

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA JUSTA

Premissas de projeção



Transição Energética Justa / Premissas de projeção

© CAF-banco de desenvolvimento da América Latina e Caribe-2024

CORPORACION ANDINA DE FOMENTO- Av. Luis Roche, Torre CAF Urb.
Altamira, Caracas (Chacao) Miranda 1060, Venezuela. RIF: G200015470

Contribuição do CAF para a Facilidade Climática do Clube de Bancos para
o Desenvolvimento

Relatório coordenado pela Gerência de Ação Climática e Biodiversidade Positiva
(GACBP), a Gerência de Conhecimento (GC) e a Gerência de Infraestrutura Física
e Transformação Digital (GIFTD).

Edgar Salinas, executivo principal, Direção de Operações e Financiamento Verde
(GACBP).

Walter Cont, executivo sênior, Direção de Análise Setorial (GC).

Juan Ríos, executivo principal, Direção de Transportes e Energia (GIFTD).

Autores

A equipe da GME (em ordem alfabética) incluiu Agustín Ghazarian, Coline
Champetier, Darío Quiroga, Francisco Baqueriza, Nicolás Barros, Laura Souilla,
Ramón Sanz e Roberto Gomelsky.

Os autores agradecem a Edgar Salinas, Walter Cont e Juan Ríos pelos comentários,
sugestões e apoio no desenvolvimento deste documento.

Gestão Editorial

Direção de Comunicação Estratégica da CAF.

**Design gráfico universal neuroinclusivo, com princípios de acessibilidade e
visualização para leitores neurodivergentes**

CLEIMAN - <https://cleiman.com>

Fotografias

Portada: ©AdobeStock

Internas: © CAF - © Pexels

Versão digital disponível em scioteca.caf.com com acesso aberto sob a licença

[Deed - Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional - Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



As ideias e opiniões expressas nesta obra são dos autores e não refletem
necessariamente o ponto de vista da CAF, nem comprometem a Organização. Os
termos utilizados e a apresentação dos dados aqui contidos não implicam qualquer
posição por parte da CAF quanto ao status jurídico dos países, territórios, cidades ou
regiões, nem em relação às suas autoridades, fronteiras ou limites.

Transição Energética Justa

Premissas de projeção

Lista de abreviaturas	13
Capítulo 1 Objetivos	15-20
1. Objetivo geral	16
2. Objetivos específicos	17
3. Organização da série Transição Energética Justa	18
4. Assuntos organizacionais	19
5. Premissas de projeção	20

Capítulo 2
Seção metodológica
e premissas

21-85

1. Modelagem de projeção	22	Ano base e horizonte de planejamento	22
		Descrição geral do modelo	22
2. Cenários e marco global	26	Definição ds cenários	26
		Projeções das variáveis socioeconômicas	28
		PIB per capita e PIB	28
		População	32
		Principales premissas do setor energia	33
3. Demanda por setor	35	Setor residencial	35
		Ponto de partida	35
		Premissas	38
		Usos de calor	38
		Usos elétricos	43
		Setor comercial, serviços e público	45
		Ponto de partida	45
		Premissas	46

Setor industrial	47
Ponto de partida	47
Premissas	48
Setor transporte	52
Ponto de partida	52
Premissas	54
Setor agropecuário, pesca, mineração e construção	65
Ponto de partida	65
Premissas	68
Setor elétrico	69
Ponto de partida	69
Premissas	72
4. Investimentos	75
Setor elétricos	76
Geração elétrica: projetos futuros	76
Investimentos em infraestrutura e flexibilidade	78
Redes de transmissão e distribuição	78
Geração elétrica: desmantelamento de centrais carvoeiras	79
Usos finais	80
Transporte rodoviário	80
Eficiência energética, eletrificação e uso de combustíves alternativos	83
Captura, uso e armazenamento de carbono	84

Trabalhos citados

86-87

Anexos

88-97

TABELAS E GRÁFICOS



Tabela 1.

PIB total projetado por país, PPP USD per capita de 2017 e TCMC entre 2019 e 2060, % 30

Tabela 2.

Supostos de substituição por combustível, país e cenário, uso cocção 40

Tabela 3.

Principais premissas de transição energética por cenário: setor comercial, serviços e público 47

Tabela 4.

Principais premissas de transição energética, por país e cenário, setor industrial 51

Tabela 5.

Principais premissas de transição energética, por país e cenário, transporte de passageiros 60

Tabela 6.

Principais premissas de transição energética, por país e cenário, transporte de cargas 63

Tabela 7.

Principais premissas de transição energética por cenário, transporte aéreo, marítimo e fluvial, ferroviário 65

Tabela 8.

Principais supostos de transição energética por cenário, setor agropecuário, pesca, mineração e construção 68

Tabela 9.

Evolução CAPEX por tecnologia, NREL, USD/kW 77

Tabela 10.

Evolução CAPEX geração carvoeiras, NREL, USD/kW 79

Tabela 11.

Evolução do custo total de propriedade para veículos elétricos e híbridos, USD 81

Tabela 12.

Custo total de propriedade para veículos fósseis, USD 82

Tabela 13.

CAPEX equivalente por setor, USD/ton CO2e absorvida-ano 84

Tabela 14.

Fórmulas de regressão linear por país 89

Tabela 15.

Taxa efetiva anual entre 1990 e 2021 por país 91

Gráfico 1.

Setores, níveis de atividade e variáveis explicativas 24

Gráfico 2.

Evolução do PIB per capita por país, PPP USD per capita de 2017 29

Gráfico 3.

Distribuição do PIB por setor e país, % 31

Gráfico 4.

Evolução da população por país, tomando como base o ano 2019 32

Gráfico 5.

Consumo de energia final unitário, por uso e país, ano 2019, TJ/1.000 habitantes 36

Gráfico 6.

Consumo de combustível no setor residencial, por país, ano 2019, % 37

Gráfico 7.

Colômbia: evolução do consumo de energia útil per capita para usos de calor, entre 2010 e 2021, TJ/1.000 habitantes 39

Gráfico 8.

Colômbia: regressão, consumo eletricidade vs. PIBpc, período entre 1990 e 2019 44

Gráfico 9.

Consumo de combustível por país, setor comercial, serviços e público, 2019 46

Gráfico 10.

Consumo de combustível no setor industrial, por país, ano 2019 48

Gráfico 11.

Demanda de energia por uso e por combustíveis, setor transporte, ano 2019 53

Gráfico 12.

Relação entre a taxa de propriedade de motocicletas/automóveis e o PIB per capita 55

Gráfico 13.

Consumo por combustível e por subsetor no setor agropecuário, pesca, mineração e construção, ano 2019, % 67

Gráfico 14.

Capacidade instalada e geração elétrica, ano 2019, % 70

Gráfico 15.

Recurso solar potencial (kWh/kWp) e velocidade média do vento a 100 m (m/s) 71

Gráfico 16.

Comparativo PIB per capita, consumo elétrico 93

Gráfico 17.

Comparativo PIB per capita, IDH 94

Gráfico 18.

Comparativo IDH, consumo elétrico per capita 95

Gráfico 19.

Comparativo IDH, consumo elétrico maior a 5.000 kWh 96

Gráfico 20.

Comparativo PIB, IDH (consumo elétrico maior a 5.000 kWh) 97

Lista de abreviaturas

ACS	água quente sanitária
AFOLU	agricultura, pecuária, reflorestamento e outros usos do solo (<i>agriculture, forestry and other land use</i>)
AIE	Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency [IEA]</i>)
BAU	<i>Business as usual</i>
CAPEX	gastos de capital (<i>capital expenditures</i>)
CCUS	tecnologia de captura, uso e armazenamento de carbono (<i>carbon capture use and storage</i>)
CEPAL	Comissão Econômica para América Latina e o Caribe
CIIU	Classificação Internacional Industrial Uniforme
EE	eficiência energética
ERNC	energias renováveis não convencionais
GEE	gases de efeito estufa
GLP	gás liquefeito de petróleo
GNC	gás natural comprimido
GNL	gás natural liquefeito
IDH	índice de desenvolvimento humano
IREES	Instituto de Eficiência dos Recursos e Estratégias Energéticas (<i>Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien</i>)

IRENA	Agência Internacional das Energias Renováveis (<i>International Renewable Energy Agency</i>)
LEAP	plataforma de análise de baixas emissões (<i>low emissions analysis platform</i>) do SEI
NREL	Laboratório Nacional de Energias Renováveis (<i>National Renewable Energy Laboratory</i>)
NU	Nações Unidas
NZ	<i>net zero</i>
OLADE	Organização Latino-americana de Energia
O&M	operação e manutenção
PIB	produto interno bruto
PIBpc	produto interno bruto per capita
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPP	paridade do poder aquisitivo (<i>purchasing power parity</i>)
SEI	Instituto Ambiental de Estocolmo (<i>Stockholm Environment Institute</i>)
SieLAC	Sistema de Informação Energética da América Latina e o Caribe
TCMC	taxa de crescimento médio composta (<i>compound average growth rate</i>)
TEJ	transição energética justa
TJ	terajoule
UPME	Unidade de Planejamento Mineiro Energético da Colômbia
VE	veículos elétricos



1. Objetivo geral

O objetivo geral do projeto foi desenvolver uma abordagem metodológica para a definição do conceito de transição energética justa (TEJ) no contexto nacional, com potencial de aplicação nos países membros do CAF – banco de desenvolvimento da América Latina e do Caribe – e avaliar a abordagem proposta no Brasil, Colômbia, México, Peru e República Dominicana.



2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste relatório são:

1. definir uma abordagem metodológica para a abordagem abrangente da transição energética justa na região;
2. estabelecer o diagnóstico dos sistemas energéticos e - em particular, elétricos nacionais (países-alvo) no âmbito do processo de transição energética;
3. definir cenários nacionais para o modelo de desenvolvimento de baixo carbono da transição energética nos países-alvo, que inclua os elementos a serem eletrificados em setores energéticos atualmente não servidos pelo setor elétrico dentro dos requisitos prospectivos;
4. modelar alternativas viáveis de transição energética no contexto previamente definido.

3. Organização da série Transição Energética Justa

O trabalho para atingir os objetivos indicados foi desenvolvido entre outubro de 2022 e outubro de 2023. A série foi organizada em sete relatórios.

1. Transição Energética Justa / Marco conceitual para a região, Análise no contexto nacional
2. Transição Energética Justa / Premissas de projeção
3. Transição Energética Justa / Cenários Brasil
4. Transição Energética Justa / Cenários Colômbia
5. Transição Energética Justa / Cenários México
6. Transição Energética Justa / Cenários Peru
7. Transição Energética Justa / Cenários República Dominicana

Os relatórios por país foram organizados seguindo a ordem alfabética de seus nomes.

4. Assuntos organizacionais

Este relatório foi financiado pelo CAF e é publicado para comunicar os resultados e conclusões obtidos à comunidade interessada no desenvolvimento da América Latina. Consequentemente, o documento não foi elaborado seguindo os procedimentos de um documento oficial. Algumas das fontes citadas neste relatório podem ser documentos informais difíceis de obter.

As conclusões e opiniões aqui expressas são de responsabilidade exclusiva dos autores e não devem ser atribuídas ao CAF ou GME, suas organizações afiliadas ou diretores executivos e não refletem necessariamente seus pontos de vista.

O CAF e a GME não garantem a exatidão dos dados incluídos nesta publicação e não assumem qualquer responsabilidade pelas consequências da sua utilização. As cores, fronteiras, nomes e classificações de qualquer mapa neste relatório não implicam julgamento por parte do CAF sobre o status legal ou outro dos territórios, nem a aprovação ou aceitação de tais limites.

Os relatórios desta série são documentos para discussão e, portanto, estão sujeitos aos mesmos direitos autorais que outras publicações do CAF.

O CAF promove a divulgação de suas obras e autoriza sua reprodução imediata, gratuita, caso não sejam utilizadas para fins comerciais.

Edgar Salinas, Juan Ríos e Walter Cont, do CAF, formaram um grupo de trabalho que estabeleceu os termos de referência e desenvolvimento dos referidos relatórios pelos consultores do GME.

A equipe da GME foi composta, em ordem alfabética, por Agustín Ghazarian, Coline Champetier, Darío Quiroga, Francisco Baqueriza, Nicolás Barros, Laura Souilla, Ramón Sanz e Roberto Gomelsky.

5. Premissas de projeção

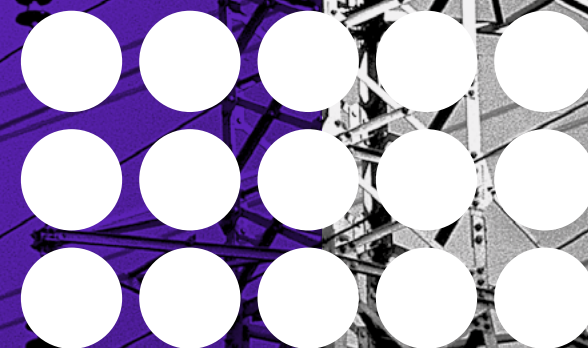
O objetivo deste relatório é descrever mais detalhadamente as hipóteses, premissas, critérios e metodologia aplicados para desenvolver os cenários de transição energética do modelo Low Emissions Analysis Platform (LEAP).

O relatório apresenta a estrutura geral do modelo, os cenários e a projeção das variáveis socioeconômicas, as premissas e os aspectos metodológicos detalhados para cada setor de demanda, a projeção do setor elétrico e as hipóteses utilizadas para estimar os investimentos necessários para cada cenário.



2

Seção metodológica
e premissas

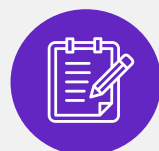


1. Modelagem de projeção



Ano base e horizonte de planejamento

O ano base considerado para a projeção é o ano de 2019. O horizonte de planejamento inicia-se em 2019 e termina em 2060.



Descrição geral do modelo

Para a realização do estudo foi utilizado o modelo LEAP, desenvolvido pelo Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI). O modelo LEAP é uma ferramenta (software) utilizada para a análise de políticas energéticas e avaliação da mitigação das alterações climáticas. Neste caso, foi utilizado para modelar as emissões do setor energético relacionadas à queima de combustíveis em cada país estudado.

Em termos de metodologias de elaboração, o modelo LEAP é particularmente versátil.

- Parte-se da informação dos balanços energéticos que garantem a integridade da informação que está sendo utilizada.
- A demanda energética pode ser projetada utilizando metodologias:
 - *bottom-up* (de baixo para cima), a partir de dados específicos detalhados para chegar a uma projeção total, ou
 - *top-down* (de cima para baixo).

Neste trabalho optou-se por uma modelagem bottom-up e a demanda foi dividida em setores (residencial, industrial, transportes, etc.) que, por sua vez, foram subdivididos em ramos e usos.

- A oferta de energia oferece uma ampla gama de metodologias de simulação que permitem estimar um despacho anual de geração de eletricidade ou incorporar os resultados de outros modelos de otimização mais especializados utilizando as demandas produzidas com o modelo LEAP¹.

Os setores de demandas modelados são projetados segundo um nível de atividade e uma variável explicativa, resumidos simplificadaamente no gráfico 1.

¹ Durante este estudo, foram utilizadas unicamente as ferramentas de simulação do modelo LEAP. Não foram incorporados resultados de envio de outros programas.

Gráfico 1 ▶ Setores, níveis de atividade e variáveis explicativas

Setor	Nível de actividade	Variable explicativa
Residencial	População	Consumo per capita
Transporte rodoviário	Variável objetivo, frota automotriz	Consumo médio por veículo
Transporte não rodoviário	PIB total	Intensidade energética
Industrial	PIB setorial	Intensidade energética por ramo e usos
Comercial, Serviços e Setor Público	PIB setorial	Intensidade energética
Agro, Pesca, Mineração e Construção	PIB setorial	Intensidade energética

Fonte: Elaboração própria.

