerando que não é uma fonte energética passível de armazenagem, a eletricidade precisa ser armazenada através de outros meios a fim de que possa ser utilizada instantaneamente, à medida que haja demanda dos consumidores, e tudo isso torna o sistema ainda mais complexo.

Há diferentes maneiras de se gerar a energia elétrica. De forma geral, existem as fontes hidroelétricas, de biomassa, de carvão, eólicas, de gás, geotérmicas, nucleares, de petróleo e solar. Não se pode dizer que esta seja uma lista completa (apesar de representar a grande maioria das fontes utilizadas no mundo).

5. VISÃO AMPLIADA DA DESCARBONIZAÇÃO

A combinação de usinas de energia que compõem a rede varia significativamente para cada região e período do ano. Normalmente essa variação se dá em função da disponibilidade e custo de recursos e da política energética de cada país.

Assim, dependendo da fonte que gera a energia elétrica, a ausência de emissões gasosas nos veículos (tanque à roda) pode não significar uma melhoria significante nas emissões de GEE.

Os órgãos internacionais que se ocupam de avaliar as emissões totais dos veículos já desenvolveram mecanismos que permitem comparar os dois tipos de tecnologia, motores a combustão e motores elétricos, apesar de ainda ser grande a divergência de opiniões sobre o tema, muitas vezes esbarrando na subjetividade de certas opiniões.

O aplicativo *ectricityMap* (https://app.electricitymap.org/zone/BR-NE) oferece uma visão instantânea da intensidade de carbono usada para gerar a energia elétrica a cada hora em mais de 50 países. Os dados podem ser acessados historicamente, em tempo real ou como previsão para as próximas 24 horas. A figura abaixo mostra a foto do Brasil no momento da redação deste texto. Através da coloração da legenda pode-se notar que a as fontes de energia do território brasileiro proveem de fontes mais renováveis do que muitos outros países (quanto mais escuro a tonalidade do verde, mais renovável é a fonte da energia elétrica).

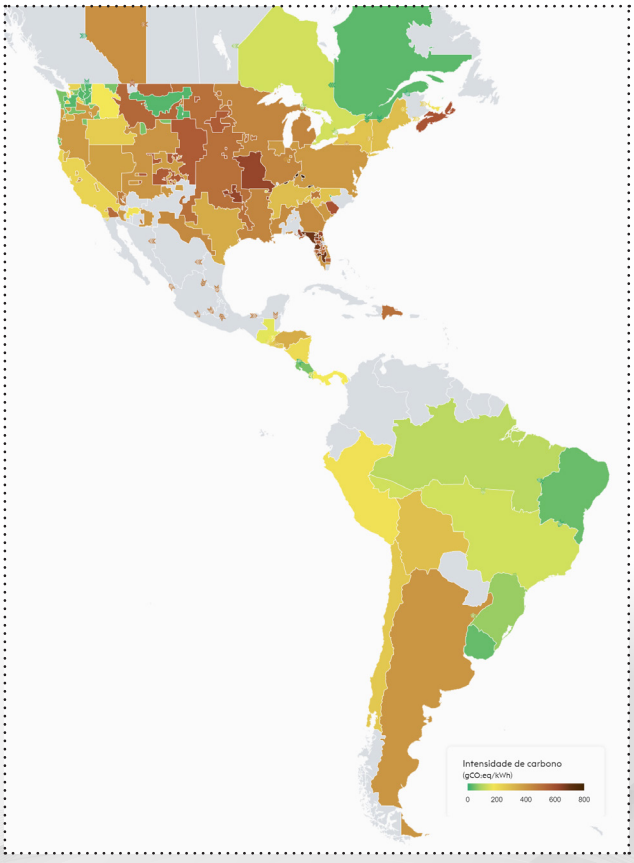


Figura 48. Intensidade das emissões de carbono de acordo com a fonte de energia elétrica

Fonte: https://app.electricitymap.org/map

5. VISÃO AMPLIADA DA DESCARBONIZAÇÃO

Outro aspecto que torna importante o debate sobre a eletrificação da mobilidade é a insegurança sobre como o aumento do uso da energia elétrica pode interferir na disponibilidade de energia elétrica para finalidades básicas, tais como o uso residencial, comercial, industrial, hospitalar e de serviços, entre outros.

Apesar da complexidade do debate quanto à efetividade da energia elétrica como forma de redução da emissão de CO_2, o desenvolvimento das tecnologias que estão viabilizando a utilização em massa de veículos elétricos tem definido uma corrida para a descarbonização sem precedente, até como forma de intensificar os investimentos nas formas tradicionais de motorização que não querem perder o mercado que possuíam.

Notas importantes

I. A cadeia produtiva é uma complexa rede de fornecedores e clientes, cada um atuando de forma limitada à relação comercial biunívoca entre duas empresas. Ocorre que o efeito para o meio ambiente é uma consequência da rede e não da relação biunívoca entre fornecedor e cliente. Cabe ao poder público compreender seu papel como mediador e líder, garantindo que todas as relações da rede se consolidem de forma a não agredir as condições ambientais presentes na atmosfera do planeta;

II. A análise do "poço à roda" ou do "campo à roda" ou da "usina elétrica à roda" é fundamental. É preciso desenvolver uma ferramenta de cálculo das emissões totais desse ciclo com foco na matriz energética brasileira, de forma mais específica. Esse processo de definição da ferramenta de cálculo precisa estar na pauta do poder público;

III. É fundamental que seja definida uma normalização brasileira para a avaliação do ciclo de vida do produto, para que os projetos sejam concebidos visando ao reaproveitamento dos seus componentes;

IV. Somente um programa de renovação de frota vai agilizar a redução das emissões de poluentes locais e globais no Brasil;

V. É fundamental garantir que o processo de eletrificação da mobilidade no Brasil não aconteça a partir de uma matriz energética não renovável, abrangendo a geração, transmissão e distribuição da energia.

VI. É preciso viabilizar a infraestrutura de distribuição para se permitir a eletrificação da mobilidade nas grandes cidades brasileiras.

6. A ELETRICIDADE E SUA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL

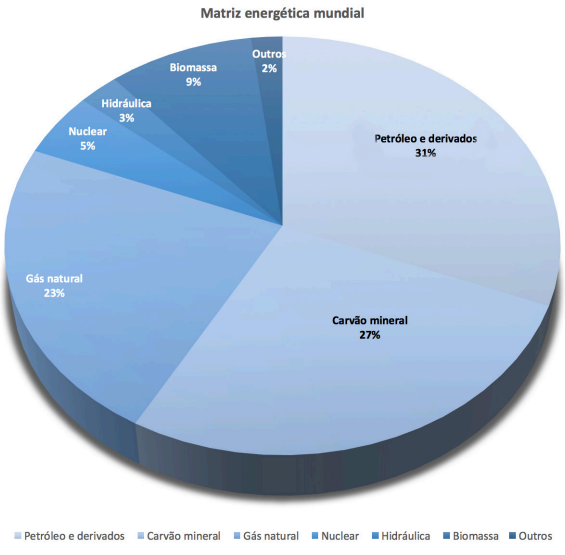
A. A MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA MUNDIAL E BRASILEIRA

A matriz energética e elétrica mundial e brasileira diferem bastante em suas potencialidades.. Principalmente na quantidade de energias renováveis que são utilizadas para garantir o crescimento e o desenvolvimento econômico. Contudo, é importante conhecer a diferença conceitual entre matriz energética e matriz elétrica, como segue:

Matriz energética: é toda fonte de energia disponível em um país. Essa fonte pode ser renovável ou não renovável.

Matriz elétrica: são todas as fontes de energia renováveis ou não renováveis utilizadas unicamente para geração de energia elétrica.

A matriz energética mundial e a brasileira são muitos diferentes, seja na porcentagem do uso das fontes de energia, seja na porcentagem total de energias renováveis e não renováveis utilizadas. Nas figuras 49 e 50, é possível observar a matriz energética mundial e brasileira, respectivamente.



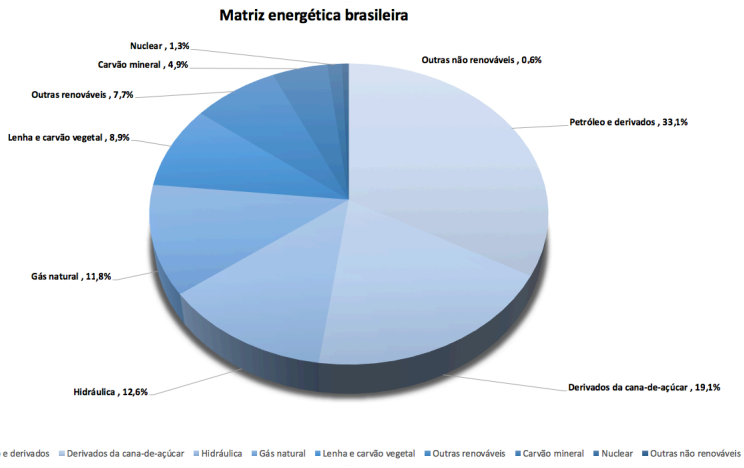


Figura 49. Matriz energética mundial / Fonte: IEA, 2021.

Figura 50. Matriz energética brasileira / Fonte: EPE, 2021.

MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL X BRASILEIRA

Fontes	Renováveis	Não renováveis
Brasil	48,3%	51,7%
Mundo	14%	86%

Tabela 3. Matriz energética mundial x brasileira

6. A ELETRICIDADE E SUA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL

Notas importantes

I. O Brasil tem uma matriz energética 347,5% mais renovável que a do resto do mundo. Isso traz oportunidade comparativa em relação aos outros países, já que uma empresa que produz no Brasil já tem uma pegada de carbono menor do que se produzir em outros países;

II. Desta forma, os tomadores de decisões precisam não só manter, mas também expandir a porcentagem de energias renováveis na matriz energética nacional;

III. É preciso reverter a tendência dos últimos anos, onde o aumento do uso de carvão na matriz energética brasileira não segue as tendências mundiais de descarbonização;

IV. Apesar das hidrelétricas gerarem energia renovável, não é recomendado a expansão desta fonte de eletricidade, dada a importância da preservação da fauna, da flora e das comunidades rurais. O impacto que os grandes reservatórios de água podem gerar para o clima é mais um motivo para evitar este tipo de solução para o futuro;

V. O uso de biomassa com fonte energética é fortemente recomendado. No Nordeste brasileiro, o agave tem surgido como uma fonte complementar à cana-de-açúcar (este tema será detalhado mais a frente);

VI. A previsão de crescimento do PIB e o aumento de fontes intermitentes de energia (eólica e solar) no Sistema Interligado Nacional vai pressionar a contratação de geradoras constantes como as termoelétricas. Atualmente, tem-se optado pelo gás natural. Contudo, o grande potencial brasileiro em biomassa deve ser incentivado por se tratar de uma fonte de energia renovável.

B) MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO

Assim como a matriz energética, a matriz elétrica brasileira tem uma grande participação de energias renováveis. como pode se observar nas figuras 51 e 52 respectivamente..

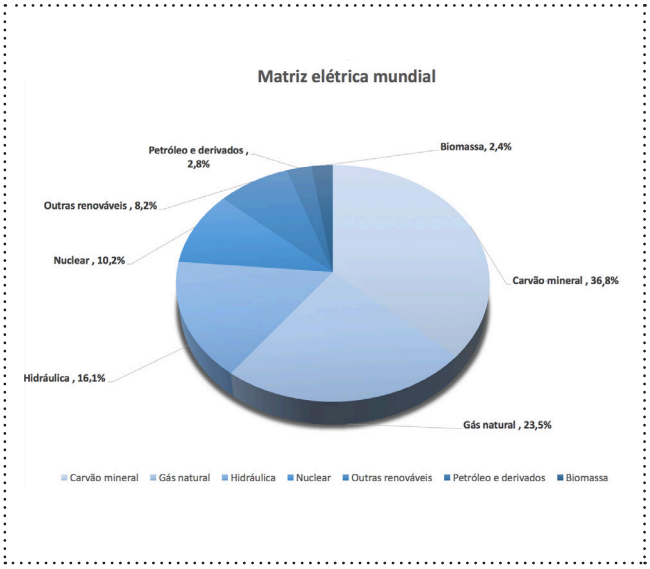


Figura 51. Matriz elétrica mundial

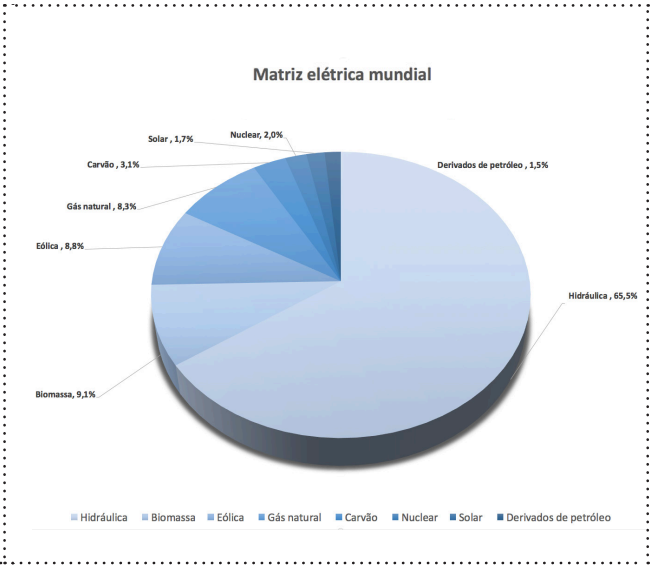


Figura 52. Matriz elétrica brasileira

Como se pode ver na tabela 4, a matriz elétrica brasileira é 318,7% mais renovável que a média mundial.

MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL

Fontes	Renováveis	Não renováveis
Brasil	85,1%	14,9%
Mundo	26,7%	73,3%

Tabela 4. Matriz elétrica nacional vs. mundial

Fonte: EPE, 2021; IEA, 2021.

Em seguida, é possível observar as emissões de gases de efeito estufa em tCO_2/MWh gerado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). Para tanto, o Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI), a partir do Conselho Executivo (CE) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), publica os fatores de emissões da margem da construção e da margem da operação.

Segundo o (MCTI, 2021), o fator da margem da construção "são as recentes adições de capacidade ao sistema, calculadas com base em 20% do total anual (em MWh) da geração realizada pelas mais novas usinas, ou com base na geração anual total das cinco usinas mais recentes".

Na figura 53, podem ser vistas as emissões da margem da construção da matriz elétrica brasileira do período de 2006 a 2020.

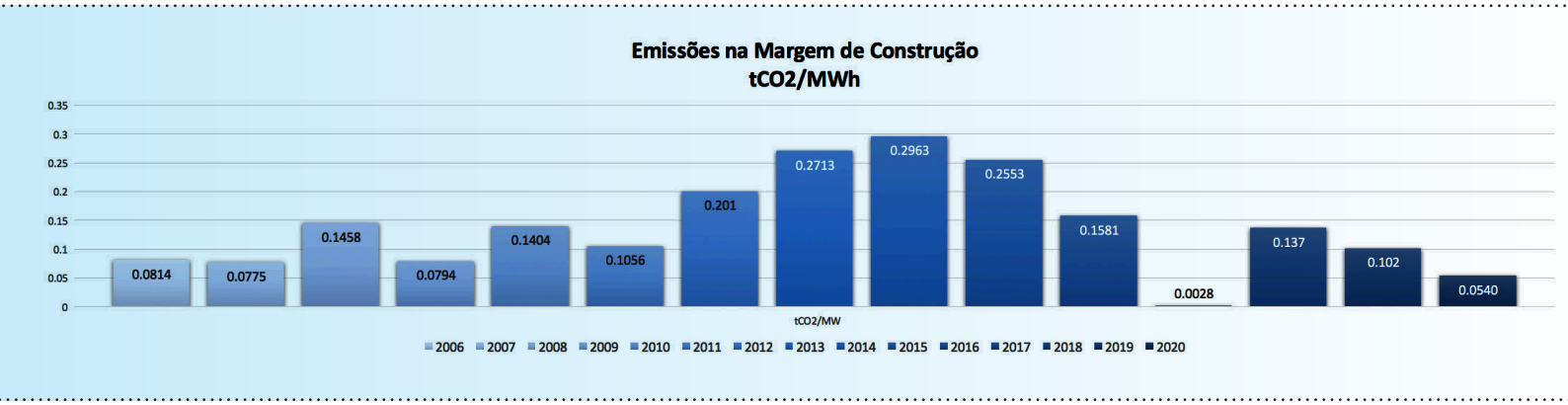


Figura 53. Fator de emissões na margem de construção

Fonte: elaboração própria a partir de Brasil, 2021.

As emissões da margem da construção tiveram uma tendência de crescimento a partir de contratações crescente de usinas com fontes não renováveis, como nos anos 2012, 2013 e 2014. A partir de 2015, com o agravamento econômico, houve uma tendência de queda.

Como já mencionando anteriormente, há no Brasil uma pressão social que dificulta a construção de novas geradoras hidrelétricas. Somam-se a isto secas cada vez mais comuns que têm forçado os governos a contratar termelétricas a partir de fontes não renováveis para garantir o fornecimento de energia.

Dessa forma, se houver uma tendência de crescimento do PIB, e com isso o crescimentoo de consumo de energia, os valores dos fatores da margem da construção de 2014 podem mudar. Para que isso não aconteça, a geração do SIN precisa optar por fontes de energias renováveis como as térmicas a biomassa, PCH, maremotriz e wbiogás dentre outras.

Já na figura 54 é possível observar a variação do fator de emissão na margem da operação (tCO_2/MWh) no SIN do período histórico de 2006-2020.

Segundo o MCTI (Brasil, 2021), "As emissões médias da margem de operação são as fontes que atendem ao sistema, excluindo as gerações renováveis."