O produto interno bruto (PIB) setorial é um dos principais motores do crescimento da procura de energia, em particular, para os setores produtivos, enquanto a evolução populacional desempenha um papel de liderança no crescimento da procura de energia no setor residencial. O setor dos transportes rodoviários depende da evolução do número de veículos que, por sua vez, está relacionado com o PIB per capita no caso do transporte de passageiros e com o PIB no caso do transporte de mercadorias. O transporte não rodoviário é projetado com base no PIB global.

A seguir, são descritos mais detalhadamente os cenários propostos e a modelagem adotada para este estudo por setores de demanda e para o setor elétrico. Dado que a estratégia de descarbonização procura substituir os combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e seus derivados, gás natural, etc.), a cadeia de valor associada a estes combustíveis não foi analisada em detalhe na premissa de que haverá suficiente.



2. Cenários e marco global



Definição dos cenários

Foram estudados três cenários para caracterizar diferentes caminhos em busca de uma transição energética justa.

A Cenário *Business as Usual*

O cenário *Business as Usual* (BAU) representa a evolução esperada seguindo as diretrizes das políticas públicas nacionais e as tendências atuais. Neste cenário, são reconhecidas as políticas observadas e em desenvolvimento voltadas à redução de emissões. Por exemplo, são tidos em conta os progressos da região na introdução de energias renováveis (socializando – num primeiro momento – o custo mais elevado através de mercados grossistas e concursos); eficiência energética (implementação de rotulagem de padrões mínimos de eficiência energética [MEPS]); eliminação gradual de carvão e óleo combustível nas matrizes energéticas e produção de biocombustíveis para transporte, etc.

Neste cenário, procuraremos introduzir taxas de evolução consistentes com o passado, especialmente durante os primeiros anos da projeção.

B Cenário *Net Zero 2050*

Este cenário estabelece o horizonte de tempo mais ambicioso, com um cumprimento imediato do estabelecido no artigo 4 do Acordo de Paris². Este cenário se enfoca em diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor energia³ a um mínimo permissível⁴, de modo que o país consiga administrar a absorção de CO₂ no balanço geral do inventário nacional de GEE⁵. O cenário Net Zero toma como objetivo que as emissões de GEE sejam iguais às economias que produzem os sumidouros em cada país da região.

C Cenário *Net Zero 2060*

De acordo com o Acordo de Paris que estabelece o alcance do equilíbrio de emissões na segunda metade do século, o cenário Net Zero 2060 (NZ 2060) propõe um horizonte temporal mais realista baseado nas realidades da região e considera um mínimo de 10 anos além do Cenário Net Zero 2050 (NZ 2050). O cenário NZ 2060 deverá permitir o ajuste gradual dos ajustes necessários ao quadro regulatório e às práticas de mercado, nivelamento dos custos de tecnologia e amortização de ativos, entre outros aspectos. De acordo com as projeções preparadas para o crescimento do PIB, espera-se que os países se

² Acordo de Paris, parágrafo 4.1: “alcançar um equilíbrio entre as emissões antropogênicas por fontes e a absorção antropogênica por sumidouros na segunda metade do século.

³ A análise efetuada centra-se nas emissões relacionadas com a queima de combustíveis, tanto nos processos de procura de energia por setor, como na produção de eletricidade. As emissões de GEE de outros setores (por exemplo, processos industriais, resíduos, emissões fugitivas, etc.) não são detalhadas neste estudo, mas são estimadas aproximadamente e subtraídas para a estimativa do potencial de redução nacional.

⁴ Entende-se que a redução das emissões deve ser alcançada através de uma articulação eficaz de medidas regulatórias, promoção de eficiências de mercado, transferência de tecnologia e investimentos.

⁵ Prevê-se que as absorções de CO₂ provenham de medidas implementadas no setor da agricultura, pecuária, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU) ou através da adoção de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de CO₂ (CCUS, na sigla em inglês).

aproximem das características de consumo e do índice de desenvolvimento humano (IDH) necessários para o desenvolvimento sustentável entre 2050 e 2070.

Tal como o anterior, este cenário centra-se na redução das emissões de GEE do setor energético para um mínimo permitido, para que o país consiga gerir a absorção de CO₂ no balanço geral do inventário nacional de GEE. O cenário visa garantir que as emissões de GEE sejam iguais às poupanças produzidas pelos sumidouros em cada país da região.



Projeções das variáveis socioeconômicas

PIB per capita y PIB

Alinhado com a proposta de uma **transição energética justa**, os cenários são acompanhados de um desenvolvimento socioeconômico similar na região, **atingindo níveis de PIB per capita suficientes para ser considerados países de alta renda**.

Para definir o nível-alvo do PIB per capita consistente com um nível de vida digno, foram considerados dois critérios: o IDH e o consumo de eletricidade per capita. Com base nesses critérios, foi determinado:

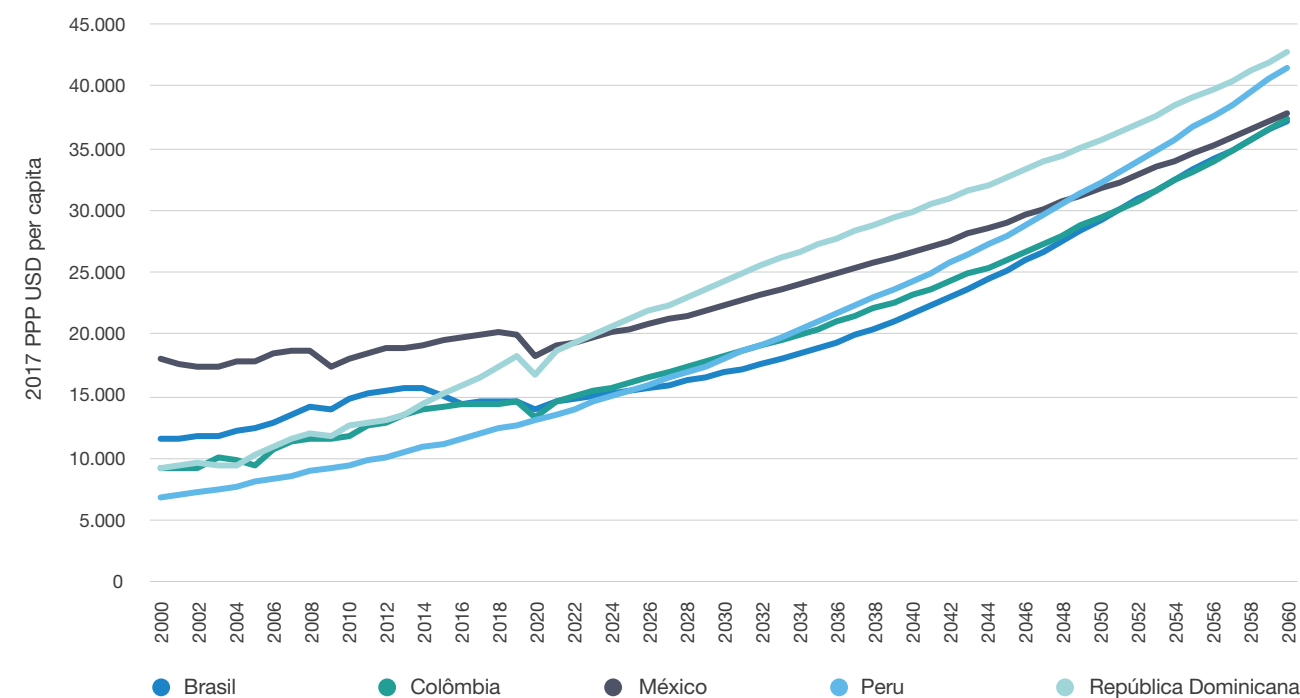
- o PIB médio do quintil mais baixo de países com IDH muito elevado ($\geq 0,8$) e
- o PIB médio do quintil mais baixo de países com consumo de eletricidade superior a 5.000 kWh per capita-ano. Este valor é utilizado no planejamento energético para considerar quais países são industrializados e desenvolvidos.

Esses dados são definidos como os valores de referência que os países devem atingir para ter um padrão de vida digno. A meta do PIB per capita (medido em dólares americanos [USD], paridade de poder de compra [PPC] com base em 2017) de acordo com o primeiro indicador é de 21.000 dólares americanos e de 33.000 dólares americanos para o segundo indicador. Portanto, este segundo valor foi considerado o valor de referência para os objetivos definidos no artigo 4.º do Acordo de Paris. Este valor é compatível com um IDH $\geq 0,8$.

As projeções do PIB foram feitas utilizando modelos estocásticos detalhados no anexo. O PIB per capita resultante por país é apresentado no gráfico 2 e o PIB por país é apresentado na tabela 1:

Gráfico 2

► Evolução do PIB per capita por país, PPP USD per capita de 2017



Fonte: Elaboração própria.

O PIB total é calculado a partir do PIB per capita e da projeção populacional apresentada na subseção “População”. Espera-se um crescimento sustentado para todos os países estudados, aproximadamente entre 2% e 3,5%, com diferenças que refletem o nível inicial do PIB per capita e as tendências históricas recentes.

Tabela 1 ▶ PIB total projetado por país, PPP USD per capita de 2017 e TCMC entre 2019 e 2060, %

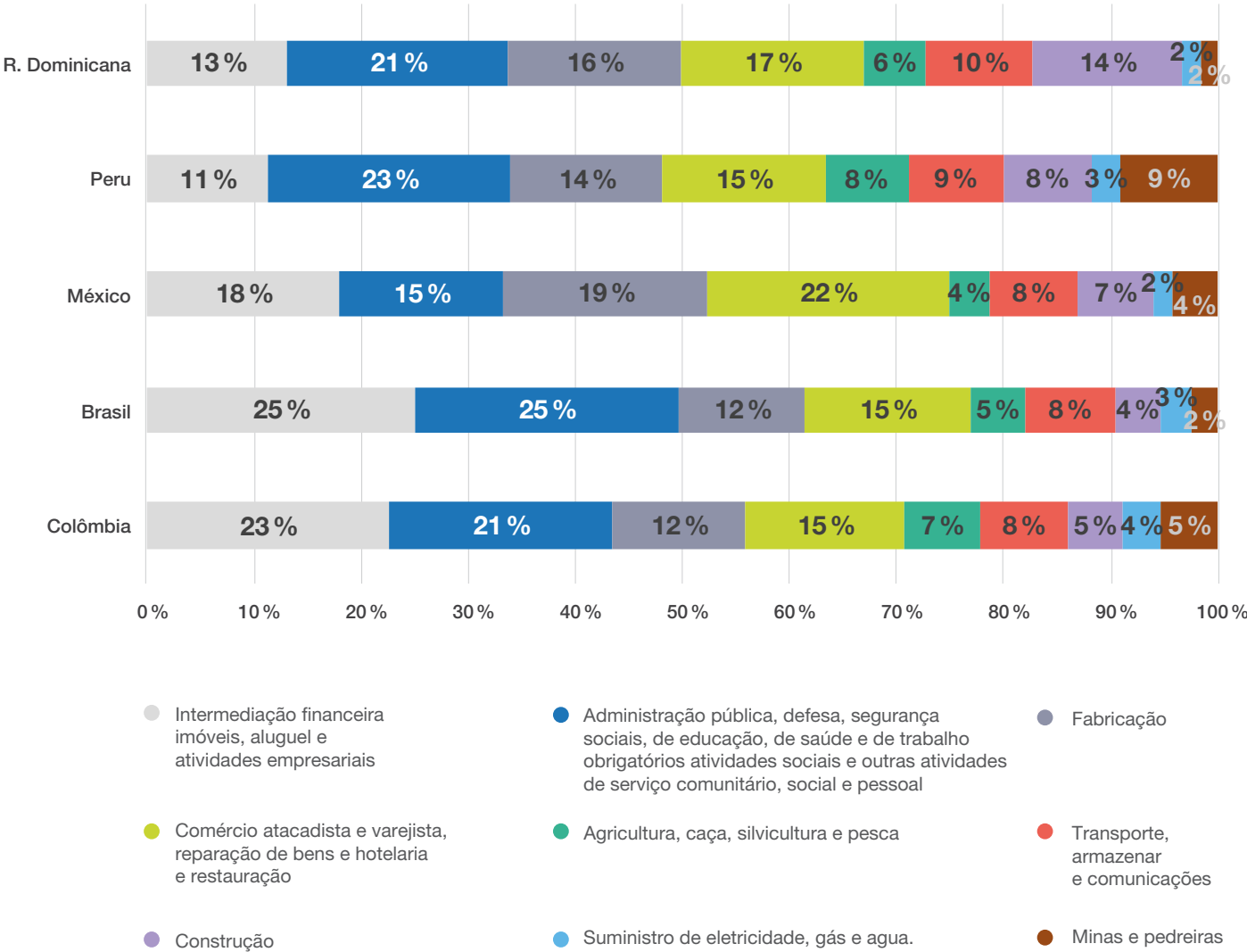
	2019	2030	2040	2050	2060	TCMC período
BRA	3.110.059	3.779.951	4.996.912	6.736.951	8.460.524	2,5 %
COL	733.546	984.185	1.301.385	1.674.808	2.109.590	2,6 %
MÉX	2.509.774	3.006.961	3.757.355	4.564.218	5.403.887	1,9 %
PER	418.610	661.382	965.078	1.350.929	1.807.592	3,6 %
RDO	197.736	291.340	379.659	471.112	571.919	2,6 %

Fonte: Elaboração própria.

O PIB por setor é projetado assumindo que a proporção de cada setor se mantém de acordo com os valores de 2021 (ver gráfico 3). Isto traduz-se numa taxa de crescimento do PIB por setor igual à taxa de crescimento do PIB total⁶.

⁶ Esta premissa busca simplificar o trabalho de simulação.

Gráfico 3 ▶ Distribuição do PIB por setor e país, %



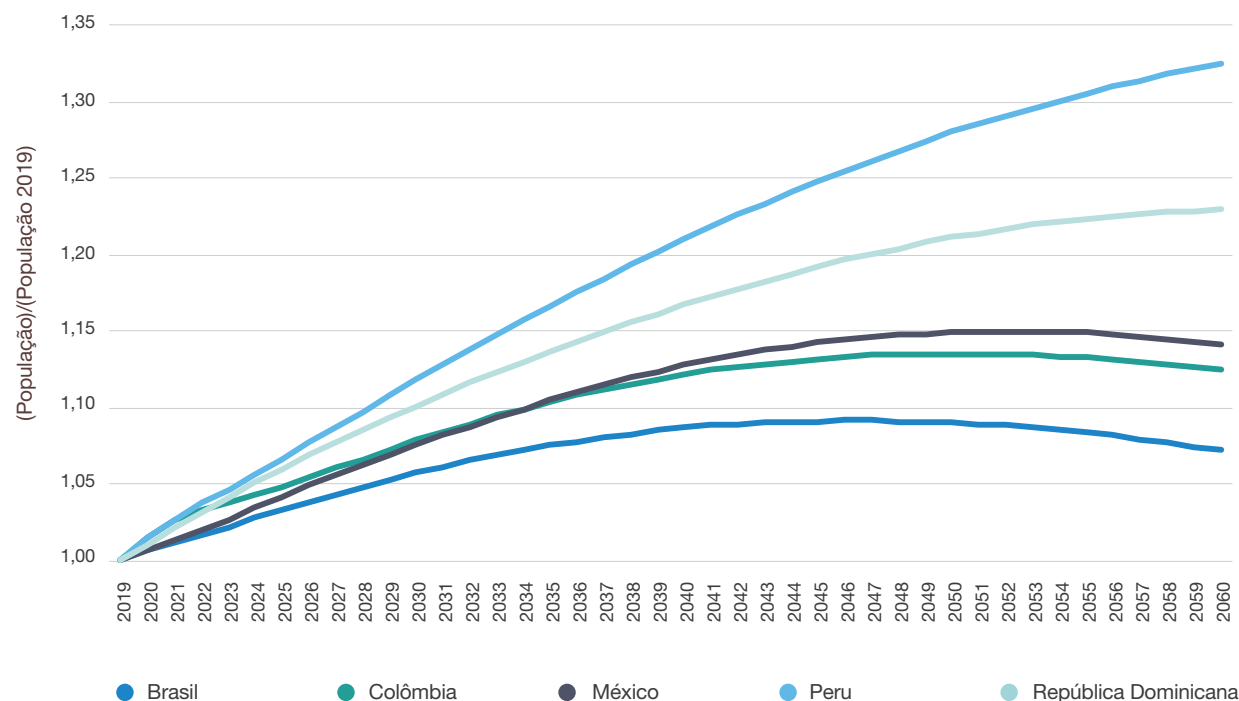
Fonte: Elaboração própria baseada em dados históricos da CEPAL.

População

Quanto à projeção da população, foram utilizadas as projeções elaboradas pelas Nações Unidas e CEPAL⁷. Espera-se uma desaceleração do crescimento da população no futuro, com um crescimento negativo a longo prazo no Brasil, Colômbia e México. O gráfico 4 mostra a evolução da população em cada país em relação a 2019.

Gráfico 4

► Evolução da população por país, tomando como base o ano de 2019



Fonte: Elaboração própria baseada em dados da CEPAL
<https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=1&lang=es>

⁷ <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=1&lang=es>



Principais premissas do setor energia

O enquadramento geral do estudo abrange a definição de premissas para cinco países analisados na série. Embora cada país tenha características próprias, o estudo padronizou, quando possível, as premissas utilizadas, assumindo que os países passarão por processos semelhantes para a transição energética justa. Foram consideradas as particularidades inerentes a cada país, como a indústria do carvão na Colômbia, os biocombustíveis no Brasil, o gás natural a preços muito competitivos no México, o gás no Peru e a escassez de recursos naturais fósseis na República Dominicana, entre outras.

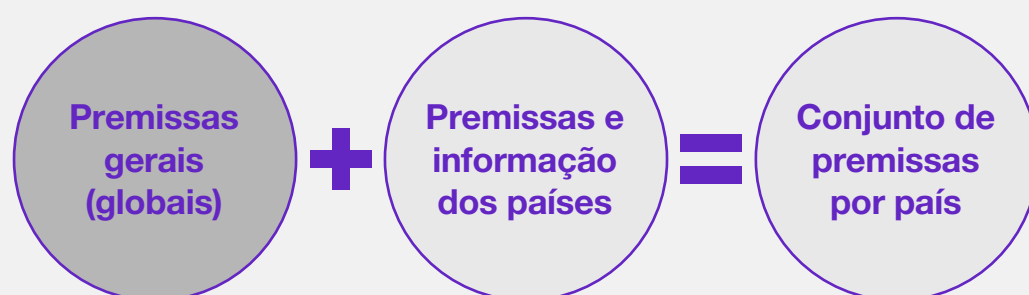
Para atingir os objetivos de descarbonização definidos em cada cenário, as premissas consideradas foram mais ambiciosas no caso dos cenários NZ. As principais premissas são baseadas nas medidas abaixo.

- **Melhorias na eficiência energética.** Isto se aplica a todos os setores, com substituição de equipamentos, maior eficiência térmica das habitações, otimização da utilização de energia nos processos industriais e substituição tecnológica por dispositivos e instalações mais eficientes, maior eficiência dos veículos de transporte, etc.
- **Mudanças de comportamento.** Isto refere-se, em particular, à redução dos percursos médios dos veículos (km/veículo), como consequência da digitalização da sociedade (trabalho remoto, etc.), ao desenvolvimento dos transportes públicos, às melhorias logísticas e à transferência do transporte de carga de camiões para o sistema ferroviário.
- **Substituição de combustível.** Na maioria dos setores, há uma tendência para uma maior eletrificação dos usos, com exceção dos usos industriais ou ramos onde há baixa possibilidade de eletrificação. Nestes casos, a substituição dos combustíveis mais poluentes pelo gás natural ou a utilização de tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ são as

opções projetadas. O hidrogénio e os derivados de baixas emissões também podem contribuir para a descarbonização do setor industrial (fertilizantes, refinação) e do transporte pesado terrestre, marítimo e aéreo (combustíveis sintéticos).

- **Matriz de geração elétrica com tecnologias não fósseis.** É encorajado um desenvolvimento muito significativo das energias renováveis e, em alguns casos, nuclear, e o encerramento de centrais de carvão e de combustíveis líquidos. É importante lembrar que a composição da geração elétrica é fundamental em cenários onde se propõe uma forte eletrificação da matriz de consumo para garantir que essa substituição tenha o efeito esperado em termos de redução de GEE. Esta integração das energias renováveis deve ser acompanhada pelo desenvolvimento de infraestruturas de rede, redes inteligentes e baterias para facilitar a integração da geração elétrica variável.

Para as premissas relativas ao setor energético, a bibliografia analisada inclui tanto documentos gerais que estabelecem diretrizes para todos os países, quanto documentos particulares de acordo com a realidade de cada um deles.



3. Demanda por setor



Setor residencial

Ponto de partida

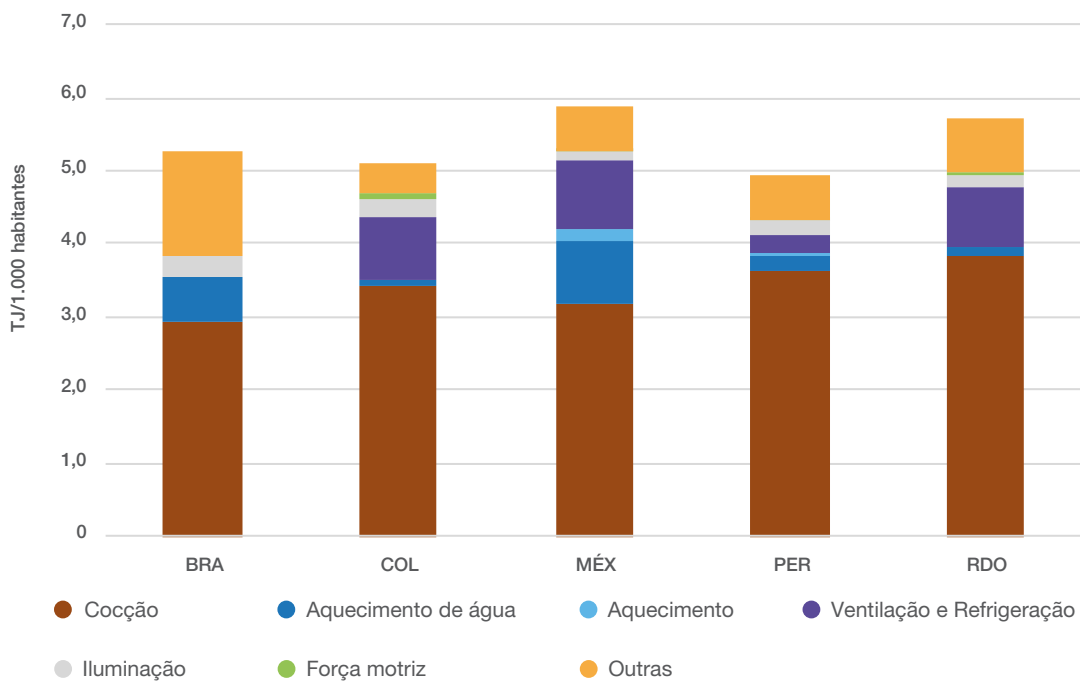
Para analisar e projetar o consumo energético do setor residencial, estima-se a **projeção da população** e do **consumo unitário** por uso e por fonte per capita.

- **Consumo por usos.** O consumo residencial apresenta dois tipos de usos⁸, os usos de calor (principalmente: cocção, água quente sanitária [ACS], aquecimento) que utilizam diferentes fontes de energias (combustíveis, eletricidade, energias renováveis) com potencial de substituição e os usos elétricos (iluminação, refrigeração, ar-condicionado etc.).

⁸ Ressalta-se que esta classificação se refere ao uso final e não ao combustível utilizado, podendo haver parte do aproveitamento de calor fornecido com energia elétrica. Pelo contrário, os chamados usos “elétricos” são apenas abastecidos por eletricidade.

Gráfico 5

► Consumo de energia final unitário, por uso e país, ano 2019, TJ/1.000 habitantes



Fonte: Elaboração própria baseada em dados de (EPE, 2019), (UPME, 2019), (SENER, 2022), (Engrinter, Mercados Energéticos Consultores, Datum, 2016) e (Fundación Bariloche, 2020).

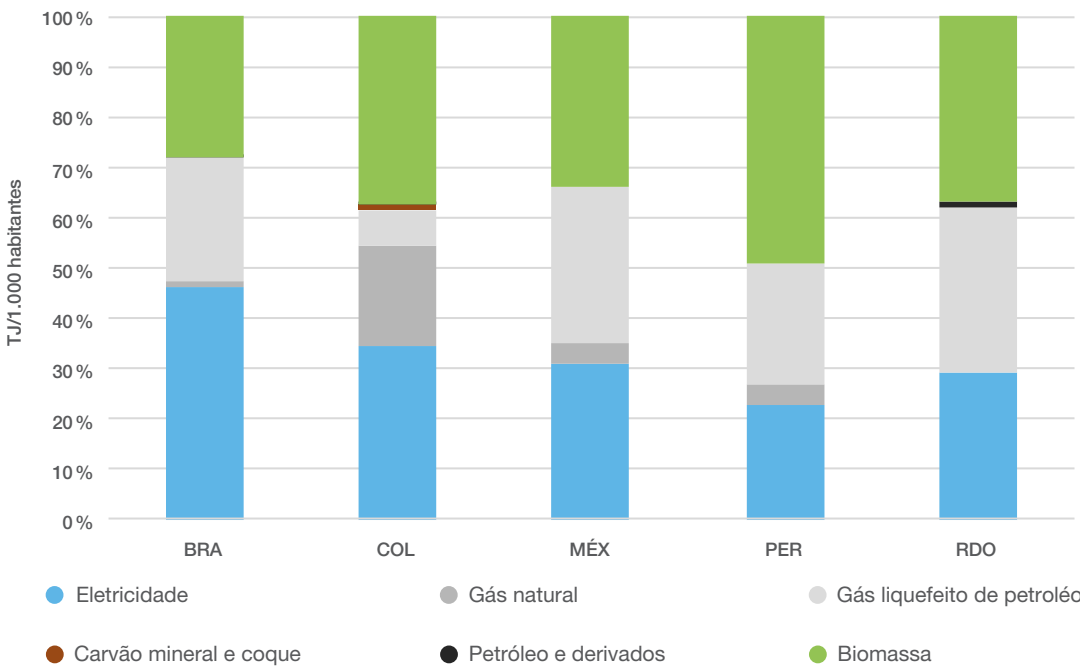
Nos países estudados, a cocção é a utilização com maior consumo de energia final no setor residencial, ultrapassando os 50% do mesmo em todos os casos, enquanto o consumo de aquecimento e de força motriz é muito inferior. Além disso, o uso do aquecimento de água não é muito significativo na Colômbia, no Peru e na República Dominicana.

O consumo energético residencial se posiciona entre 5 e 6 TJ/1.000 habitantes nos cinco países.

- **Consumo por combustíveis.** De uma forma geral, o setor residencial apresenta um elevado consumo de biomassa, nomeadamente para uso culinário, devido à sua disponibilidade e ao nível de desenvolvimento dos países analisados. Embora o consumo de energia elétrica esteja a aumentar, não é o combustível predominante no setor.

Gráfico 6

► Consumo de combustível no setor residencial, por país, ano 2019, %



Fonte: Elaboração própria baseada em dados do sieLAC, OLADE.

Premissas

Os usos de calor e os usos elétricos, que respondem a diferentes dinâmicas históricas e potencial evolução futura, são analisados separadamente . As seguintes subseções descrevem a metodologia de projeção utilizada para cada uso. A modo ilustrativo, apresentam-se gráficos de correlação correspondente ao caso da Colômbia. Este processo foi replicado para cada país do estudo.

Usos de calor

As utilizações de calor, onde a cozedura predomina sobre o aquecimento de água e as utilizações de aquecimento, apresentam um grande potencial de **eletrificação**. Substituir o uso da lenha pode gerar grandes lucros em **eficiência**¹⁰.

A Cocção

São analisadas as tendências históricas de consumo em termos de energia útil¹¹ por 1.000 habitantes, que são usadas para a projeção para o futuro. São propostos supostos de substituições de combustíveis por cenário (que correspondem à substituição da lenha por aparelhos elétricos de cozinha ou a gás natural).

⁹ Ao analisar a elasticidade-renda do consumo residencial final per capita em relação ao PIBpc em cada um dos países analisados, conclui-se que esta não é uma boa estimativa para projetar o consumo residencial e é necessário analisar os usos de calor por um lado e os usos elétricos, por outro lado.

¹⁰ A substituição por energia elétrica (ou gás natural) gera aumento na relação energia útil/energia final, o que promove diminuição da intensidade energética (consumo energético per capita).

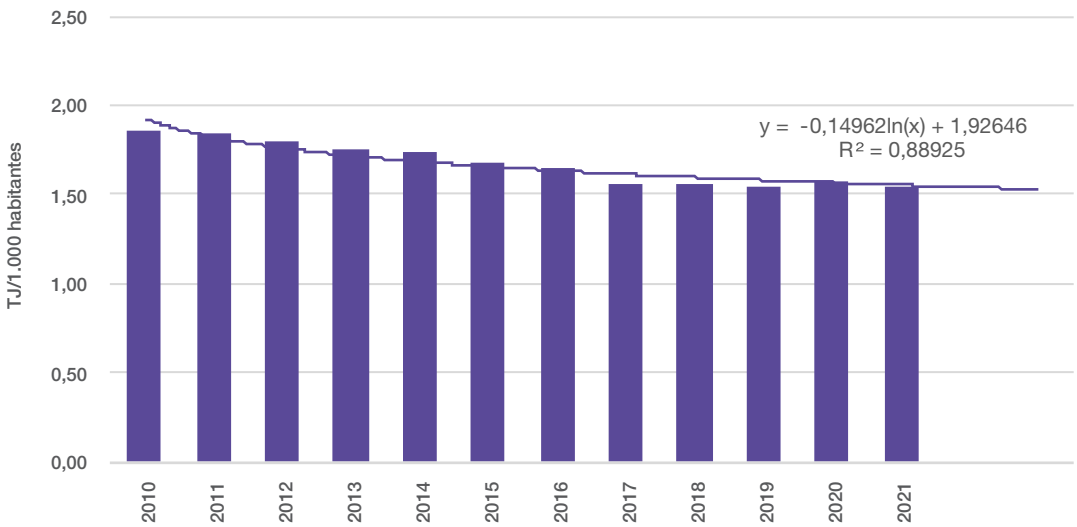
¹¹ Segundo OLADE, BID, 2017, energia final “é a quantidade de fonte de energia que é consumida em cada um dos setores econômicos e sociais do país”. Por outro lado, energia útil “é a quantidade de energia efetivamente utilizada para cumprir a tarefa produtiva do equipamento ou dispositivo de consumo, por exemplo, o calor necessário que os alimentos devem absorver para cozinhar”.

Tendências históricas de consumo em termos de energia útil

O gráfico 7 exemplifica a análise do consumo histórico de combustível por 1.000 habitantes para os usos de calor na Colômbia, assim como a projeção considerada para este caso (veja a equação).

Gráfico 7

► Colômbia: evolução do consumo de energia útil per capita para usos de calor, entre 2010 e 2021, TJ/1.000 habitantes



Fonte: Elaboração própria baseada em dados do sieLAC, OLADE.

A tendência histórica decrescente ilustra tanto os ganhos de eficiência energética na utilização da cozinha (utilização de equipamentos mais eficientes) como as mudanças comportamentais (tendência para cozinhar durante menos tempo), que deverão continuar no futuro¹².

Supostos de substituições de combustíveis

O combustível utilizado (efeito substituições) dependerá tanto do país em estudo como do cenário e atingirá níveis mais elevados de eletrificação nos cenários NZ e uma tendência semelhante à histórica no cenário BAU, conforme ilustrado na tabela 2 (os objetivos são expressos em termos de energia útil).