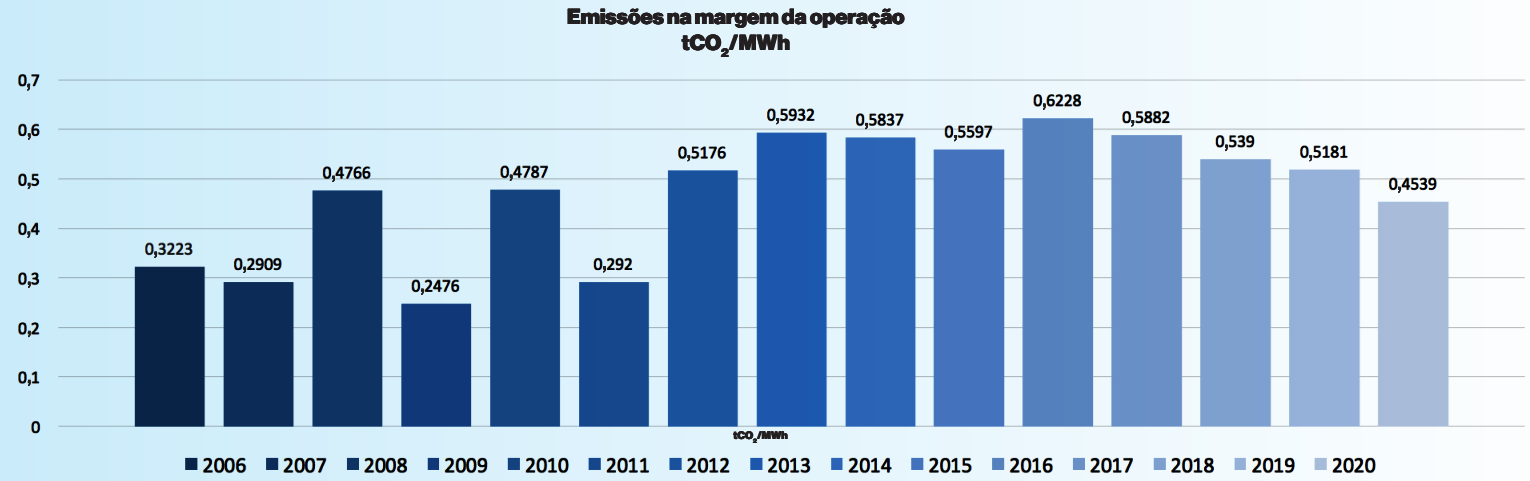


Figura 54. Fator de emissões na margem da operação

Fonte: elaboração própria a partir de Brasil, 2021.

Pode-se notar que a margem de operação tem uma tendência de estagnação de emissões de GGE proveniente do SIN. Em 2009, teve o mais baixo valor, porém um ano depois quase dobrou de emissão. É fato notório que essa tendência se mantém estável, porém alta se levarmos em consideração os anos de 2006, 2007 e 2009. Ou seja, nossa matriz elétrica dobrou sua emissão por MWh gerada e nunca mais conseguiu diminuir.

C. AS CARACTERÍSTICAS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

As fontes renováveis ou não renováveis de energia precisam chegar às casas, às empresas, ao comércio e vêm se adaptando para a eletromobilidade que já é uma realidade no Brasil. Dessa forma, é necessário a construção de redes de distribuição.

Os elétrons, ao deixar as usinas geradoras, são transportados por cabos aéreos. As grandes transmissoras de energia são responsáveis por administrar as linhas de alta voltagem, assim como as distribuidoras de energia encarregadas de diminuir a tensão para que sejam consumidos em sua área de concessão.

6. A ELETRICIDADE E SUA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL

Em abril de 2022, o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) atingiu 173.509 km de linhas de transmissão em operação (inclui rede básica, conexões de usinas, interligações internacionais e 190 km no sistema isolado de Roraima). Desse total, 47,2% correspondem às classes de tensão entre 230 kV até 440 kV e 52,8% correspondem às classes de tensão entre 500 kV e 800 kV, conforme a tabela 5 (Brasil, 2022).

Classe de Tensão (kV)	Linhas de transmissão instaladas (km)	Total (%)
230	64.593	37,2%
345	10.359	6,0%
440	6.859	4,0%
500	66.996	38,6%
600 (CC)	12.816	7,4%
750	2.683	1,5%
800 (CC)	9.204	5,3%
TOTAL	**173.509**	**100%**

Tabela 5. Linhas de transmissão de energia elétrica brasileiras

Fonte: Brasil, 2022.

Classe de Tensão (kV)	Linhas de transmissão instaladas (km)	Total (%)
230	111.933	26,6%
345	54.220	12,9%
440	30.892	7,4%
500	198.226	47,2%
750	24.897	5,9%
TOTAL	**420.168**	**100%**

Tabela 6. Subestações de energia elétrica brasileiras

Fonte: Brasil, 2022.

Ainda segundo o Ministério de Minas e Energia Brasil, 2022, há previsto para 2024 a operação de mais 16.997 km de linhas de transmissão conforme se pode ver na tabela 7, ou seja, um aumento de quase 10%

Classe de Tensão (kv)	Previsão 2022 (km)	Previsão 2023 (km)	Previsão 2024 (km)
230	1.806,9	3.097,2	299,1
345	522,2	207,0	237,5
440	37,0	61,0	0,0
500	4.130,0	3.071,0	3.228,0
TOTAL	**173.509**	**6.436,1**	**3.764,6**

Tabela 7. Previsão de expansão de novas linhas de transmissão – Fonte: Brasil, 2022.

6. A ELETRICIDADE E SUA GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL

Já do ponto de vista do desempenho da transmissão brasileira, tem-se um sistema com índices elevados, com uma média de 96,61% de robustez do sistema (para interrupções e cortes de energias) e uma disponibilidade operacional de 99,93%. Isso porque o Brasil tem um dos maiores sistemas interligados do mundo, em que a geração e o despacho da energia elétrica podem garantir o suprimento entre os subsistemas como se pode ver na figura 55.

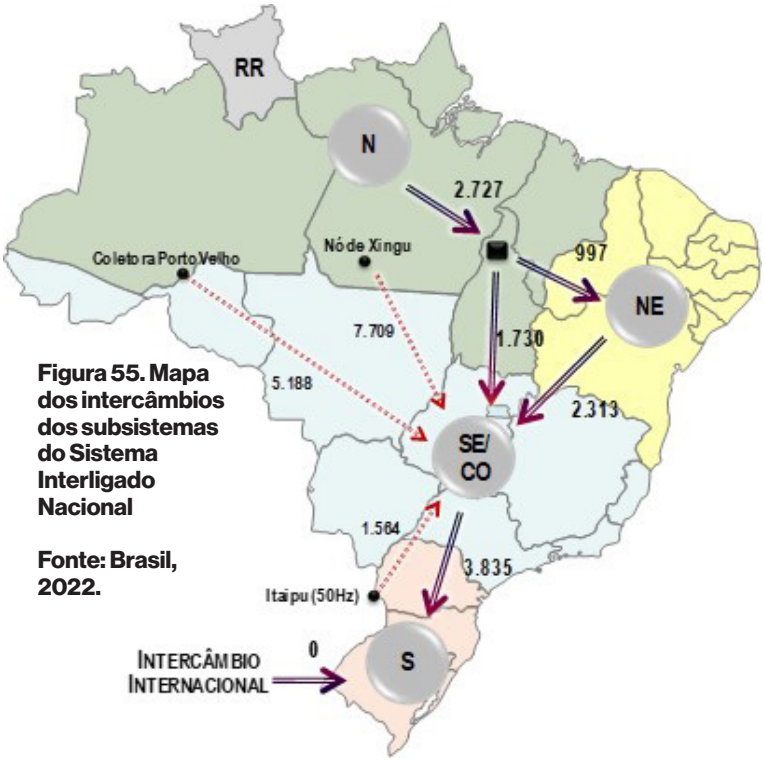


Figura 55. Mapa dos intercâmbios dos subsistemas do Sistema Interligado Nacional

Fonte: Brasil, 2022.

Na figura 56, é possível observar a evolução da transmissão brasileira de 1960 até 2018 e como será para o ano de 2027.

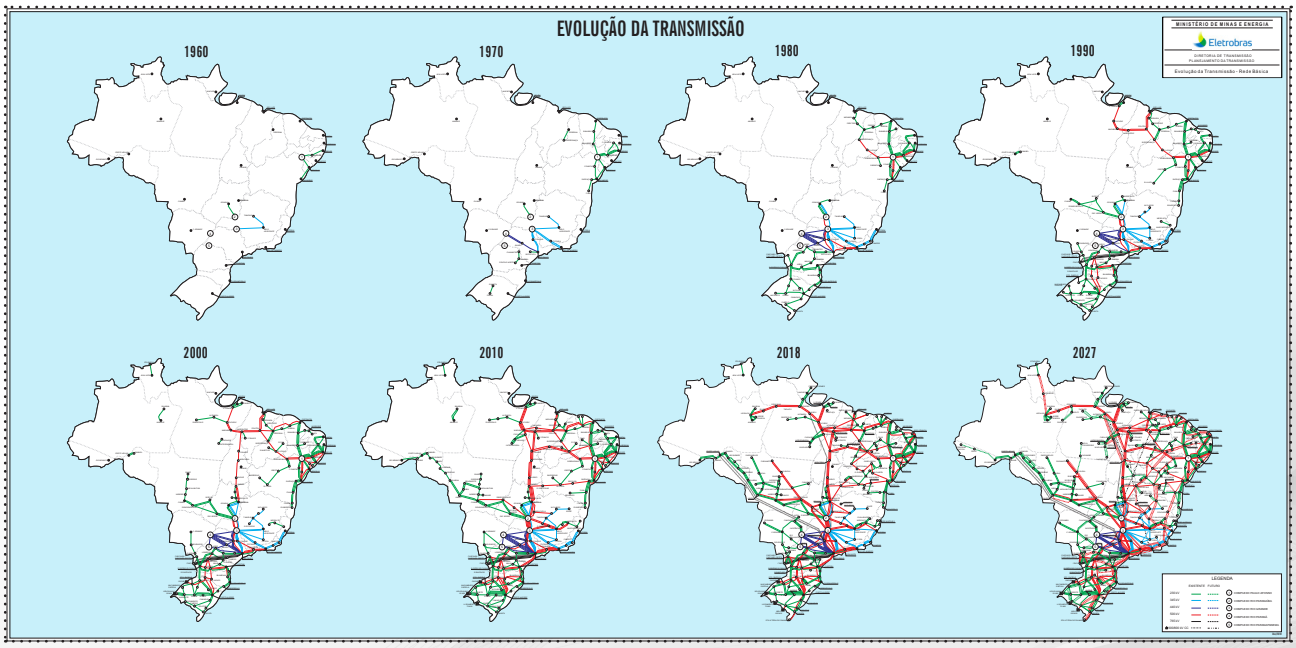


Figura 56. Evolução da transmissão brasileira de 1960 até 2027.