Tabela 2

► Supostos de substituição por combustível, país e cenário, uso cocção

	País	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Lenha	Todos	Substituição integral da lenha a longo prazo (substituição acelerada para cenários NZ).		
Eletricidade	Todos	2060: baixa penetração elétrica (≤40 %), exceto Brasil (50 %).	2050 e 2060: principalmente elétrico (≥80 %).	
GN e GLP	Todos	2060: alta penetração de GN e GLP (≥50 %). 50 % para Brasil. Só GLP para República Dominicana.	2050 e 2060: participação restante. República Dominicana: só GLP.	

Fonte: Elaboração própria.

¹² Ao analisar a tendência histórica, considera-se que já estão incorporados elementos de eficiência energética devido à utilização de equipamentos mais eficientes, o que reduz a energia final demandada. Portanto, não foram feitas suposições adicionais de eficiência no segmento de cocção.

Os cenários NZ propõem maior ambição na substituição de combustíveis, principalmente por meio da eletrificação, melhorias na eficiência energética e mudanças de comportamento. Isso implica um aumento significativo na demanda de eletricidade. As tecnologias não fósseis são fundamentais para alcançar os níveis baixos de emissões necessários.

B Água quente sanitária

Embora represente atualmente um uso menor na América Latina, entende-se que o aumento do poder de compra (PIB per capita) poderá ser acompanhado por um aumento no consumo per capita de água quente sanitária no futuro.

Nos países da União Europeia (que, em geral, têm um PIB per capita semelhante ao objetivo de PIB per capita de longo prazo definido para os três cenários), a intensidade energética para o consumo de água quente sanitária atinge uma média de 3,5 TJ/1.000 habitantes e é muito variável entre os diferentes países. Nos cinco países estudados, Brasil e México partem de um consumo de 0,8 TJ/1.000 habitantes enquanto os demais, de um consumo inferior a 0,2 TJ/1.000 habitantes. Dos países da União Europeia toma-se como referência o consumo útil de energia em Portugal (1,4 TJ/1.000 habitantes, ano 2019), por ser um país com um clima semelhante ao da região e por cumprir os indicadores de os países-alvo definidos ao estimar o crescimento do nível de atividade.

No caso do Brasil, Colômbia, Peru e México, para o cenário BAU, foi decidido utilizar uma meta de 75% do consumo atual de Portugal em energia útil até o ano 2060 e a atual quota de combustível é preservada para esta utilização. A poupança de 25% corresponde a uma melhoria de eficiência de 0,7% anualmente em comparação com a situação atual, em linha com o intervalo gerido pela Agência Internacional de Energia (AIE). Este uso é considerado fortemente elétrico, pois é um uso que será desenvolvido quase que integralmente.

Por outro lado, uma melhoria ainda maior na eficiência, 50%, deverá ser alcançada para os cenários NZ. O consumo de combustíveis fósseis nestes casos é eliminado, sendo o restante elétrico e solar (60% e 40%, respetivamente).

Por outro lado, na República Dominicana, o aumento do consumo de aquecimento de água foi considerado proporcional ao aumento do PIB porque se entendeu que maior riqueza leva a maior conforto; contudo, esta utilização não será desenvolvida ao nível dos países-alvo devido ao clima quente.

C Aquecimento

À semelhança do ponto anterior, os países hoje estudados apresentam consumos de aquecimento muito inferiores ($\leq 0,2$ TJ/1.000 habitantes). Em Portugal, a utilização para aquecimento ultrapassa os 3,7 TJ/1.000 habitantes em energia final (2,2 TJ/1.000 habitantes em energia útil). Mais uma vez, para a Colômbia, Peru e México, considera-se uma meta de 75% do consumo atual em Portugal até 2060 (ou seja, uma melhoria de eficiência de 0,7% anualmente face à situação atual, em linha com o intervalo gerido pela AIE). Para os cenários NZ, deverá ser alcançada uma melhoria de eficiência ainda maior, de 50%.

Por se tratar de um uso a ser desenvolvido, entende-se que entrarão no mercado tecnologias com custos mais competitivos. Assim sendo, prevê-se que o aquecimento seja maioritariamente elétrico por se tratar de um consumo que será desenvolvido quase de raiz.

Dado que grande parte da população brasileira vive em zonas com climas mais quentes que Portugal, os objetivos definidos para este país são inferiores aos objetivos selecionados para a Colômbia, o Peru e o México. Finalmente, o uso de aquecimento não é esperado na República Dominicana devido ao seu clima quente.

Usos elétricos

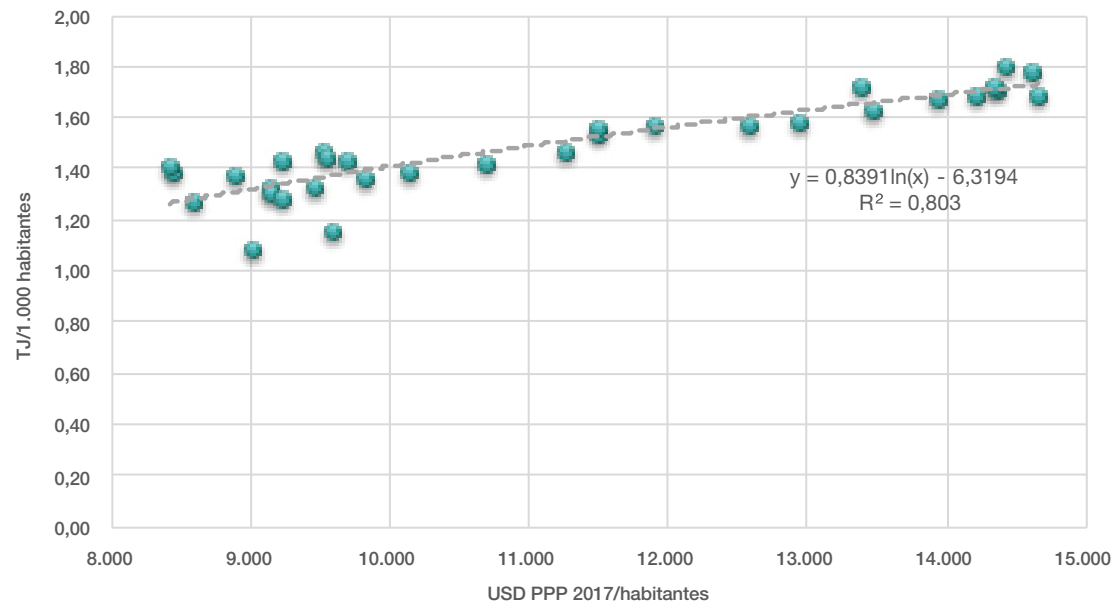
Os usos eléctricos¹³ (iluminação, refrigeração, aire acondicionado, bombeamento de água, etc.) não apresentam potencial de substituição. O futuro aumento do PIB per capita pode ser acompanhado pela eficiência energética (EE), mas também pelo consumo adicional de eletricidade (aquisição de novos eletrodomésticos, ar-condicionado, etc.).

¹³ Dentro deste ramo existem as seguintes categorias: eletrônica, força motriz, iluminação, outros, refrigeração e televisão.

Para projetar o consumo elétrico, foi feita uma regressão contra o PIBpc, em termos de **energia final**¹⁴, como se mostra no gráfico 8 para o caso colombiano. Esta elasticidade histórica reflete o aumento dos usos elétricos com o nível de vida e é idêntica nos três cenários.

Gráfico 8

► **Colômbia: regressão consumo eletricidade vs. PIBpc, período entre 1990 e 2019**



Fonte: Elaboração própria baseada em dados do sieLAC, OLADE.

¹⁴ Os usos elétricos, para os quais não existe potencial de substituição por outros combustíveis, devem ser analisados em termos de energia final, enquanto os usos térmicos devem ser analisados em termos de energia útil para eliminar o impacto da eficiência de cada combustível/processo ao considerar substituições.

Por outro lado, foram propostos supostos de eficiência energética por cenário.

- i. **Cenário BAU.** Considera-se entre 0,5 % e 1,0 % anual para todos os usos.
- ii. **Cenários NZ 2050 y NZ 2060.** Prevê-se uma melhoria em eficiência superior, entre 1,0 % e 1,5 %, para atingir as metas de neutralidade de carbono.

Para referência, de acordo com a IEA (IEA, 2022), a eficiência energética (EE) no setor residencial melhorou a uma taxa entre 1,5 % e 2,0 % anualmente no período entre 2000 e 2015 e apenas 0,5 % anualmente entre 2016 e 2020.



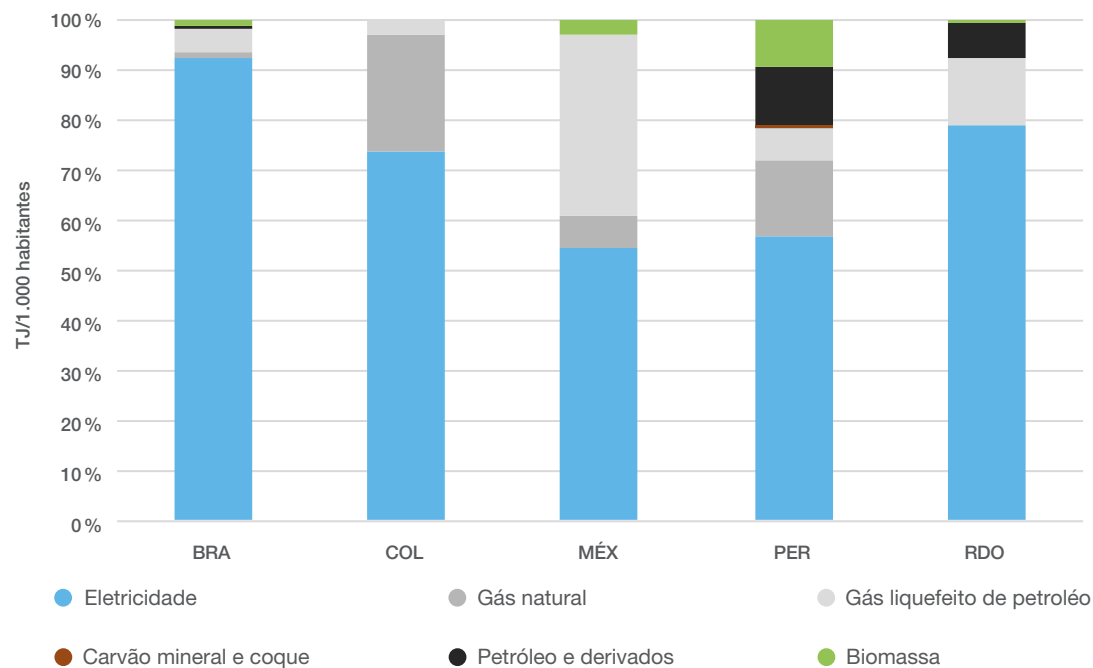
Setor comercial, serviços e público

Ponto de partida

O setor comercial, de serviços e público é composto por vários subconjuntos; por exemplo, administração pública, hospitais, hotéis e lojas. Geralmente é um setor de baixo peso em termos de consumo de energia ($\leq 7\%$ do total, em 2019) em comparação com os setores de transportes, industrial e residencial. O Gráfico 9 apresenta o consumo final por combustível e por país. É um setor com grande participação elétrica.

Gráfico 9

► Consumo de combustível por país, setor comercial, serviços e público, 2019



Fonte: Elaboração própria con base en los datos del sieLAC (OLADE) y balances energéticos nacionales.

Premissas

Para estimar o consumo de energia do setor comercial, partiu-se do consumo do ano de 2019 e projetou-se a intensidade energética **obtida para o ano base a partir do crescimento do PIB, por fonte**, sem diferenciação por uso final. Diferentes premissas são propostas em relação à eficiência energética e à substituição de combustíveis.

Para o cenário BAU de todos os países, foi considerada uma melhoria de eficiência de 1% ao ano, pois entende-se que melhorias semelhantes se aplicam às detalhadas no setor residencial, chegando a 34% acumuladas no período.

Para os cenários NZ 2060 e NZ 2050, consegue-se uma maior penetração de energia elétrica no final do período. Além disso, foi considerada uma melhoria na eficiência de 1,6% e 2,2% anualmente respectivamente, conseguindo em ambos os cenários uma redução total no consumo de energia devido à eficiência energética média de 50% no final do período.

Tabela 3

► Principais premissas de transição energética por cenário: setor comercial, serviços e público

	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Eficiência energética	-1 % anual (-34 % acumulado a 2060)	-2,2 % anual (-50 % acumulado a 2050)	-1,6 % anual (-50 % acumulado a 2060)
Substituições	Leve eletrificação do setor	2050 e 2060: o consumo elétrico desloca quase totalmente os combustíveis fósseis.	

Fonte: Elaboração própria.



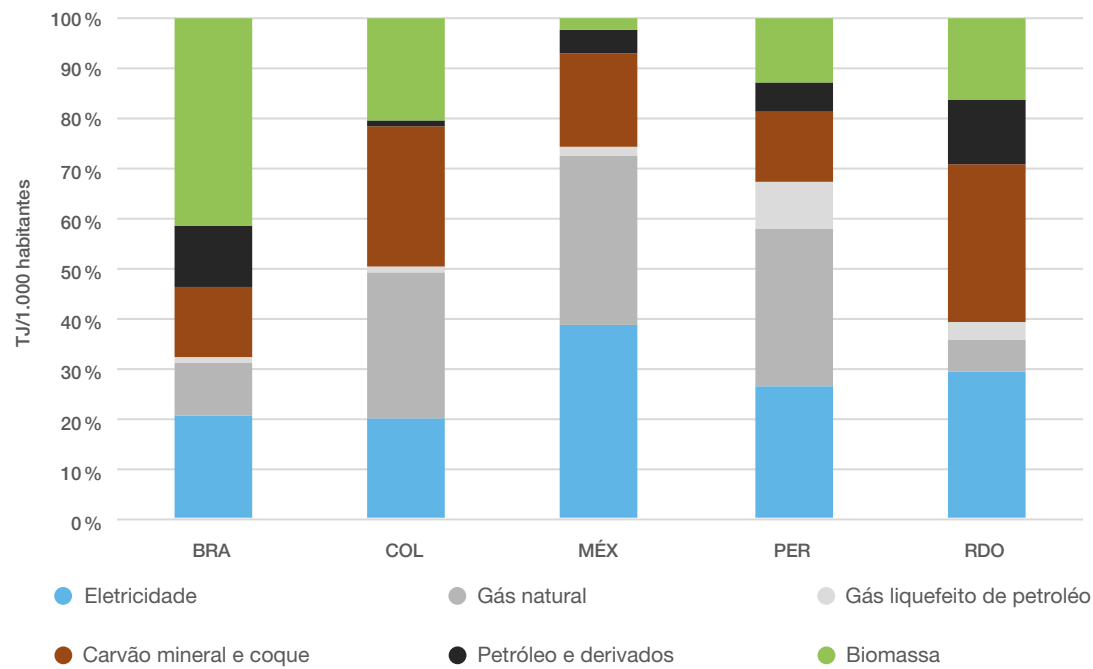
Setor industrial

Ponto de partida

Em todos os países estudados, o setor industrial é o segundo com maior procura de energia, depois do setor dos transportes. Há normalmente uma baixa penetração de energia elétrica, condicionada por vários setores de difícil eletrificação, por exemplo, as indústrias siderúrgica e cimenteira.

Gráfico 10

► Consumo de combustível no setor industrial, por país, ano 2019



Fonte: Elaboração própria baseada em dados do sieLAC, OLADE.

Premissas

A indústria foi projetada com informações de consumo de energia para 2019 desagregadas com um dígito da Classificação Industrial Uniforme Internacional (ISIC) além do PIB setorial, por ramo de atividade. Por sua vez, para cada ramo industrial, o consumo é desagregado por usos finais.

Para a **projeção** do consumo de energia é utilizado o **crescimento esperado do PIB, juntamente com a intensidade energética por ramo** e uso que foi obtida para o ano de 2019, principalmente a partir dos balanços energéticos finais e úteis disponíveis. Tomou-se como premissa que os ramos de atividade manterão sua participação no PIB industrial total durante o horizonte de planejamento¹⁵.

As medidas de transição centram-se em **melhorias em termos de eficiência e substituição de combustíveis**. A eficiência energética é modelada através da redução da intensidade energética enquanto as substituições entre combustíveis são feitas em termos de energia útil, com taxas de participação anuais.

No caso da substituição de combustíveis, além da eletrificação, surgem como adequadas a alternativa solar para aquecimento indireto (aquecimento de águas) e o gás natural em substituição do carvão.

Nos casos em que o carvão não pode ser substituído, podem ser consideradas tecnologias de captura e armazenamento de carbono a longo prazo. A eficiência energética é alcançada graças à otimização do uso de energia nos processos industriais e à mudança tecnológica para dispositivos e instalações mais recentes e eficientes.

É importante lembrar que as possibilidades de substituição podem variar muito de um subconjunto para outro, dada a variedade de processos industriais existentes. Para a realização das projeções, os subconjuntos industriais foram agrupados em um número limitado de setores (menos de 10).

A análise centrou-se mais detalhadamente nos subconjuntos mais consumidos e nas utilizações associadas. Os principais setores e utilizações tendem a ser semelhantes em todos os países estudados. O setor alimentar, das bebidas e do tabaco é normalmente um dos maiores consumidores de energia, juntamente com os setores do ferro e das ligas, dos minerais não metálicos (em particular, do cimento) e de diversas indústrias.

¹⁵ Esta premissa implica que as mudanças estruturais no setor industrial não são modeladas e a mesma taxa de crescimento do PIB é aplicada a todos os ramos de atividade.

No setor alimentar, das bebidas e do tabaco, o calor (direto ou indireto) é a maior procura energética. Geralmente, esta energia é fornecida por caldeiras de combustíveis fósseis que aquecem água ou geram vapor ou pela transferência de calor de gases quentes de combustão.

O aquecimento direto também é usado em algumas aplicações. Esse calor é utilizado em diversas etapas do processamento de alimentos como pasteurização, esterilização, secagem e cozimento, entre outras. Existem tecnologias de aquecimento elétrico, que permitem uma maior eletrificação deste subconjunto.

Para os setores do cimento e do ferro e ligas, foi proposta principalmente a substituição dos combustíveis atuais (geralmente combustíveis sólidos como o carvão mineral e o coque de petróleo) pelo gás natural, bem como um ligeiro aumento da quota de eletricidade (IEA, 2021).

As hipóteses consideradas por país e por subconjunto estão resumidas na tabela 4. Estas hipóteses levam em conta tanto as particularidades dos subconjuntos como dos países.



Tabela 4 Principais premissas de transição energética, por país e cenário, setor industrial

	País	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Eficiência energética	Todos	Melhora da intensidade energética sobre a energia útil		
		• -0,5 % anual • -19 % acumulado	• -1 % anual • -27 % acumulado	• -1 % anual • -34 % acumulado
Substituições por país	Todos	Em função das tendências históricas	• Óleo combustível e diesel: substituição total por GN e GLP entre 2019 e 2035. • Carvão: substituição parcial ou total por GN e eletricidade.	
	COL	Para os ramos industriais com alta penetração de carvão: • Com potencial de substituição: redução forte do consumo (maior em NZ) e substituição parcial por GN. • Com baixo potencial de substituição: são consideradas tecnologias de captura e armazenamento de carbono a longo prazo nos cenários NZ (AIE).		
Substituições por subsetor	Alimentos, bebidas, tabaco	Aumento do peso da eletricidade e da energia solar, em linha com processos com potencial elétrico no setor (secagem, torrefação, etc.)		
	Cimento, cerâmica	• Cimento: setor mais difícil de eletrificar. Substituição parcial do carvão pelo gás. • Cerâmica: potencial de conversão a fornos elétricos.		
	Indústrias várias	Grande heterogeneidade deste grupo. Substituição do carvão (e da biomassa) por GN, GLP e eletricidade.		
	Ferro e ligas metálicas	Substituição dos combustíveis atuais por gás natural e leve incremento na participação elétrica.		

Fonte: Elaboração própria.



Setor transporte

Ponto de partida

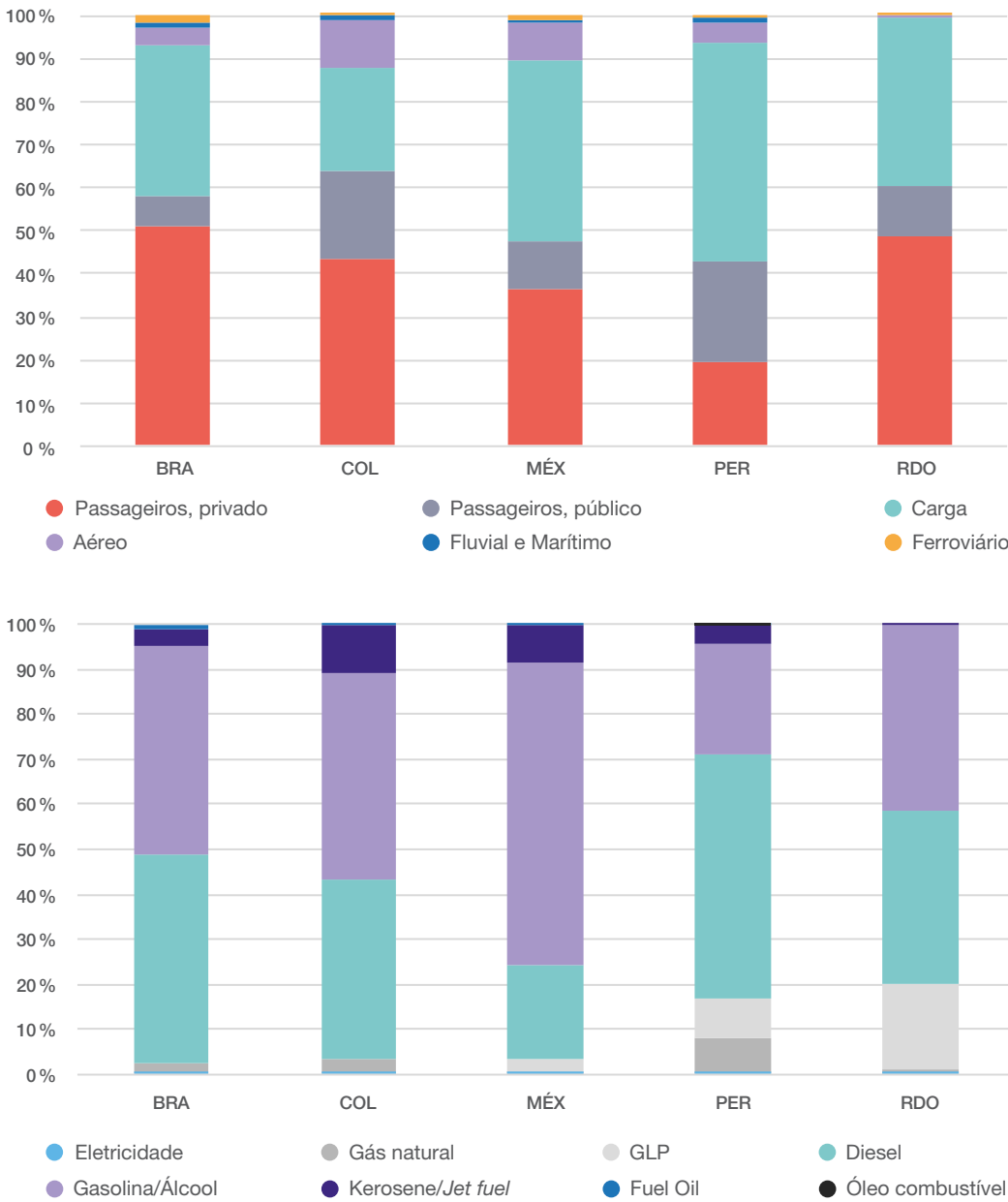
O setor de transportes é o maior consumidor de energia e emissor de gases de efeito estufa nos cinco países estudados. Consome principalmente combustíveis líquidos (diesel, gasolina, etc.). Embora as vendas de veículos elétricos tenham aumentado em vários países nos últimos anos, estes veículos representam uma baixa proporção do consumo final nos países em estudo.

O transporte rodoviário representa mais de 85% do consumo total, liderado pelo transporte rodoviário de passageiros (com exceção do Peru, onde o transporte de mercadorias representa mais de metade).



Gráfico 11

► Demanda de energia por uso e por combustíveis, setor transporte, ano 2019



Fonte: Elaboração própria baseada em dados do siELAC (OLADE), balanços energéticos nacionais e balanços de energia útil.

Premissas

O setor transporte é projetado conforme a seguinte estrutura para refletir os principais motores que variam segundo cada segmento:

- transporte rodoviário de passageiros (carros, motos, ônibus, etc.);
- transporte rodoviário de cargas (camiões, caminhões trator);
- outros (aéreo, marítimo e fluvial, ferroviário).

Transporte rodoviário de passageiros

Para estimar o nível de consumo de energia ou nível de atividade do setor do transporte ferroviário de passageiros, estimou-se o seguinte:

- a **evolução da frota automotriz** (quantidades de motos, carros, camionetes, ônibus, etc.); a quantidade de veículos privados é idêntica nos três cenários, e
- o **consumo médio por veículo** calculado como percurso médio anual dividido o rendimento no km por unidade de energia.

A Projeção da frota automotriz de passageiros

i. Transporte privado (motos, carros, camionetes)

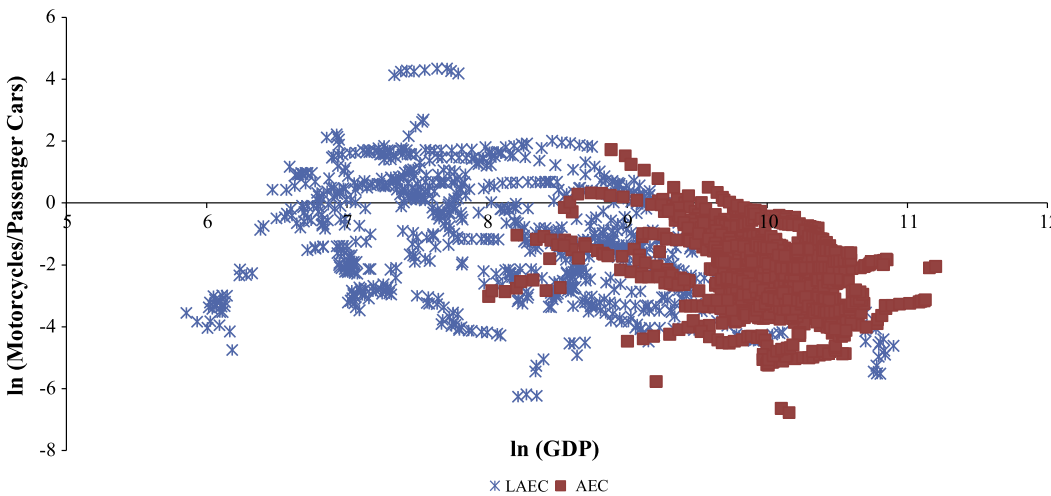
Dada a análise das correlações entre o PIB per capita, o IDH e o consumo de eletricidade (ver “Anexo. Aspectos metodológicos detalhados”), foi assegurada a identificação de países com elevado grau de desenvolvimento. Desta forma, foram obtidos dados sobre o número de automóveis e motocicletas por 1.000 habitantes nos países desenvolvidos e estimou-se uma média de 635 unidades. Esta média foi utilizada como **ponto de saturação** a longo prazo (2060) e as

projeções foram feitas utilizando uma função logística logit para estimar o número de veículos de transporte privado no futuro.

Além disso, para estimar a quantidade de veículos por tipo (motos/carros), foram utilizadas as conclusões de Law (Law, 2015) sobre a relação entre a **quantidade de motos por cada 1.000 habitantes e o PIB per capita** que indica que esta relação tem uma forma de **“U” invertido**¹⁶. Este último implica que, inicialmente, o número de motocicletas por 1.000 habitantes tem uma relação positiva com o PIB per capita até atingir um máximo, a partir do qual, à medida que aumenta o nível de desenvolvimento dos países, o número de motocicletas começa a diminuir por 1.000 habitantes. e o número de carros aumenta.

Gráfico 12

► Relação entre a taxa de propriedade de motocicletas/automóveis e o PIB per capita



Fonte: Law, Hamid & Goh (2015).

16 Law, Hamid & Goh (2015), *The motorcycle to passenger car ownership ratio and economic growth: A cross-country analysis*

De acordo com a análise de Law (Law, 2015), a taxa de propriedade de motocicletas começa a diminuir a partir dos níveis do PIB per capita entre 4.000 e 6.000 dólares (medidos em dólares constantes de 2011). Dado que as nossas estimativas se baseiam no PIB/PPC de 2017, foram utilizados os PIB a preços constantes dos países em estudo e analisada a sua relação com os preços medidos em PPC. O valor estimado pela Lei equivale a valores entre USD 9.000 e USD 10.000 quando o PIB é medido de acordo com a PPP 2017.

Com base nas projeções do PIB per capita por país, foram tomados os valores apresentados anteriormente para utilizá-los como ponto máximo de saturação no número de motocicletas. Desta forma, cada país tem um número máximo de motocicletas atingido em um ano de acordo com o seu grau de desenvolvimento e crescimento esperado.

ii. Transporte público (ônibus)

Tal como acontece com o transporte privado, o número médio de veículos de passageiros por 1.000 habitantes nos países desenvolvidos foi considerado o ponto de saturação esperado dos países em desenvolvimento a longo prazo.

Tendo constatado que o ponto de saturação está localizado em 8 veículos de passageiros por 1.000 habitantes, foi tomada a referida saturação e realizada a projeção do número de ônibus por meio de um modelo econométrico baseado em uma equação do tipo logit e o ponto foi utilizado como valor de saturação. para os cinco países em estudo.

B Premissas de transição energética

As medidas de transição energética contempladas são:

- transição de **combustível usado**/tipo motor, que depende do tipo de veículo (motocicletas, carros, caminhões, ônibus) e do cenário. Em particular, uma das principais opções consideradas é a eletrificação da frota automóvel, que permite reduzir as emissões e o consumo total

(uma redução entre 75% e 80% do consumo por km). Da mesma forma, a utilização de veículos híbridos permite uma redução significativa no consumo de energia;

- melhoria do rendimento** dos veículos e da eficiência média da frota veicular como consequência dos avanços tecnológicos e/ou a redução de peso dos veículos por categoria, e
- redução dos percursos (km/tipo de veículo) como consequência da **digitalização** da sociedade (trabalho remoto, etc.) e do desenvolvimento do **transporte público**.

C Transição em termos de combustível utilizado

A União Europeia estabeleceu um acordo que garante que todos os carros e todas as carrinhas registadas na Europa a partir de 2035 devem ser amigos do ambiente (zero emissões)¹⁷. Embora a regulamentação não se aplique às motocicletas, espera-se que, para combater as alterações climáticas, seja adoptada uma política semelhante para este tipo de veículos. Além disso, outros países como a Índia, um dos maiores mercados de motocicletas do mundo, tomaram iniciativas neste sentido¹⁸. Neste contexto, supondo que na América Latina seja posta em prática uma medida similar a partir de 2045, é de esperar que em 2060 seja atingido 100 % da frota de motocicletas de origem elétrica.