Fonte: Eletrobras, 2022.

D. OS RISCOS DO USO DE FONTES NÃO RENOVÁVEIS PARA A ELETRIFICAÇÃO DOS TRANSPORTES NO BRASIL

O exemplo mais contundente em direção a eletromobilidade veio do Parlamento Europeu que aprovou, em junho de 2022, o fim dos veículos com combustão interna até 2035, com o objetivo de incentivar a produção dos veículos híbridos e caminhar em direção a uma rápida transição para a adoção de veículos unicamente elétricos. A lei ainda precisará passar por certos tramites, especialmente, a aprovação pelo Conselho da União Européia que reúne os 27 países membros. De todo o modo, se aprovada, a comercialização de veículos a gasolina ou Diesel será proibida em menos de 15 anos. Trata-se, indubitavelmente, de um avanço significativo para os futuros modais de transportes (Valor Econômico, 2022). Por outro lado, os EUA retomaram a agenda ambiental para recuperação econômica pós-pandemia, a partir da transição energética em vários setores.

O setor de transporte tem sido entendido como chave nesse processo, vez que possui um grande potencial para a criação de novos empregos e recuperação da renda no país. O "Plano de Energia Norte-Americano" - o documento que consolida o programa de planejamento da eletromobilidade –, versa sobre a instalação de 500.000 estações de recarga até 2030. Para além disso, o governo Biden pretende interromper novas perfurações de petróleo e gás em terras federais e o fim de subsídios a combustíveis fósseis. O objetivo americano é vender 25 milhões de carros e pick-up elétricos até 2030 (Grangeia et al., 2021).

Portanto, o que se vê neste contexto, tanto americano como europeu, é a importância fundamental das mudanças na estrutura regulatória e o investimento em infraestrutura como impulsionadores e aceleradores da disponibilidade de veículos elétricos, como nos ensina Grangeia et al. (2021). O caso brasileiro é peculiar e diferente do resto do mundo, porque a matriz energética nacional já tem bastante consolidado o uso do etanol que pode ajudar a descarbonizar a mobilidade de veículos leves, além do uso do biodiesel que pode ajudar os veículos e transportes pesados.

Atualmente, tramita no Senado Federal, projeto de lei PLS 304/2017 que proíbe a comercialização de veículos automotores novos movidos a gasolina e a diesel a partir de 2030, e, em 2040, a proibição da própria circulação desses veículos. Ainda segundo o projeto de lei, motores a etanol e biodiesel poderão seguir em produção, ao lado de opções elétricas. Ou seja, em menos de dez anos, caso este projeto seja aprovado, haverá uma revolução na fabricação de veículos movidos exclusivamente a etanol e biodiesel no país (Senado Federal, 2017). Neste cenário, é necessário que os(as) tomadores(as) de decisão se comprometam a incentivar as potencialidades energéticas da agricultura brasileira e assim criar emprego e renda no país. No caso da eletromobilidade, é necessário também criar medidas regulatórias para que eletropostos no país ofereçam as fontes de energias renováveis evitando o uso de fontes não renováveis para a geração de energia eletrica.

7. SECTOR COUPLING

A. CONCEITO

Não há um consenso para a definição do conceito conhecido como "*sector coupling*". Porém a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) entende que o termo pode ser definido como o processo de interconexão do setor de geração de energia com o setor de energia e consumo (por exemplo, calor, gás, mobilidade). Através desta interconexão, os excedentes e rejeitos energéticos de um setor econômico são insumos de outro setor econômico.

O "*sector coupling*" foi originalmente desenvolvido na Alemanha, onde foi observado que o setor elétrico vem sendo rapidamente descarbonizado, porém outros setores, como indústria, transporte e edifícios, têm maiores dificuldades de transição para uma energia com menor intensidade de carbono.

O *sector coupling* visa substituir o uso de combustíveis fósseis nesses setores com maiores dificuldades, utilizando a eletricidade descarbonizada e armazenamento com gás (metano e hidrogênio, por exemplo).

De forma resumida, o *sector coupling* envolve (Erbach, 2019):

- A eletrificação do transporte, indústria e residências através da rede elétrica;
- Produção de gases como hidrogênio (H_2) e metano (CH_4) a partir de energias renováveis;
- Armazenamento de energia em hidrelétricas, baterias e na forma de gases (H_2 e CH_4);
- Abastecimento de setores de uso final com gases renováveis, como o hidrogênio verde;
- Geração de eletricidade a partir de hidrogênio por meio de células a combustíveis e de gás a partir de usinas termelétricas.

Dentro dessas discussões, o hidrogênio tem sido o gás com maior potencial de descarbonizar todos os setores econômicos. Sendo assim, o H_2 é visto como um integrador entre o setor de geração elétrica e outras aplicações industriais, além de poder ser utilizado como vetor energético e químico. Esse conceito é conhecido como *Power-to-X* (Câmara de Indústria... et al., 2021).

De forma resumida, *Power-to-X* são processos que envolvem a conversão de energia elétrica renováveis em fontes de energia química e que podem ser utilizados para armazenar energia, combustíveis sintéticos (*e-fuel*), hidrogênio para veículos elétricos com célula a combustíveis e servem como insumo para a indústria química.

Na figura 57, é possível observar um exemplo de *sector coupling* (Siemens, 2022).

7. SECTOR COUPLING

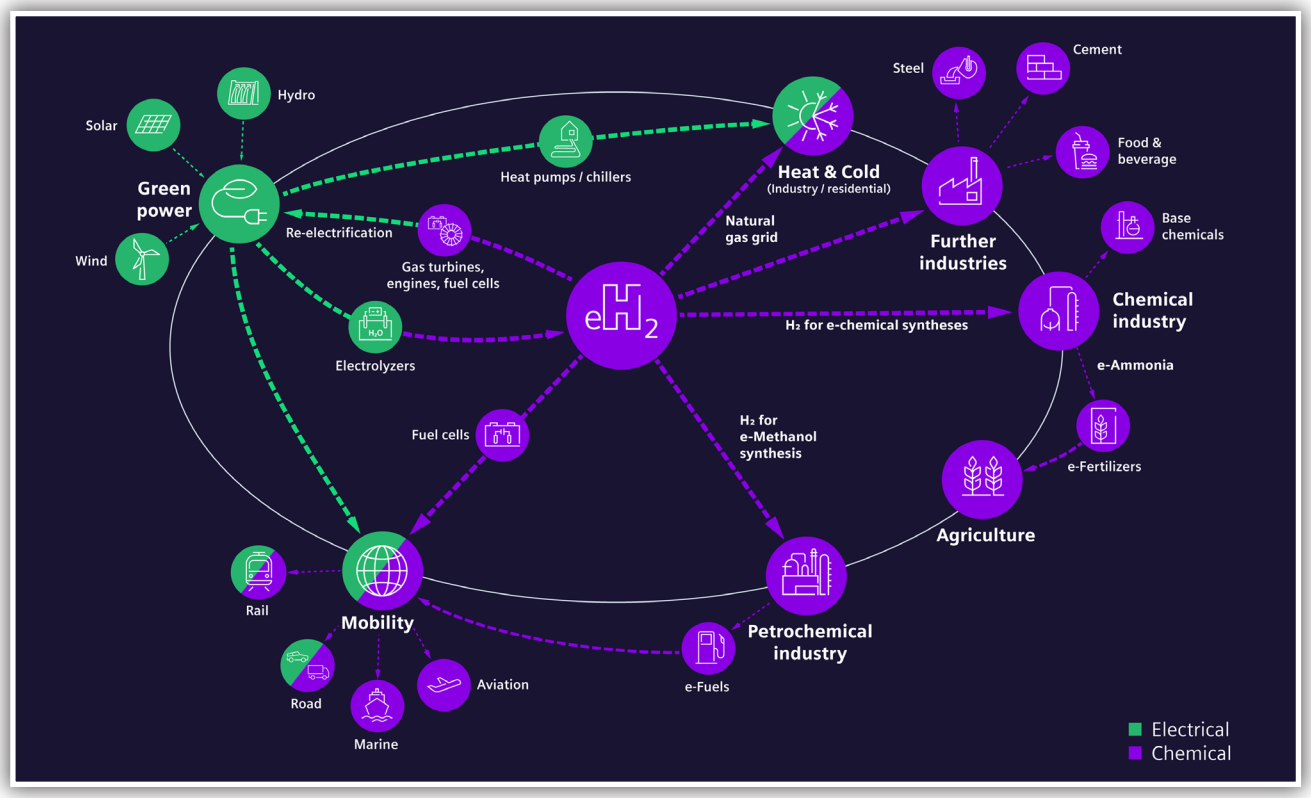


Figura 57. *Sector coupling* **e os vários setores que se beneficiam com a descarbonização a partir do hidrogênio verde**

Fonte: Siemens, 2022.