No que diz respeito ao transporte público de passageiros, existem diversas iniciativas em todo o mundo para eliminar os veículos a combustão. Os Países Baixos, a Dinamarca e a Nova Zelândia lideram este movimento ao terem estabelecido metas para a compra de veículos 100 % elétricos a partir de 2025 e

¹⁷ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6462

¹⁸ <https://soymotero.net/noticia/a-partir-de-2025-en-india-solo-se-podran-vender-motos-electricas-28858/>

atingir uma frota totalmente elétrica até 2030. Na América Latina, a Colômbia e o Chile propuseram que 100 % das suas compras fossem elétricas a partir de 2035¹⁹. Neste enquadramento, foi projetado que, até ao ano 2060, em todos os cenários, todos os autocarros serão elétricos e que este objetivo será alcançado em 2040 nos dois cenários NZ em todos os países (tabela 5).

Quanto aos automóveis, veículos fora de estrada e caminhões, entende-se que é um segmento mais difícil de substituir. Embora se preveja que as vendas sejam quase totalmente elétricas em 2050, estima-se que a sua quota atinja 30 % elétrica e 20 % híbrida em 2060 para todos os países em estudo, onde os restantes 50 % dependerão da disponibilidade de recursos em cada país. Nos cenários NZ, uma contribuição de 80 % elétricos e 20 % híbridos deve ser alcançada até ao final do período.

No caso do Brasil, em linha com o programa de transição energética (CEBRI, 2023), espera-se maior utilização de biocombustíveis. No cenário BAU, espera-se que 20 % dos veículos sejam híbridos, outros 20 % sejam elétricos, 20 % utilizem diesel verde e o restante seja a gasolina até 2060. Para os cenários NZ, considerou-se que a participação será 20 % híbrido, 40 % elétrico e 40 % diesel verde até o ano horizonte.

D Melhoria de rendimento

Para determinar a eficiência da frota de veículos, considera-se o relatório de Eficiência Energética 2022 (AIE): “[...] A melhoria (redução) média anual do consumo de energia por quilómetro percorrido por passageiro (consumo específico de combustível) de 2000 a 2020 para automóveis e caminhões foi de 1,7 %, seguido por motocicletas e triciclos com 0,8 % e ônibus com 0,8 %.” Neste estudo, foram escolhidas premissas conservadoras no cenário BAU e foi estimada uma melhoria de 0,5 % ao ano na relação combustível km/galão.

¹⁹ <https://theicct.org/decarbonizing-bus-fleets-global-overview-of-targets-for-phasing-out-combustion-engine-vehicles/>

Por outro lado, para os cenários NZ, foi utilizado o balanço de energia útil do setor dos transportes (Unidade de Planeamento Minero Energética [UPME]), que especifica desempenhos máximos alcançáveis por tipo de veículos/combustíveis (melhores tecnologias disponíveis [BAT, sigla em inglês]). Tomou-se como premissa que, ao final do período de estudo, os desempenhos alcançados na frota de veículos são aqueles correspondentes à melhor tecnologia disponível hoje em dia.

E Redução dos percursos

Outro aspecto a considerar é o tipo de transporte utilizado pelos passageiros. No cenário BAU, está prevista a substituição do transporte ligeiro de passageiros por autocarros e transporte ferroviário. Além disso, o fenómeno da digitalização gera uma diminuição adicional no transporte privado de passageiros. Essas quedas chegam a 7,5 %, 2,5 % e 7,5 %, respectivamente. Nos cenários NZ, as ambições a este respeito devem ser duplicadas. Em resumo, foram consideradas as premissas da tabela 5.



Tabela 5

► Principais premissas de transição energética, por país e cenário, transporte de passageiros

	País	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Rendimento carros e camionetes	Todos	Melhoria de 0,5 % anual	Melhoria de 2,1 % anual	Melhoria de 1,6 % anual
Substituições de frota veicular por país	Brasil	Motos e ônibus: 100 % elétricos (2060). Carros e camionetas (2060): 20 % elétricos, 20 % híbridos, 20 % combustível sintético e 40 % gasolina.	Motos e ônibus: 100 % elétricos (2040). Carros e camionetas (2060): 40 % elétricos, 40 % combustíveis sintéticos e 20 % híbridos.	
	República Dominicana	Motos e ônibus: 100 % elétricos (2060). Carros e camionetes (2060): 30 % elétricos, 20 % híbridos e 50 % combustíveis fósseis, com maior penetração de GNC e GNL.	Motos e ônibus: 100 % elétricos (2040). Carros e camionetes (2060 RD): 65 % elétricos, 20 % híbrido, 5 % biodiesel e 10 % GLP/GNC	
	Resto	Motos e ônibus: 100 % elétricos (2060). Carros e camionetas (2060): 30 % elétricos, 20 % híbridos e 50 % combustíveis fósseis, com maior penetração de GNC e GNL.	Motos e ônibus: 100 % elétricos (2040). Carros e camionetes (2060): 80 % elétricos e 20 % híbridos.	
Percurso médio anual (redução a 2060 ou 2050)	Todos	Substituição por ônibus: -7,5 % Transporte ferroviário: -2,5 % Digitalização: -7,5 %	Substituição por ônibus: -15 % Transporte ferroviário: -5 % Digitalização: -15 %	
Transporte público	Todos	Frota existente projetada com base no crescimento histórico (regressão linear). Crescimento adicional na reposição de km de rotas para automóveis e motocicletas. Supõe-se que o ônibus transportará 10 vezes mais pessoas simultaneamente (UPME). No caso do transporte ferroviário, presume-se que o consumo de energia por passageiro-km seja 7 vezes inferior (Agência Francesa para o Ambiente e a Gestão da Energia [ADEME]). Ônibus 20 % a GNV em 2030. Ônibus 100 % elétricos em 2050 ou 2060.		

Fonte: Elaboração própria.

Transporte rodoviário de cargas

Para estimar o nível de consumo de energia ou nível de atividade do setor do transporte de mercadorias, estimou-se:

- a **evolução da frota automotriz** (quantidades de caminhões + caminhões trator) e
- o **consumo médio por veículo** calculado como percurso médio anual dividido o rendimento em km por unidade de energia. No caso do transporte de mercadorias, espera-se no futuro uma viagem média anual constante por veículo.

A Projeção da frota automotriz de cargas

Para estimar a evolução futura da frota de veículos de carga, foram realizadas regressões entre a frota de carga e o PIB dos países analisados. Foram observados altos graus de correlação entre os resultados que justificam a escolha do referido método para estimativa.

Da mesma forma, as frotas de transporte de cargas foram projetadas pelo método de regressão linear utilizando o PIB total (medido em PPC 2017) como variável independente.

O transporte de cargas é segmentado em dois tipos de caminhões: caminhões e carretas (caminhões-trator são aqueles utilizados para transportar grandes cargas; são vendidos com carretas separadamente). Caminhões e tratores mantêm peso relativo atual nas projeções.

B **Premissas de transição energética**

As medidas de transição energética contempladas são:

- **melhoria do desempenho do veículo;**
- **transição em termos de combustível utilizado**/tipo de motor, que depende do tipo de veículo (caminhão/trator) e do cenário. Os combustíveis da transição dependem do horizonte temporal considerado: GNV, GNL, eletricidade (a partir de 2023) e derivados de hidrogénio (a partir de 2040). O gás (GNC, GNL) desempenha um papel importante no período entre 2030 e 2040;
- **melhoria da logística e transferência para o transporte ferroviário** (que implicam uma redução do número de veículos; a média anual de viagens por camião e caminhão trator permanece constante).

As premissas contempladas são semelhantes entre os países, entendendo que todos os países atingem o mesmo nível de desenvolvimento económico e acesso a soluções tecnológicas.

As premissas específicas para o Brasil refletem as políticas atuais (foco no desenvolvimento de combustíveis verdes produzidos a partir de biomassa), enquanto na República Dominicana, distâncias mais curtas podem permitir uma maior eletrificação do setor de transporte de carga.

Espera-se uma menor penetração elétrica nos tratores-reboques do que nos camiões, uma vez que as soluções tecnológicas para o transporte de cargas muito pesadas ainda estão em desenvolvimento e a eletrificação nem sempre é uma solução.

Tabela 6 ▶ **Principais premissas de transição energética, por país e cenário, transporte de cargas**

	País	Tipo de veículo	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Rendimento	Todos		Melhoria de 0,2 % a 0,5 % anual conforme combustível	Melhoria de 0,4 % a 0,5 % anual conforme combustível.	
Logística e transferência	Todos		-	Melhorias logísticas: 10 % de camiões e camiões tratores. Transferência a ferroviário: 10 % de camiões e camiões tratores.	
Substituições de frota veicular por país	COL, PER, MÉX	Camiões	2060: 10 % elétricos, 40 % a GNC e 50 % diesel.	2050 o 2060: 80 % elétricos e 20 % a GNC.	
		Camiões tratores	2060: 50 % GNL e 50 % diesel.	2050 o 2060: 60 % elétrico, 30 % H ₂ (pilha de combustível) e 10 % GNC (diesel no MÉX).	
	RDO	Camiões	2060: 30 % elétrico e 70 % diesel.	2050 e 2060: 90 % elétrico e 10 % diesel.	
		Camiões tratores	2060: 10 % elétrico e 90 % diesel.	2050 e 2060: 70 % elétrico, 20 % H ₂ (pila de combustível) e 10 % diesel.	
	BR	Camiões	2060: 70 % diesel e 30 % <i>flex fuel</i> .	2050 e 2060: 50 % combustível verde e 50 % elétrico.	
		Camiões tratores	2060: 90 % diesel e 10 % <i>flex fuel</i> .	2050 e 2060: 20 % combustível verde, 40 % elétrico e 40 % H ₂ (pila de combustível).	

Fonte: Elaboração própria.

Setor aéreo, marítimo e fluvial, ferroviário

O consumo de energia do setor foi projetado a partir do crescimento do PIB global e da intensidade energética obtida para 2019, para cada tipo de transporte, por fonte e sem diferenciação por uso final, uma vez que a informação disponível não permite separar o consumo da frota (que são os consumos), mais importante) do consumo para outros usos de energia em terminais, armazenamento, logística, etc.

A Tabela 7 destaca as premissas para os setores aéreo, marítimo e ferroviário que se aplicam a todos os países do estudo. Estes são setores de transformação mais difíceis (em particular, os subsectores aéreo e marítimo/fluvial não são eletrificáveis com as tecnologias atualmente disponíveis, embora no futuro possam ser desenvolvidas novas tecnologias em alguns casos).

Algumas das opções de transição energética disponíveis para unidades de transporte são combustíveis sintéticos e amônia (derivados do H₂) ou combustíveis verdes para o Brasil (feitos a partir do hidrotratamento de óleos vegetais, processo Fischer-Tropsch, processos fermentativos ou oligomerização de álcoois²⁰).

A participação atual de combustíveis é mantida para o cenário BAU, enquanto o uso de combustíveis alternativos é desenvolvido para o cenário NZ. Para referência, a Europa anunciou recentemente novas regras que exigirão pelo menos 70% de combustíveis verdes até 2050 no setor da aviação.

20 https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT_Combustiveis_renovaveis_em_%20motores_ciclo_Diesel.pdf

Tabela 7

Principais premissas de transição energética por cenário, transporte aéreo, marítimo e fluvial, ferroviário

	BAU	NZ 2050 y NZ 2060
Aéreo	O crescimento é projetado com PIB e elasticidade de 0,95. A atual parcela de combustível é mantida.	O crescimento é projetado com PIB e elasticidade de 0,90. 40 % de combustível de aviação sustentável é incorporado.
Marítimo e fluvial	O crescimento é projetado com o PIB e elasticidade de 1,0. Mantém-se o <i>fuel share</i> atual.	O crescimento é projetado com PIB e elasticidade de 0,95. Penetração de 20 % de combustível sintético para substituir combustíveis fósseis.
Ferrovário	O crescimento é projetado com PIB e elasticidade de 1,0. É incorporada uma reclamação substituída para passageiros. A atual parcela de combustível é mantida.	O crescimento é projetado com PIB e elasticidade de 0,95. Incorpora-se uma demanda substituída por caminhões e passageiros. Eletrificação total do consumo.

Fonte: Elaboração própria.



Setor agropecuário, pesca, mineração e construção

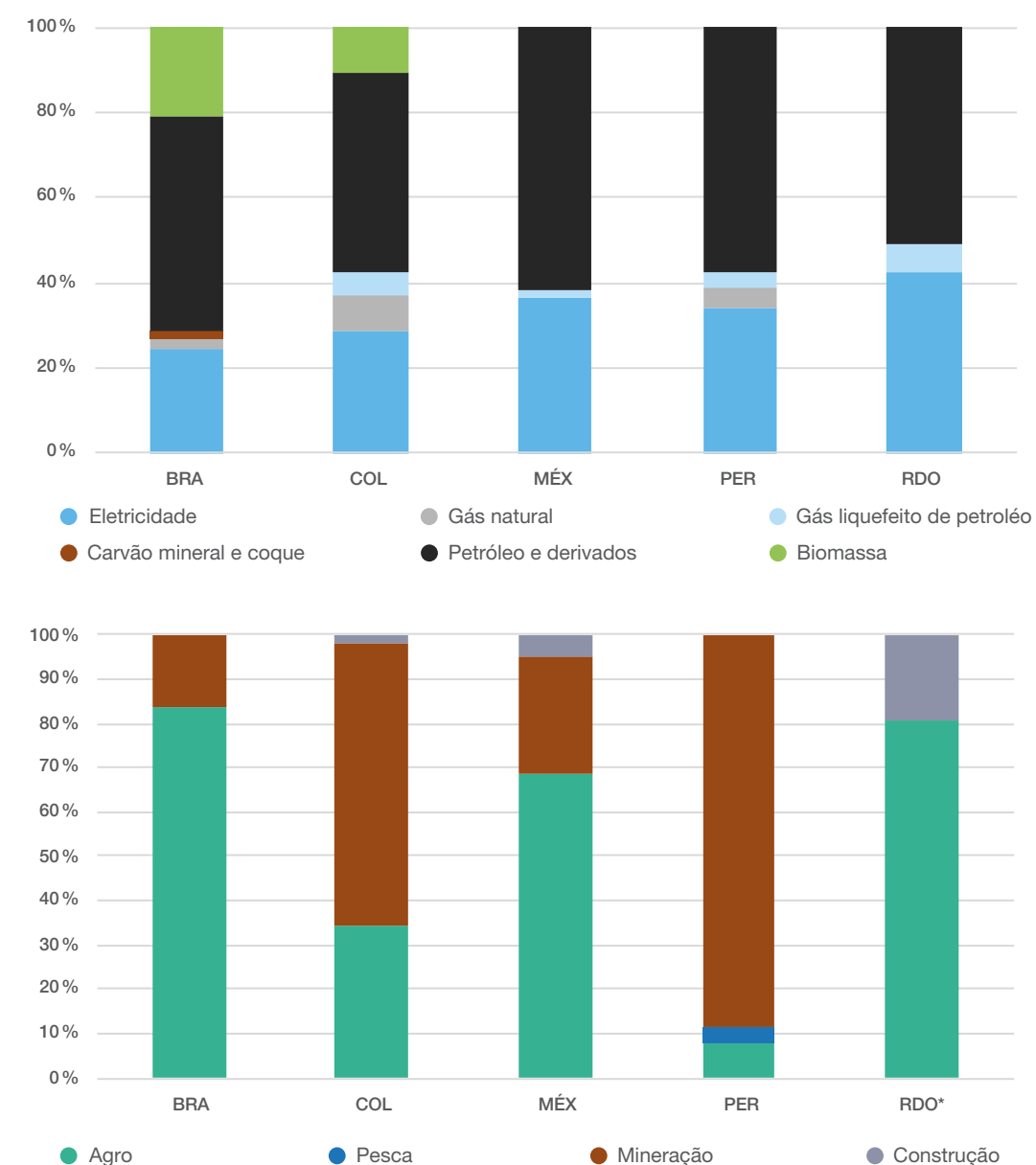
Ponto de partida

Os setores agrícola, pesqueiro, mineiro e de construção representam, juntamente com os setores comercial, de serviços e público, os setores com menor consumo de energia nos países analisados. A eletrificação do setor é normalmente baixa, exceto no Peru onde ultrapassa os 72% na energia final. Dentro deste setor existem embarcações de pesca, que representam um segmento muito difícil de descarbonizar. Ao olhar a demanda por subconjunto, é possível perceber a importância do setor agrícola, especialmente no Brasil, no México e na República Dominicana, enquanto a Colômbia e o Peru se destacam por terem alto consumo relacionado à mineração.