Notas importantes

I. Quando se refere ao uso de energias renováveis para produção de H_2 verde, se prevê a energia elétrica excedente gerada aproveitada para produção do H_2: *Power*;

II. Como o hidrogênio já é utilizado em diversos setores, por isso utiliza a incógnita: *X*;

III. *Power-to-X* pode ser dividido em (Siemens, 2022):

a. Mobilidade: *Power-to-X* produz combustíveis sintéticos como e-metano, e-metanol, e-diesel, e-gasolina ou *e-jet* que podem ser misturados gradualmente com combustíveis fósseis convencionais até que sejam substituídos totalmente da matriz energética. A infraestrutura existente, como gasodutos, postos de combustíveis ou das atuais instalações de armazenamento podem ser utilizadas a partir dos *e-fuels*;

b. Geração de energia: as modernas turbinas a gás podem ser operadas com uma mistura de hidrogênio e gás natural, com uma participação de hidrogênio de 5% a 100%. O hidrogênio pode ser armazenado, transportado em redes de gás e "reeletrificado" em turbinas a gás, ciclos combinados ou usinas de células a combustível;

c. Indústria: suprir a demanda de calor. H_2 permite também a produção de metal sem CO_2, assim como matéria-prima para produção de amônia e outros produtos.

7. SECTOR COUPLING

B. *SECTOR COUPLING* NA EUROPA

Como descrito anteriormente, este conceito começou exatamente na Europa. As características energéticas do continente e sua instabilidade política recente têm forçado a União Europeia (UE) a acelerar sua segurança energética e cada vez mais diminuir sua dependência do gás natural russo. Dessa forma, o sector coupling ajuda na eficiência do uso energético diminuindo perdas e aproveitando todas as suas potencialidades.

Para além da segurança energética, transição de fontes de energias mais renováveis, também facilitará a descarbonização do sistema energético e deve permitir que a UE cumpra o seu compromisso do Acordo de Paris, de contribuir para o esforço internacional para manter o aumento da temperatura global bem abaixo de 2°C.

Segundo a Bloomberg (2020), o *sector coupling* permitirá que os países da Europa tenham progressos substanciais, podendo ser tornar o primeiro continente neutro em carbono. Em 2050, o *mix* de geração em um país como o Reino Unido ou a Alemanha mudará quase totalmente para tecnologias de baixo carbono, e o *sector coupling* poderá reduzir as emissões em 60% de 2020 para 2050 nos setores eletrificados como transportes, edifícios e industriais. Isso equivaleria a uma redução de 71% em relação aos níveis de 1990. Em particular, até 2030, poderão reduzir as emissões para 63% abaixo dos níveis de 1990 (23% maior que as metas da UE). Até 2050, essa redução se estenderá a 83% abaixo dos níveis de 1990, conforme pode-se ver na figura 58.

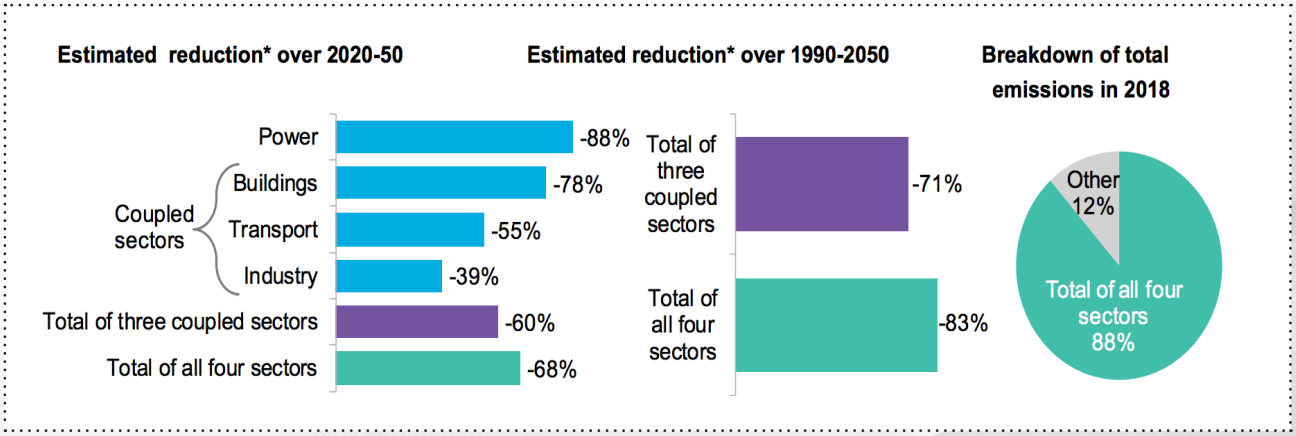


Figura 58. Emissões de gases de efeito estufa com o *sector coupling*

Fonte: Bloomberg, 2020.

7. SECTOR COUPLING

No estudo da Bloomberg (2020), ainda se recomenda que transportes marítimos, transportes rodoviários de longas distâncias e processos industriais de alta temperatura precisarão de soluções de hidrogênio azul com CCUS (*carbon, capture, use and storage*) e reforma de biocombustíveis (nesse caso precisa contabilizar o uso da terra para os impactos de GEE).

Outra questão de extrema relevância é que o aumento do *sector coupling* vai requisitar um setor elétrico muito maior que o atual. Caso a UE de fato invista na eletrificação dos setores, precisará prever uma demanda elétrica de quase o dobro caso não haja o *sector coupling*. O crescimento da demanda elétrica na UE tem sido em média de 1,4%/ano, e essa necessidade adicional requererá cerca de 75% mais capacidade de geração, com quase o dobro da quantidade de geração de energia eólica e solar, sendo necessário uma grande capacidade de armazenamento em bateria (Bloomberg, 2020). Na figura 59, é possível observar o crescimento por setor por ano até 2050.

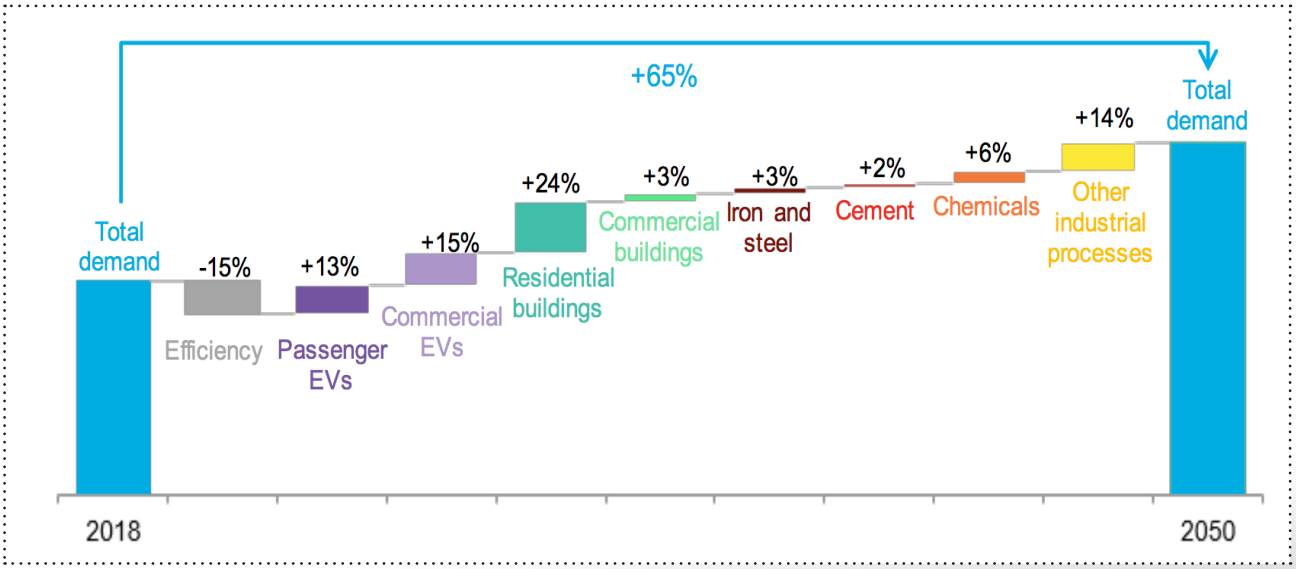


Figura 59. Crescimento da demanda elétrica por setor com o *sector coupling*

Fonte: Bloomberg, 2020.

C. POTENCIAIS DO SECTOR COUPLING NO BRASIL

O Brasil tem uma grande oportunidade de liderar a transição para o *sector coupling* no mundo. Isso porque nosso País tem o maior potencial de energias renováveis. Potencial hidráulico, solar, eólico e de biomassa são alguns exemplos do *pool* de fontes para produção de um hidrogênio com baixa intensidade de carbono.

Há no País atualmente a criação de três *hubs* de produção H_2. O mais avançado com contratos assinados é o *hub* do porto do Pecém, no Ceará. Há também os projetos no porto do Suape, em Pernambucano, e no Rio Grande do Sul e em Minas Gerais.

Não há estudos no Brasil sobre *sector coupling*, porém é possível levantar alguns pontos importantes para uma futura experiência brasileira:

I. Nossa matriz elétrica, quase 400% mais renovável que a do restante do mundo, nos garante uma *expertise* e uma diminuição de custo de produção que pode nos projetar como o maior *player* em potencial de H_2V do mundo;

II. É necessária uma regulação sobre como classificar o H_2V brasileiro;

III. Nosso sistema elétrico interligado pode garantir uma maior adaptabilidade para eletrificar todos os setores produtivos;

Nossa capacidade de produzir H_2V de forma descentralizada no Brasil pode garantir um maior benefício sustentável e diminuir custos de transportes

8. NORDESTE BRASILEIRO
Fonte energética para uma mobilidade sustentável no Brasil

Estamos entrando em um novo ciclo de crescimento do Nordeste, que será um dos mais amplos e sustentáveis em toda a história do Brasil. Como veremos a seguir, o Nordeste pode fornecer energia com base solar e eólica para o Brasil e para o mundo de forma economicamente competitiva, gerando emprego e renda para todos os estados da região.

A região Nordeste do Brasil é conhecida pelas suas belas praias e paisagens paradisíacas. Somado ao seu grande potencial turístico, o Nordeste tem características naturais que o faz um grande polo de energias renováveis. Além do potencial eólico e solar, mais recentemente tem se estudado os potenciais de biomassa, dentre elas o agave.

Dados importantes do Nordeste:

I. Área total 1.554.291 km^2;

II. Região com maior número de estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e a Bahia;

III. População de quase 57 milhões de pessoas;

IV. Segundo maior colégio eleitoral do país;

V. O menor IDH;

VI. E o terceiro maior PIB.

A. AS VOCAÇÕES DO NORDESTE BRASILEIRO

O Nordeste brasileiro tem um potencial de energia eólico e solar que já é amplamente divulgado.

As médias de ventos em seu litoral variam entre 27 km/h a 32,4 km/h (a 50 metros de altura), o que já corresponde à metade da energia elétrica gerada na região. A sua produção é toda *onshore* e mais recentemente será investido em plantas *offshore*. A energia solar é outro grande potencial nordestino que tem irradiações que variam entre 5,0 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ a 5,6 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$, sendo a quarta fonte de energia elétrica da região, com mais de 3 GWh de produção anual, como se pode ver na figura 60.

Notas importantes

I. Do ponto de vista elétrico, o Nordeste brasileiro é 84% renovável;

II. A energia hidráulica e eólica são complementares na região Nordeste. No inverno chove muito pouco, em compensação, são os períodos com ventos mais constantes e com maiores velocidade na região. Tem a possibilidade de armazenamento de energia potencial da água;

III. A energia solar fotovoltaica tem um grande potencial de crescimento na região. Com os módulos solares bifaciais entrando no mercado nacional, pode-se prever um aumento mais constante para a região, porque essa tecnologia tem menos perdas de potência com o aumento da temperatura.[9]

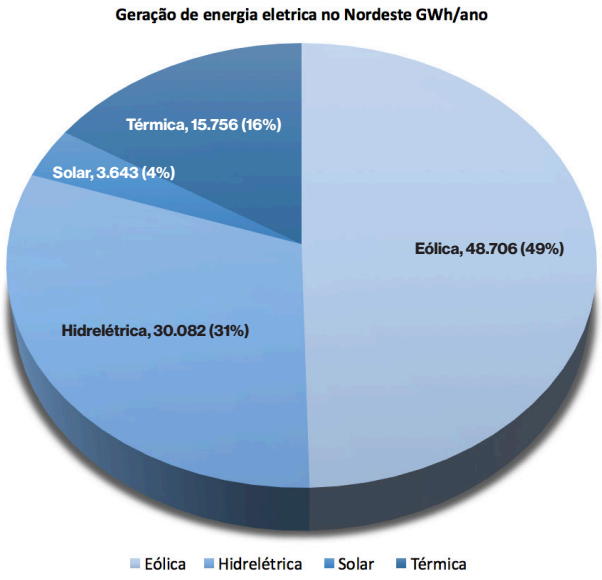


Figura 60. Geração de energia elétrica no Nordeste

Fonte: ONS, 2022.

Para além do potencial de geração de energias renováveis, o Nordeste também tem um potencial enorme de utilizar a biomassa que ajuda na renovabilidade da matriz energética. O aproveitamento da biomassa nessa região pode ser tanto de fontes cultiváveis (cana-de-açúcar, eucalipto, soja e mais recentemente os estudos energéticos a partir do agave), como também de fontes nativas (como as florestas do bioma local).

Na tabela 8 tem um resumo do estudo realizado por onde pode-se ver o tipo de biomassa, o seu potencial energético e os estados do Nordeste com a produção (Lima Júnior et al., 2014).

[9]A tecnologia fotovoltaica tem perda de tensão com o aumento da temperatura, diminuindo, assim, a potência do módulo. Contudo, os módulos bifaciais são menos suscetíveis às variações de temperatura.

POTENCIAL ENERGÉTICO DAS BIOMASSAS NO NORDESTE.

BIOMASSA	POTENCIAL ENERGÉTICO	ESTADOS
Lenha da caatinga	3.881 kcal.kg^{-1}	AL, BA, CE, MA, PE, PI, RN e SE
Casca de arroz	3.384 kcal.kg^{-1}	BA, CE, MA, PE, PI, RN e SE
Resíduos da silvicultura	3.100 kcal.kg^{-1}	BA CE MA PE PI RN SE
Esterco (ave, caprino, suíno, bovino) (biogás)	1,67 kWh.m^{-3}	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN e SE
Biomassa de RSU	2.431 kcal.kg^{-1}	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN e SE
Bagaço da cana-de-açúcar	2.130 kcal.kg^{-1}	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN e SE
Etanol	6.300 kcal.kg^{-1}	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN e SE
Vinhaça	5.500 kcal.m^{-3}	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN e SE
Óleo de girassol	9.000 kcal.kg^{-1}	BA, CE e RN
Resíduos do girassol (casca e tortas)	4.000 kcal.kg^{-1}	BA, CE e RN
Óleo de mamona *in natura*	9.434,4 kcal.kg^{-1}	BA, CE, PE e PI
Torta da mamona	4.500 kcal.kg^{-1}	BA, CE, PE e PI

Tabela 8. Potencial energético das biomassas no Nordeste.

Adaptado de: (Lima Júnior et al., 2014.)

Como mencionado anteriormente, o fisiologista molecular e mestre Fabio Trigo Raya tem liderado os estudos de potencial e uso de agave no semiárido nordestino. Segundo o pesquisador, "a área agricultável com potencial de receber a cultura do agave é de 83 milhões de hectares". Além disso, "o agave pode ajudar o mundo na produção de etanol, cuja tendência de crescimento demandará cerca de 140 bilhões de litros deste combustível, [que] a cana-de-açúcar não conseguirá suprir devido a *commodity* [do] açúcar".

Uma grande vantagem de fazer políticas públicas para produtos agrícolas no Nordeste é que em sua maioria são pequenas propriedades rurais, o que ajuda no crescimento e no desenvolvimento do comércio local, levando emprego e renda para a região com o menor IDH do País.

B. OS POLOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NO NORDESTE

A lei 125/2007 instituiu a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) que estabeleceu o Plano Regional do Desenvolvimento do Nordeste (PRDNE). O PRDNE apresenta uma agenda de desenvolvimento dos próximos 12 anos cujo objetivo principal é exatamente a redução da desigualdade regional.

Vale comentar que o objetivo desse desenvolvimento é a sustentabilidade com foco na ciência, na tecnologia e na inovação. Dentro desse contexto, foi criado o grupo conhecido como G52, que são os 52 municípios-polo que integram a rede de cidades intermediárias criada pela Sudene para viabilizar a interiorização de ações de desenvolvimento regional. Os municípios que integram o grupo representam 6,5% do Produto Interno Bruto nacional e 46% do PIB do Nordeste. Cerca de 20 milhões de pessoas (34,5% da população nordestina) vivem nessas localidades (Brasil, 2019).

Os municípios-polo que integram o G52 são:

- Alagoas: Arapiraca e Maceió;
- Bahia: Barreiras, Feira de Santana, Guanambi, Ilhéus, Irecê, Itabuna, Juazeiro, Paulo Afonso, Salvador, Santo Antônio de Jesus e Vitória da Conquista;
- Ceará: Crateús, Fortaleza, Iguatu, Juazeiro do Norte, Quixadá e Sobral;
- Maranhão: Bacabal, Balsas, Caxias, Imperatriz, Presidente Dutra, Santa Inês e São Luís;
- Paraíba: Cajazeiras, Campina Grande, João Pessoa, Patos e Sousa;
- Pernambuco: Caruaru, Petrolina, Serra Talhada e Recife;
- Piauí: Bom Jesus, Corrente, Floriano, Parnaíba, Picos, São Raimundo Nonato e Teresina;
- Rio Grande do Norte: Caicó, Mossoró e Natal;
- Sergipe: Aracaju e Itabaiana;
- Espírito Santo: Colatina e São Mateus;
- Minas Gerais: Governador Valadares, Montes Claros e Teófilo Otoni.[10]

[10] Os estados de Espírito Santo e Minas Gerais pertencem à região Sudeste.

C. LINHAS DE AÇÃO PÚBLICAS E PRIVADAS PARA AVANÇO DA PRODUÇÃO E USO SIGNIFICATIVO DO H_2 VERDE

Não há no mundo nenhuma introdução de novas tecnologias sem a presença de financiamento governamental e uma iniciativa privada pujante que responda de maneira inovadora os desafios disruptivos. O hidrogênio verde necessitará desses dois fatores. O exemplo maior é que a Alemanha tem sido a impulsionadora e financiadora de projetos e discussões sobre o uso do H_2 verde.

Não é à toa que no Brasil duas agências alemãs, a AHK (Câmara de Comércio e indústria Brasil-Alemanha) e a GIZ (Agência Alemã de Cooperação Internacional), têm liderado projetos cujo tema é exatamente o H_2 verde. Essas duas agências criaram um portal na internet (https://www.h2verdebrasil.com.br/o-que-e-hidrogenio/) que reúne informações mais recentes de projetos, desafios e propostas para um futuro sem carbono.