O setor de transportes é o maior consumidor de energia e emissor de gases de efeito estufa nos cinco países estudados. Para estimar o nível de consumo energético do setor de transporte rodoviário de passageiros e cargas, foi estimada a evolução da frota de veículos, a distância média percorrida e o consumo energético por veículo. A análise considera ações de transição em termos de substituição de combustíveis, melhorias de desempenho e redução das distâncias percorridas.

Gráfico 13

► Consumo por combustível e por subsetor no setor agropecuário, pesca, mineração e construção, ano 2019, %



Fonte: Fonte: Elaboração própria baseada em dados do sieLAC, OLADE.

*Para República Dominicana, não tem diferenciação entre os setores agropecuário, pesca e mineração. Para o Brasil, Colômbia e México, não há informação sobre o consumo do setor pesca. No Brasil e Peru, a demanda do setor construção está incluída no setor industrial.

Premissas

O consumo de energia deste setor foi **projetado com base no crescimento do PIB e na intensidade energética** obtida para o ano de 2019, sem diferenciação por uso final. As medidas de transição consideradas foram melhorias em termos de eficiência energética e substituição entre combustíveis, dependendo do país em estudo e da sua situação inicial.

Para o cenário BAU, em todos os países, foi considerada uma melhoria de eficiência de 1% ao ano, chegando a 34% acumulada no período.

Para os cenários NZ 2060 e NZ 2050, é alcançada uma maior penetração elétrica no final do período. Além disso, foi considerada uma melhoria de eficiência de 1,6% e 2,2% ao ano respetivamente, atingindo, em ambos os cenários, uma redução total do consumo de energia devido às medidas de eficiência energética de 50% no final do período.

Tabela 8

► Principais supostos de transição energética por cenário, setor agropecuário, pesca, mineração e construção

	BAU	NZ 2050	NZ 2060
Eficiência energética	Melhoria da intensidade energética sobre a energia útil.		
	-1 % anual -34 % acumulado	-2,2 % anual -50 % acumulado a 2050	-1,6 % anual -50 % acumulado a 2060
Substituições por país (aumento da taxa de eletrificação)	Maior eletrificação alinhada com tendências históricas	COL e PER: ≥90 % eletrificação (alto peso do setor mineração). BRA, MÉX e RDO: eletrificação entre 60 % e 75 %. Alguns subsectores são mais difíceis de eletrificar.	

Fonte: Elaboração própria.



Setor elétrico

Ponto de partida

De acordo com dados de 2019, a geração de eletricidade no Brasil, na Colômbia e no Peru provém predominantemente de fontes hidrelétricas, enquanto no México e no Peru há uma grande porcentagem de geração a gás. A República Dominicana, por sua vez, vê uma combinação de geração a partir de carvão, gás e combustíveis líquidos.

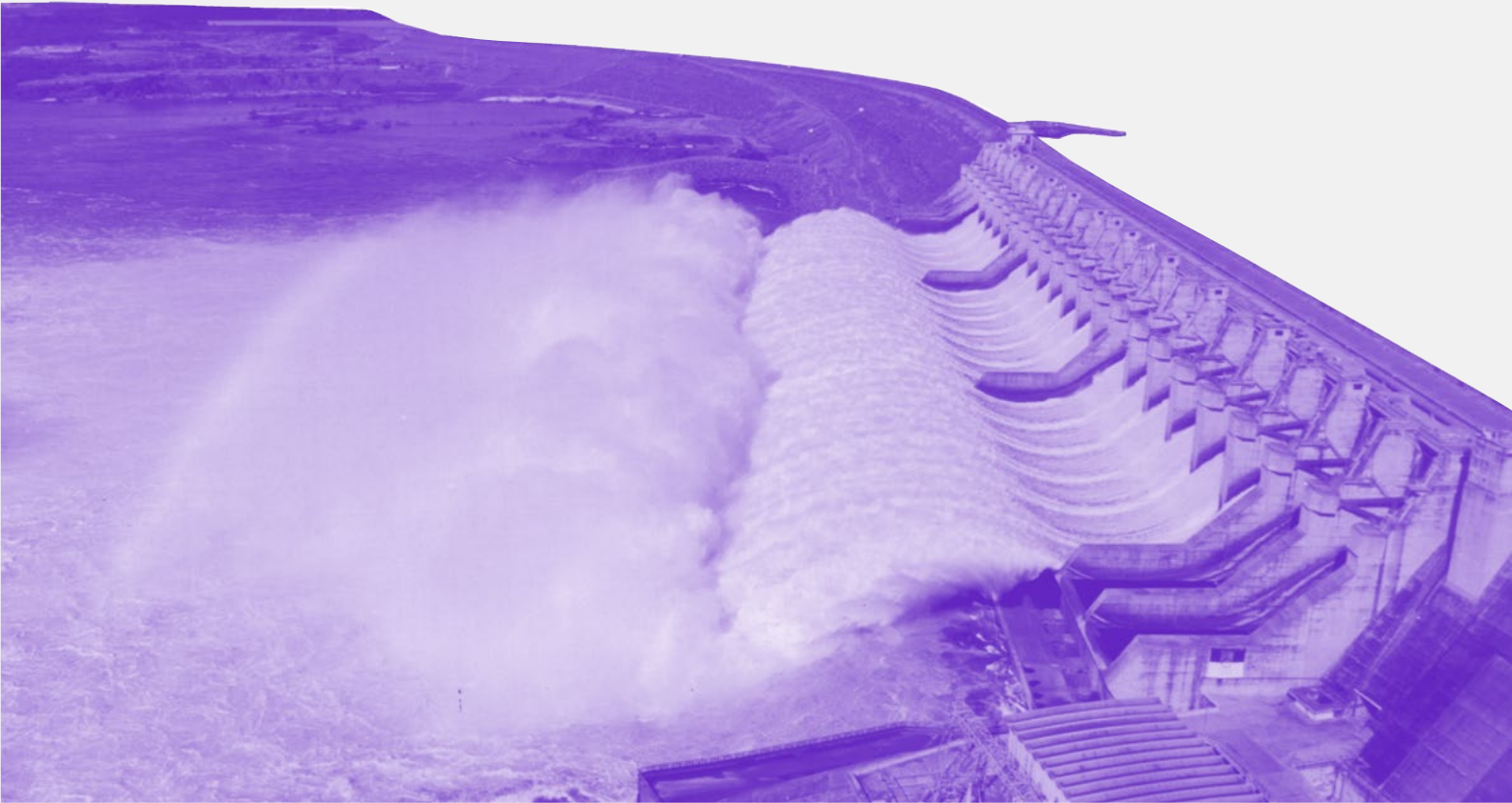
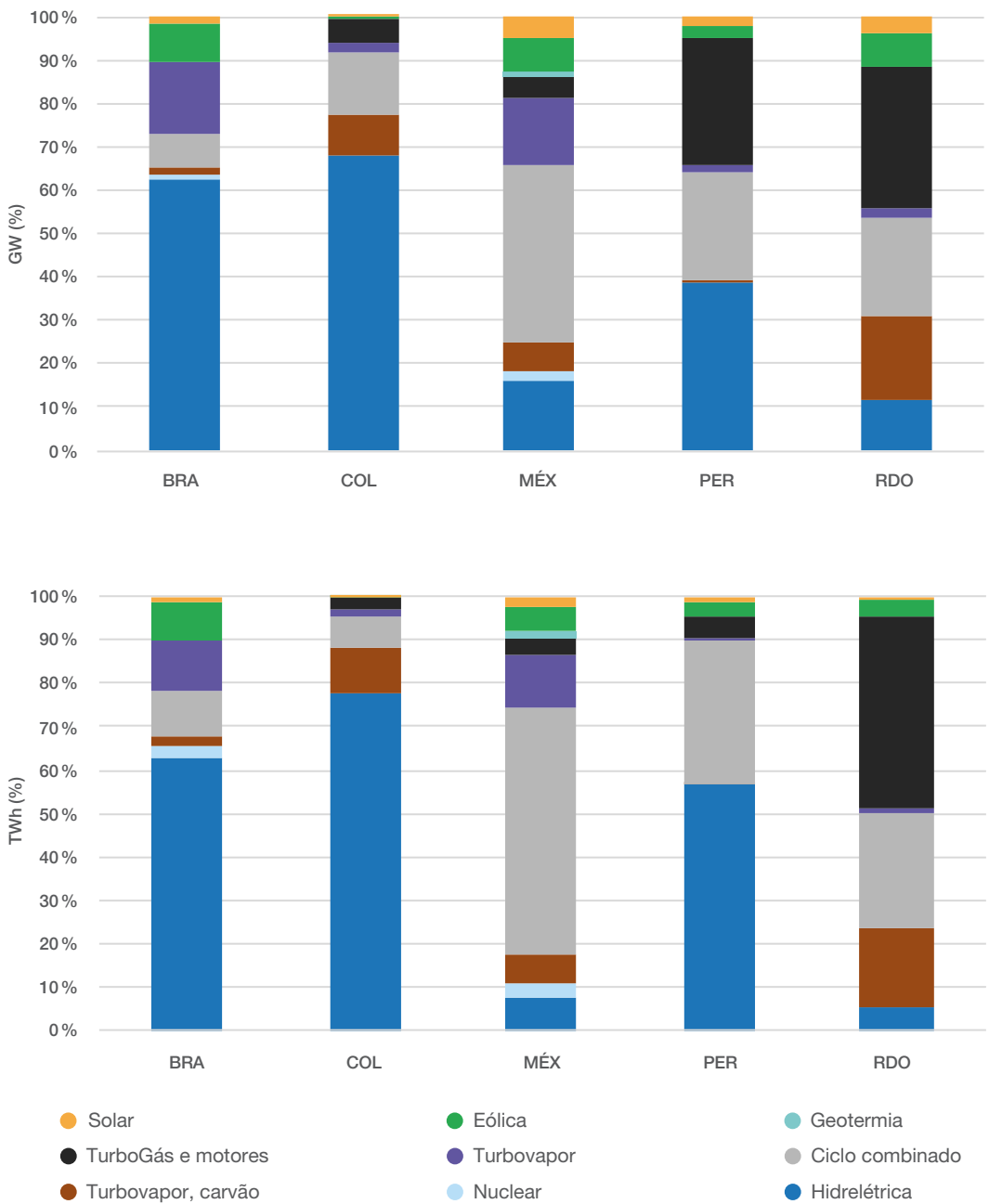


Gráfico 14

► Capacidade instalada e geração elétrica, ano 2019, %

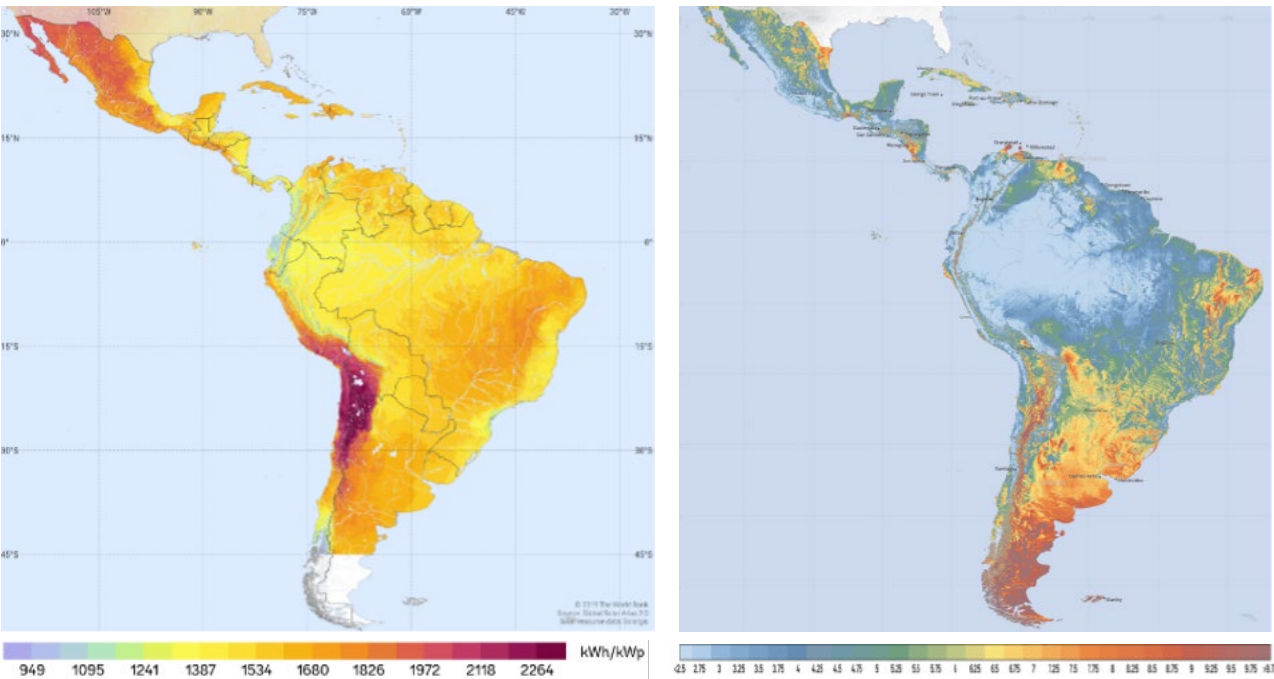


Fonte: Elaboração própria baseada em dados do sieLAC, OLADE.

No que diz respeito às energias renováveis, o Brasil, a Colômbia e o Peru destacam-se pelo seu grande potencial hidroelétrico, o México tem um grande potencial solar e a República Dominicana tem um potencial eólico e solar limitado pela sua disponibilidade de terrenos (a energia eólica offshore pode ser uma opção interessante). A Figura 15 ilustra os recursos solares e eólicos na região.

Gráfico 15

► Recurso solar potencial (kWh/kWp) e velocidade média do vento a 100 m (m/s)



Fonte: Global Solar Atlas (Banco Mundial)²¹ y Atlas eólico mundial (Banco Mundial)²².

²¹ Global Solar Atlas, Grupo del Banco Mundial, <https://globalsolaratlas.info/download/latin-america-and-caribbean>

²² [ws_LAC.pdf](#)

Premissas

O ponto de partida foi a composição atual da capacidade instalada e da geração. No curto e médio prazo, o desenvolvimento do setor elétrico considera projetos em construção ou vencedores de leilões que já apresentam um altíssimo grau de certeza e progresso. No futuro, a expansão do parque gerador dependerá:

- a competitividade relativa das opções de expansão (considera-se que os projetos renováveis, particularmente solares e eólicos, se tornam cada vez mais competitivos devido à redução prevista nos seus custos de construção e desenvolvimento);
- o potencial máximo de desenvolvimento de projetos por tecnologia, divulgado a nível nacional e que é considerado um limite máximo;
- as decisões de política energética indicadas no plano de expansão da geração;
- o contexto local de desenvolvimento do projeto por tipo.

A expansão do parque de geração considera aspectos tais como:

- o fator de produção médio, por tecnologia e por país, para projetos renováveis;
- a capacidade ou energia firme que cada tecnologia pode fornecer;
- o fator de produção mínimo a partir do qual são desenvolvidos novos projetos térmicos;
- a estimativa da demanda elétrica²³, incluindo perdas e consumo próprio.

²³ As análises são realizadas anualmente. Neste contexto, não foi realizado um dimensionamento preciso das capacidades necessárias das baterias. Por outro lado, as projeções apresentadas neste relatório não incluem a procura elétrica associada ao processo de eletrólise para produção de hidrogénio verde para consumo local e/ou exportação, nem a correspondente capacidade elétrica.

A análise é realizada por fase anual (ou seja, não se trata de um belo exercício de simulação horária, mas sim de uma estimativa de “alto nível”, como primeira estimativa no contexto de uma análise de transição energética de longo prazo).