Segundo o portal hidrogênio verde, há três desafios que devem ser superados: preço, distribuição/armazenamento e transportes. Cada um desses três temas tem infinitas soluções entre governos e a iniciativa privada. Porém, optamos por descrever pequenos exemplos de como os governos e a iniciativa privada podem ajudar:

I. Preço

- Quanto mais barata for a energia limpa para produção do H_2 verde, menor será seu valor de mercado. Políticas públicas: incentivar a produção do H_2 verde, inclusive no refino do petróleo isso ajuda no aumento de escala e diminuição dos custos de produção. Iniciativa privada: investir em aumento das eficiências na cadeia produtiva do H_2;
- O valor atual do H_2 verde produzido é de aproximadamente US$ 7,00. Há um grande desafio de baixar os custos de produção para o preço ficar em torno do atual US$ 1,00 do H_2 cinza. Políticas públicas: incentivar o uso de H_2 verde nas empresas de economia mista como a Petrobras para estimular a economia de mercado, além de taxar o carbono emitido e regulamentar o mercado de carbono no País. Iniciativa privada: promover pesquisas de novos materiais e ou processos que diminuam os custos de produção.

II. Distribuição e armazenamento

- O hidrogênio normalmente é produzido onde é consumido, o que diminui as perdas energéticas ou do próprio gás que deve ser armazenado em tanques com altas pressões. As três principais opções de armazenamento/distribuição são: liquefazê-lo (alto gasto energético), dilui-lo em gás natural ("enriquece" a mistura, já que o gás natural tem quatro moléculas de hidrogênio e pode ser utilizado como fonte de hidrogênio, mas é emissor de carbono), agregar na amônia, facilitando o transporte para depois extrair o H_2 no destino. Políticas públicas: incentivar empresas multinacionais a abrir filiais no Brasil e produzir com uma menor pegada ambiental utilizando H_2 verde. Dessa forma, em vez de exportar o hidrogênio puro, já o exporta beneficiado, gerando emprego e renda no País. Criar parâmetros de segurança para o transporte de H_2 na rede de distribuição de gás natural. Iniciativa privada: priorizar a utilização de H_2 na sua produção mesmo que em forma de porcentagem, utilizando o *marketing* verde para conscientizar o consumidor a escolher um produto um pouco mais caro, porém com uma proteção ambiental maior.

III. Transporte

- O modal de transporte atual é responsável por cerca de 25% das emissões mundiais de GEE, e como já mencionado anteriormente, a opção pela eletrificação parece um passo sem volta. Porém, os veículos elétricos têm uma questão importante que é a autonomia e o tempo de recarga conhecido na mobilidade como "*range anxiety*" (medo de ficar parado sem ter como abastecer o veículo). Dessa forma, o hidrogênio pode ser um grande aliado da eletromobilidade, gerando energia embarcada e aumentando o range ou a autonomia dos veículos elétricos. Políticas públicas: incentivar e financiar grupos de pesquisas para viabilizar o uso de hidrogênio como vetor de energia na eletromobilidade. Incentivar empresas que trabalham com H_2 e células a combustíveis a se estabelecer no Brasil para adaptar um *powertrain* compatível com as distâncias e singularidades brasileiras. Inciativa privada: viabilizar a demanda elétrica e energética na eletromobilidade utilizando o hidrogênio como vetor de energia.

Por fim, é importante salientar que as questões ambientais não terão sucesso sem governos e inciativa privada trabalhando juntos para viabilizar produtos baratos, funcionais e ambientalmente corretos que levem em consideração as características locais e que promovam o desenvolvimento, o crescimento a criação de emprego e renda. Em particular, o Nordeste tem todas as condições naturais e de recursos humanos para se desenvolver utilizando o hidrogênio verde como diferencial.

D. INFRAESTRUTURA

Eólica e solar

A região Nordeste tem um potencial de energias renováveis, como já mencionado anteriormente, consideravelmente promissor. E isso já diminui bastante os custos de investimento inicial para produção do hidrogênio verde. Nas tabelas 9 e 10 podem ser vistas as centrais geradoras eólicas e as usinas s solares fotovoltaicas por estado, respectivamente. Vale a pena salientar que essas usinas não estão disponíveis para produção de H_2 verde. Porém, há uma infraestrutura montada para receber empreendimento grandes já consolidada nos estados que possuem as tecnologias de geração renovável como a eólica e a solar. O estado do Alagoas é o único do Nordeste que não tem geradora eólica em operação.

CENTRAL GERADORA EÓLICA			
Estado	Quantidade	Potência (kW)	%
BA	231	6.035.610	30,43
CE	99	2.506.440	12,66
MA	16	426.022	2,15
PB	30	628.440	3,15
PE	38	943.365	4,76
PI	85	2.516.650	12,54
RN	222	6.764.946	34,14
SE	1	34.500	0,17

Tabela 9. Centrais geradoras eólicas no Nordeste / Fonte: Aneel, 2022.

CENTRAL GERADORA FOTOVOLTAICA			
Estado	Quantidade	Potência (kW)	%
AL	2	2.400	0,07
BA	45	1.356.444	36,79
CE	21	499.926	13,56
MA	5	1.882	0,05
PB	10	166.083	4,5
PE	22	317.039	8,6
PI	33	1.205.886	31,54
RN	16	365.084	4,87
SE	1	800	0,02

Tabela 10. Centrais geradoras fotovoltaicas no Nordeste / Fonte: Aneel, 2022.

PORTOS NOS ESTADOS DO NORDESTE	
Estado	**Nome**
MA	Porto de Itaqui
	Porto de Ponta da Madeira
PI	Porto de Luís Correia
Ce	Porto de Pecém
	Porto de Fortaleza (Mucuripe)
RN	Porto de Areia Branca
	Porto de Natal
PB	Porto de Cabedelo
PE	Porto de Suape
	Porto do Recife
AL	Porto de Maceió
SE	Porto de Barra dos Coqueiros
BA	Porto de Salvador
	Porto de Aratu
	Porto de Ilhéus

Tabela 11. Portos nos estados do Nordeste

Fonte: Portopedia, 2019.

A infraestrutura portuária é de extrema relevância para uma possível exportação do H_2 verde produzido no Brasil, isso porque o Nordeste brasileiro é a rota mais próxima do mercado consumidor europeu. Na tabela 11 é possível observar os portos e os estados. É importante salientar que o presente documento não avaliou a capacidade de cada porto em receber plantas de H_2 verde.

Nas tabelas 12, 13 e 14, respectivamente, podem ser vistas as outras infraestruturas do Nordeste, como rodoviária, ferroviária e aeroportuária.

MODAL RODOVIÁRIO NO NORDESTE			
Extensão pavimentada (km)	Extensão não pavimentada (km)	Extensão pavimentanda federal (km)	Total (km)
59.961	20.129	356.541	436.631

Tabela 12. Modal rodoviário no Nordeste / Fonte: CNT, 2018.

MODAL FERROVIÁRIO NO NORDESTE		
Estações	Mov. Estações (t)	Malhas
26	191.420.255	EFC, FNSTN, FTL, FCA

Tabela 13. Modal ferroviário no Nordeste / Fonte: CNT, 2018.

MODAL AEROPORTUÁRIO NO NORDESTE		
Aeroportos	Mov. de passageiros	Mov. Cargas (t)
31	34.946.959	148.685

Tabela 14. Modal aeroportuário no Nordeste / Fonte: CNT, 2018.

E. DEMANDAS REGULATÓRIAS

Há duas demandas do mercado para a regulamentação do hidrogênio verde:

I. O que é considerado hidrogênio verde no Brasil? Só a produção a partir da eletrólise ou a reforma para obtenção do hidrogênio a partir da biomassa será considerada verde?

II. Criação de políticas de fomento a demanda e contratos *offtake*.

No Brasil tramita o projeto de lei n. 725/2022 que "Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável".

No documento Green hydrogen: A guide to policy making, da International Renewable Energy Agency (Irena), são listados quatro pilares estratégicos para a formulação de políticas para o hidrogênio verde, a saber[11] (IEA, 2019):

I. Estratégia nacional do hidrogênio: cada país precisa definir seu nível de ambição para o hidrogênio verde e mapear o apoio necessário para a iniciativa privada;

II. Definir prioridades: o hidrogênio verde pode ser utilizado em uma ampla cadeia produtiva. Os formuladores de políticas devem identificar e se concentrar em aplicações que forneçam o maior valor agregado;

III. Garantias de origem renovável: para as emissões de carbono, deve ser priorizado a metodologia de ACV para a produção do hidrogênio. É necessário definir rótulos com a classificação do hidrogênio para que o consumidor saiba qual é o real ganho ambiental de cada rota de produção do hidrogênio. Isso ajuda também a definir prioridades de investimento;

IV. Sistema de governança e políticas de transição: na medida em que o hidrogênio verde se torna predominante na cadeia produtiva, as políticas devem abranger o sistema energético. A sociedade civil e o setor industrial devem ser incentivados em participar de forma que os benefícios sejam para todos os envolvidos.

[11] *Tradução livre.*

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo procura fazer um resumo das oportunidades visualizadas ao longo do relatório, as quais podem ajudar em um planejamento nacional trazendo maior competitividade para o Brasil, em especial para o Nordeste brasileiro, com foco na descarbonização da mobilidade, de forma a ajudar nas políticas públicas assim como também na sua previsibilidade para os investidores.

Para isso, se faz necessário que as futuras lideranças de todos os setores busquem pensar em políticas públicas e de investimento de longo prazo. Prevendo-se antecipadamente quais são as potencialidades, os gargalos tributários e as questões regionais, torna-se muito mais dinâmico pensar em soluções sustentáveis que gerem emprego e renda estáveis para a região Nordeste.

Não há como pensar a transição energética que não seja de forma justa e para todos. Por isso, planejar, discutir e tomar decisões de forma embasada se faz necessário. As questões energéticas devem ser realizadas de forma a garantir que novas tecnologias sejam para todas as pessoas.

Para que essa transição justa regional ocorra, se faz necessário a união de todos os estados e municípios nordestinos. Isso garante que sejam discutidas políticas tributárias, de infraestrutura, de formação de pessoal especializado para que não haja competições desiguais e se favoreça apenas um estado ou poucos municípios. Pela dimensão dessa transição energética, a descarbonização usando o potencial do vetor energético de H_2 verde e de biomassa de carbono neutro, convoca-se uma união entre municípios em diferentes estados do Nordeste para construir uma possível rede de corredores de abastecimento com esse novo vetor energético.

Será necessário preparar os cenários de demandas de mobilidade e logística entre as áreas urbanas e interligação com outros modais para estabelecer as rotas prioritárias e fases subsequentes de programas quinquenais com visibilidade até 2037, quer seja para o mercado interno, quer seja para exportação. Esses cenários precisam ser realizados já pensando na integração dos estados e todas as questões envolvida nesse processo.

A SAE4Mobility e a ClimaInfo têm condições de estipular diversos cenários, avaliando critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais de caso a caso e de maneira regional. Isso ajuda a atrair capitais privados e investimento que beneficiam a sociedade, seja na arrecadação de tributos, seja na criação de emprego e renda. A nova mobilidade a partir da transição justa não pode excluir ninguém, como já mencionado anteriormente.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente documento é um relatório inicial, introdutório e que tem por objetivo elencar as diversas questões que devem ser levadas em consideração para a nova mobilidade que se avizinha. A SAE4Mobilitye a ClimaInfo têm a *expertise* necessária para apresentar projetos economicamente viáveis, ambientalmente responsáveis e socialmente justos.

Projetos robustos precisam envolver três pilares básicos:

I. Fabricante da fonte de energia renovável;

II. O fabricante/produtor/distribuidor do hidrogênio;

III. O fabricante dos produtos e serviços em mobilidade.

Estes se aplicam conforme a demanda da região, estado ou cidade em atividades de mobilidade e logística que geram as maiores demandas para viabilização da aplicação dessa tecnologia a médio e longo prazos, como por exemplo:

- Transporte entre os centros logísticos e as áreas urbanas.
- Transporte entre centros logísticos.
- Transporte entre centros industriais (parques tecnológicos) e centros logísticos.
- Mobilidade urbana em grandes centros.
- Redes de cidades com grande deslocamento de produtos, insumos e pessoas.
- Redes de portos com grande deslocamento de produtos e insumos.

Em cada um desses arranjos mencionados acima, novos participantes fundamentais devem ser convidados para a realização de um planejamento estruturante para viabilizar estas soluções.

Assim ficamos à disposição dos agentes públicos e privados ligados à mobilidade e logística nas cidades e estados do Nordeste para promover estudos específicos em parceria, apoiando a composição desses grupos de estudo e projetos para a transição energética justa.

A SAE4Mobility e a ClimaInfo esperam colaborar apresentando alternativas tecnológicas atualizadas, buscando a viabilidade com as futuras lideranças nas tomadas de decisões que envolvem o tema "hidrogênio, mobilidade e transição justa".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura. 2. ed. corrigida. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 21p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Capacidade Instalada por Estado [online]. Brasília, 2022. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9. Acesso em: 1 set. 2022.

ANDREW, Robbie M.; PETERS, Glen P. (2021). The Global Carbon Project's fossil CO2 emissions dataset [online]. [s. l.], 14 out. 2021. In: Zenodo. Disponível em: https://zenodo.org/record/5569235#.YxyH8y3OpTY. Acesso em: 2 set. 2022.

BLOOMBERG. Sector Coupling in Europe: Powering decarbonization. Potential and Policy implications of electrifying the economy. Nova York: Bloomberg, 2020. Disponível em: https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Sector-Coupling-Report-Feb-2020.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Fatores de emissão da margem de operação e da construção https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao. Brasília: MCTI, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro Abril/2022 [online]. Brasília: MME, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2022/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-abr-2022.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio [online]. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021 a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2021 [online]. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021. Acesso em: 1 set. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene). Plano Regional de Desenvolvimento do Nordeste. Recife: Sudene, 2019.

CÂMARA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO BRASIL-ALEMANHA DO RIO DE JANEIRO (AHK Rio de Janeiro); SAE BRASIL. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. Rio de Janeiro: GIZ, 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

CAMARGO, João Carlos. O etanol como fonte de hidrogênio para células a combustivel na geração distribuída de energia elétrica. 2004. 145f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecanica, Campinas,SP, 2004. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12733/1605086. Acesso em: 1 set. 2022.

CENTRO DE GESTÁO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025. Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CONFEDERAÇÁO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Plano CNT de Transporte e Logística 2018 [online]. Brasília: CNT, 2018. Disponível em: https://planotransporte.cnt.org.br/. Acesso em: 1 set. 2022.

DE SOUZA, Lidiane La Picirelli, et al. Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. Journal of Cleaner Production, n. 203, p. 444-468, 2018.

E4TECH. The Fuel Cell Industry Review 2019 [online], 2019, p. 1-52, 2019. Disponível em: https://fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2019.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

ELETROBRAS. Mapas do Sistema Elétrico Brasileiro [internet]. Brasília, 2022. Disponível em: https://eletrobras.com/pt/Paginas/Sistema-Eletrico-Brasileiro.aspx. Acesso em: 2 set. 2022.

ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY (EERE). Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Types of Fuel Cells [online]. Washington: U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells. Acesso em: 1 set. 2022.

ERBACH, Gregor. Energy storage and sector coupling Towards an integrated, decarbonised energy system. In: European Parliamentary Research Service (EPRS) [online]. Bruxelas: EPRS, 2019. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/637962/EPRS_BRI(2019)637962_EN.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRIEDLINGSTEIN, Pierre et al. Global Carbon Budget 2021. Earth System Science Data, n. 14, p. 1917-2005, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022. Acesso em: 1 set. 2022.

GLOBAL CARBON PROJECT. Supplemental data of Global Carbon Budget 2021 (Version 1.0) [online]. [s. l.], 2021. Disponível em: https://doi.org/10.18160/gcp-2021. Acesso em: 2 set. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: MASSON-DALMOTTE, Valérie et al. (eds.). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK: Cambridge University Press: Nova York: IPCC, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities [online]. Paris: IEA, 2019. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World total energy supply by source [online]. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply. Acesso em: 1 set. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Green hydrogen: A guide to policy making [online]. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf. Acesso em: 1 set. 2022.

LIMA JÚNIOR, Claudemiro et al. Potencial de Aproveitamento Energético de Fontes de Biomassa no Nordeste do Brasil (Potential Energy Use of Biomass Sources in Northeast Brazil). Revista Brasileira de Geografia Física, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 207-221, maio 2014. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233046/26969. Acesso em: 1 set. 2022.

LOPES, Daniel Gabriel. Análise técnica e econômica da inserção da tecnologia de produção de hidrogênio a partir da reforma de etanol para geração de energia elétrica com células a combustível. 2009. 93 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecanica, Campinas, SP. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12733/1608834. Acesso em: 1 set. 2022.

NORTH AMERICAN COUNCIL FOR FREIGHT EFFICIENCY (NACFE). Hydrogen Color Spectrum [online]. Fort Wayne, IN, EUA: NACFE, 2020. Disponível em: https://nacfe.org/news/nacfe-december-2020-newsletter/. Acesso em: 1 set. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Geração de energia. Geração de Energia Tipo de Usina http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Rio de Janeiro: ONS, 2022.

PORTOGENTE. Portopédia. Portos do Arco Norte e do Nordeste [online]. [s. l.], 2019. Disponível em: https://portogente.com.br/portopedia/106957-portos-do-arco-norte-e--do-nordeste. Acesso em: 1 set. 2022.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. Energy Production and Consumption [online]. In: Our World In Data. Oxford, 2020. Disponível em: https://ourworldindata.org/energy-production-consumption. Acesso em: 1 set. 2022.

SCALDAFERRI, Cristiane Almeida. Síntese de bio-hidrocarbonetos via catálise heterogênea para a produção de bioquerosene de aviação e diesel verde. 2019. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, Belo Horizonte, 2019.

SCALDAFERRI, Cristiane Almeida; PASA, Vânya Márcia Duarte. Green diesel production from upgrading of cashew nut shell liquid. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 111, p. 303-313, 2019**.**

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION (SAIC). Life cycle assessment: principles and practice. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2006.

SIEMENS ENERGY. The power of Hydrogen [online]. Munique, 2022. Disponível em: https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen--solutions.html?gclid=CjwKCAjwsMGYBhAEEiwAGUXJab1dbUGfeewjGyt0l_3fFvAmSrSjUv0UnD-tOtjvAo7ZxQlkHryr6xoCFboQAvD_BwE. Acesso em: 1 set. 2022.

SILVA, Ennio Peres da. Fontes renováveis de energia. Produção de energia para um desenvolvimento sustentável. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

TODAY, F.C., 2020. History, Technologies and Applications 50.

VOLVO. What are hydrogen fuel cells? [online]. Gotemburgo, 2020. Disponível em: https://www.volvogroup.com/en/future-of-transportation/innovation/electromobility/hydrogen-fuel-cells.html. Acesso em: 1 set. 2022.

WIKIPEDIA. Greenhouse gas [online]. San Francisco, 2022. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas. Acesso em: 1 set. 2022.

SAE BRASIL®

A CASA DO CONHECIMENTO DA MOBILIDADE BRASILEIRA

PLANO NORDESTE POTÊNCIA