Embora na maioria dos países sejam necessários meios de flexibilidade (armazenamento, gestão da procura) para acompanhar o forte desenvolvimento das energias renováveis não convencionais (NCRE), não foi realizado um dimensionamento preciso das capacidades necessárias, mas foi uma estimativa de alto nível em o capítulo de financiamento²⁴.

²⁴ As tecnologias atuais não são competitivas e esperam-se melhorias na sua produtividade que não permitem estabelecer com certeza o grau de penetração que poderiam alcançar.

“As premissas de investimento podem ser sensíveis a sinais dinâmicos relacionados a soluções regulatórias, de mercado e de acesso a financiamento que possam ocorrer nos horizontes de transição energética.”

4. Investimentos

As premissas utilizadas para estimar os investimentos totais correspondentes a cada cenário de transição energética justa são apresentados neste capítulo 4.

Estes investimentos correspondem às premissas de transição energética levantadas nos capítulos anteriores. Em particular, os investimentos estão relacionados com:

1. a geração elétrica (e as necessidades de redes elétricas adicionais, assim como medidas de flexibilidade);
2. a eletrificação do setor transporte rodoviário (investimentos em veículos elétricos e estações de carregamento);
3. as medidas de eficiência energética e eletrificação de ramos e usos finais para os demais setores;
4. o uso de tecnologias do tipo captura e armazenamento de carbono.

Os investimentos são calculados por ano e o valor total do investimento é aplicado ao primeiro ano em que as emissões de CO₂ são reduzidas. Trata-se de uma simplificação do modelo, uma vez que os grandes investimentos devem ocorrer antecipadamente, de um a cinco anos antes, dependendo do momento de construção ou início de operação do investimento em questão (as hidrelétricas, por exemplo, caracterizam-se por uma construção período de vários anos).



Setor elétrico

Os investimentos do setor elétrico contabilizam:

- investimentos em novas centrais de geração de energia elétrica, em linha com a expansão estimada da geração;
- investimentos em infraestruturas e flexibilidade, fundamentais para facilitar a integração da produção intermitente de eletricidade no despacho de eletricidade, e que incluem os conceitos de redes elétricas inteligentes, baterias e modernização de antigas centrais hidroelétricas;
- investimentos em redes de transporte e distribuição, que acompanham o crescimento muito significativo da procura de eletricidade como consequência do crescimento económico projetado e da eletrificação dos usos finais;
- o investimento estimado necessário para colocar fora de operação as usinas a carvão antes do final de sua vida útil (ativos irrecuperáveis)].

Geração elétrica: projetos futuros

As estimativas de financiamento para geração de energia elétrica foram feitas com base nos preços de CAPEX projetados pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) para entrada em operação de novas instalações conforme tabela 9:

Tabela 9

► Evolução CAPEX por tecnologia, NREL, USD/kW

CAPEX (USD/kW)	2020	2030	2040	2050	2060
Eólico <i>onshore</i>	1.300	1.150	1.025	900	900
Eólico <i>offshore</i>	3.573	2.865	2.596	2.434	2.434
Solar em grande escala	1.290	1.038	763	632	632
Hidroelétrica	2.750	2.750	2.750	2.695	2.695
CCGT	1.200	1.180	1.100	1.015	1.015
TG	1.120	1.050	960	872	872
Geotermia	6.750	5.930	5.420	5.150	5.150
Nuclear	9.450	7.730	7.200	6.670	6.670

Fonte: Elaboração própria baseada em dados do *Annual Technology Baseline 2023*, NREL²⁵.

Estes CAPEX se multiplicaram pelos MW adicionais a instalar em cada cenário.

Em relação à geração solar e eólica, também foram incluídos reinvestimentos estimados a cada 20 e 25 anos, respectivamente, para refletir a vida útil dessas tecnologias.

²⁵ <https://atb.nrel.gov/electricity/2023/technologies>

Investimentos em infraestrutura e flexibilidade

Foram contabilizados custos de infraestrutura e flexibilidade, que incluem conceitos de redes elétricas inteligentes, baterias e modernização de centrais hidroelétricas antigas e são estimados em 15 % extra²⁶ aos investimentos de geração elétrica considerados por cenário.

Redes de transmissão e distribuição

O financiamento esperado nas redes de transmissão e distribuição foi estimado utilizando uma proporção de 16% e 44%, respectivamente, sobre os investimentos calculados em futuros projetos de geração de energia elétrica; estimativas baseadas na experiência de várias décadas de trabalho do GRUPO GME e dos seus especialistas no setor elétrico. Como resultado, de forma geral, obteve-se um requisito necessário para investimentos em redes de transmissão e distribuição equivalente a 60% do total de investimentos em geração elétrica.

Estas elevadas necessidades de investimento ocorrem num contexto de crescimento muito significativo da procura de eletricidade, consequência do forte desenvolvimento económico e da eletrificação dos usos finais, bem como da crescente participação da geração variável de eletricidade renovável no mix de produção; todos os fatores que justificam a necessidade de grandes investimentos em redes.

Cabe destacar que os valores aqui estimados são líquidos de *overhauling* e degradação.

²⁶ Este valor genérico está alinhado com os valores globais de investimento estimados pela IRENA no seu relatório *Perspectiva global de las transiciones energéticas 2023: Camino hacia 1,5 °C*.

Geração elétrica: desmantelamento de centrais a carvão

O investimento estimado necessário para colocar as plantas em operação minas de carvão antes do final da sua vida útil (ativos irre recuperáveis) foi estimada usando o 50% do CAPEX correspondente a uma nova central a carvão publicado pelo NREL de acordo com a Tabela 10:

Tabela 10

► Geração elétrica: desmantelamento de centrais carvoeiras, USD/kW

CAPEX (USD/kW)	2020	2030	2040	2050	2060
Carvão	3.550	3.320	3.035	2.750	2.750

Fonte: Elaboração própria baseada em dados do *Annual Technology Baseline 2023*, NREL.

Embora o custo de desmantelamento das centrais a carvão que atingem o fim da sua vida útil seja muito inferior, este valor é uma proxy para a derrapagem de custos correspondente à saída antecipada dos ativos geradores em consequência das medidas de transição energética.



Usos finais

Do ponto de vista dos investimentos relacionados aos usos finais de energia, é possível citar os seguintes investimentos:

- setor transporte rodoviário, no qual se estima o investimento total²⁷ em veículos elétricos (VE) e híbridos (VH), assim como as estações de carregamento;
- medidas de eficiência energética, eletrificação, utilização de combustíveis alternativos (hidrogénio e seus derivados, entre outros) e mudanças comportamentais que impactem os setores de utilização final, com exceção dos transportes rodoviários e da tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS);
- captura e armazenamento de carbono (CCS), que é proposta como uma opção para setores industriais altamente poluentes e difíceis de transformar.

Transporte rodoviário

Em primeiro lugar, foi estimado o esforço financeiro necessário para o investimento completo em uma **frota de veículos rodoviários elétricos e híbridos**²⁸.

Este investimento foi estimado utilizando como ponto de partida os preços atuais dos veículos elétricos (VE) e dos veículos híbridos (VH) de acordo com dados de mercado. Para estimar os custos de VEs e VHs de todos os tamanhos (leves, de

²⁷ Estes investimentos não contabilizam a necessária substituição de VE no final da sua vida útil ou a substituição antecipada de baterias.

²⁸ O investimento em veículos a GNC e GNL não foi contabilizado no total dos investimentos dado o impacto muito reduzido em termos de redução de emissões destas tecnologias, que participam numa redução dos custos de utilização dos veículos (O&M), mas não tanto na própria transição energética.

carga, pesados, motocicletas) no futuro, foram utilizadas as taxas de redução de custos estimadas pela IRENA para veículos leves , no entendimento de que todos estes veículos terão custos menores no futuro pela redução esperada do custo das baterias.

Tabela 11

► **Evolução do custo total de propriedade para veículos elétricos e híbridos, USD**

Costo total de propiedad	2023	2030	2040	2050	2060
Veículos leves, eléctricos e híbridos ³⁰	32.000	26.200	18.900	11.600	11.600
Veículos de carga (camiões e camiões trator) ³¹	344.000	281.500	203.300	125.100	125.100
Veículos pesados (ônibus, furgões e micro-ônibus) ³²	472.000	386.200	278.900	1.171.600	171.600
Motos	3.000	2.500	1.800	1.100	1.100

Fonte: Elaboração própria baseada em dados de mercado.

Uma vez calculado o investimento total, estimou-se o **custo extra** para cobrir o investimento em VE e VH até que os custos dos veículos elétricos e fósseis se igualassem. Este cálculo permite identificar, de forma simplificada, o peso do acesso a um veículo novo (efeito “motorização”) e o peso da “eletrificação” neste investimento total em VE e VH. Os preços dos veículos fósseis provêm de dados de mercado e presume-se que permaneçam constantes ao longo do tempo. Os custos considerados para veículos fósseis estão detalhados na tabela 12.

²⁹ Não se dispõe de projeções de preço no futuro para os outros tipos de VE (camiões, motos, etc.).

³⁰ IRENA: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Innovation_Outlook_EV_smart_charging_2019_ES.pdf?rev=d92189d0969246d79a9f030b8b15a0b4

³¹ <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/purchase-cost-ze-trucks-feb22-1.pdf>

³² <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/bogota-es-pionera-en-adquirir-buses-electricos-por-licitacion/>

Tabela 12

► Custo total de propriedade para veículos fósseis, USD

Custo total de propriedade	Entre 2023 e 2060
Veículos leves fósseis	32.000
Veículos de carga (camiões e camiões trator)	146.000
Veículos pesados (ônibus, furgões e micro-ônibus)	114.000
Motos	1.600

Fonte: Elaboração própria baseada em dado de mercado.

Por outro lado, foi calculado o custo correspondente ao investimento necessário em novas infraestruturas, nomeadamente, a construção de postos de carregamento de veículos elétricos (VE). Segundo um estudo de Deloitte³³, são estimados 10 VE por estação de carregamento não residencial (estação de carregamento nível 2). Considera-se um custo de USD 1.550 para calcular o investimento necessário em estações de carregamento³⁴.

³³ <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/energy-resources/deloitte-ch-en-eurelectric-connecting-the-dots-study.pdf> Essas estações de carregamento não residenciais são categorizadas como estações de carregamento de nível 2, requerem uma corrente de 240 volts, fornecem um alcance de até 40 quilômetros por hora e podem carregar totalmente o veículo em 8 horas. A maioria das estações de carregamento públicas são de nível 2.

³⁴ Estimativa própria com base em relatórios da NREL e da PWC.

Eficiência energética, eletrificação e uso de combustíveis alternativos

Estes investimentos abrangem todas as ações de eficiência energética, eletrificação, utilização de combustíveis alternativos (hidrogénio e seus derivados, entre outros) e mudanças comportamentais que impactam os setores de utilização final, com exceção do transporte rodoviário e CCUS. Em particular, os setores de consumo final considerados são: residencial; industrial; comercial, serviços e público; agricultura, pesca, mineração e construção, e aérea, marítima e ferroviária.

Em primeiro lugar, foram estimadas as poupanças de emissões resultantes das medidas de transição energética para cada setor. Para isso, foram estimadas emissões de GEE correspondentes a um cenário de “tendência”, que considera o crescimento da demanda energética com base em variáveis históricas e variáveis socioeconômicas projetadas. Este cenário apresenta emissões superiores ao cenário BAU, uma vez que não assume qualquer tipo de medidas de eficiência ou políticas de eletrificação, enquanto o cenário BAU considera ações de mitigação de emissões de GEE. Em retrospectiva, também tem emissões mais elevadas do que os cenários NZ. O diferencial de emissões entre cada cenário e o cenário de “tendência” reflete o impacto ambiental das medidas de eficiência e eletrificação propostas em cada um dos cenários.

Dada a grande variabilidade de ações e custos correspondentes a cada uma das premissas de transição energética, bem como a interdependência dessas ações em termos de impactos nas emissões, foi estimada uma proxy por setor, equivalente a um CAPEX a ser investido para a redução. de emissões por ano. Este CAPEX equivalente por setor foi estimado com base em estudo realizado pelo Comitê de Mudanças Climáticas (CCC, por sua sigla em ingles)³⁵.

³⁵ <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/#supporting-information-charts-and-data>

Tabela 13

► CAPEX equivalente por setor, USD/ton CO₂e absorvida-ano

CAPEX equivalente	USD/tonelada evitada
Indústria	2.500
Residencial	4.100
Comercial	4.100
Agricultura	1.500
Aviação, marítimo e ferroviário	3.500

Fonte: Estimación propia baseada no estudo *Sixth Carbon Budget*, CCC.

Os investimentos necessários para cobrir as reduções nas emissões de GEE são calculados utilizando as diferenças anuais incrementais (ano N menos ano N-1) de emissões por setor entre o cenário de tendência e os outros três cenários (BAU, NZ 2050 e NZ 2060 multiplicados). pelos tempos de CAPEX equivalentes por setor.

Captura, uso e armazenamento de carbono

Se aplicável por país, as estimativas de financiamento CCUS foram calculadas utilizando o diferencial anual (ano N menos ano N-1) das emissões absorvidas pela indústria, multiplicado pela unidade CAPEX de um projeto CCUS capaz de armazenar 1 MtCO₂ por ano. Este custo unitário foi estimado em USD 1.000 por tonelada de CO₂ absorvida³⁶.

36 <https://sustainability.crugroup.com/article/carbon-capture-economics-why-usd-200-per-tco2-is-the-crucial-figure>

Os investimentos no setor elétrico abrangem a construção de novas centrais de geração, infraestruturas e flexibilidade, redes de transmissão e distribuição, bem como o desmantelamento de centrais elétricas. Em termos de usos finais, incluem medidas de eficiência energética, eletrificação, utilização de combustíveis alternativos, mudanças comportamentais e CCS.

Trabalhos citados

CEBRI, E. C. (2023). *Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil.*

Engrinter, Mercados Energéticos Consultores, Datum. (2016). *Balance Nacional de Energía Útil.*

EPE. (2019). *Atlas of Energy Efficiency Atlas.*



EUROSTAT. (2021).
Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households

Fundación Bariloche. (2020). *BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA ÚTIL.*

IEA. (2021). *Net Zero by 2050.*

IEA. (2021). *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector.*

IEA. (2022). *Energy Efficiency 2022.*



Foro Internacional de Transporte, BID. (2022).
Obtido de <https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/Decarbonising-Transport-in-Latin-American-Cities-Assessing-Scenarios.pdf>

Law, H. &. (2015). *The motorcycle to passenger car ownership ratio and economic growth: A cross-country analysis.*

Ministério de Minas e Energia. (2005). *Balanço de Energia Útil.*

OLADE, BID. (2017). *Manual Estadística Energética.*

SENER. (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: Un análisis desde la perspectiva de usos finales.*

UPME. (2019). *Balance de Energía Útil.*

UPME, IREES, TEP, Corpoema. (2019). *Primer Balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Pérdidas Energéticas Relacionadas y la Brecha de Eficiencia Energética.*

ANEXO.

Aspectos metodológicos detalhados



Projeção do PIB

De acordo com a definição do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), considera-se que um país tem um desenvolvimento humano muito elevado quando o seu IDH é igual ou superior 0,8³⁷. Por sua vez, considera-se que um país é capaz de satisfazer todas as suas necessidades energéticas quando apresenta valores de consumo de eletricidade superiores a 5.000 kWh per capita-ano³⁸.

Para estabelecer uma margem de níveis mínimos de PIB que os países devem atingir no longo prazo, utiliza-se o PIB médio do quintil mais baixo de países com IDH muito elevado e o PIB médio do quintil mais baixo de países com consumo de eletricidade superior a 5.000 kWh per capita-ano. Conclui-se que a meta do PIB per capita dos países para cobrir as suas necessidades energéticas não satisfeitas e serem considerados desenvolvidos está entre 21.000 e 33.000 dólares americanos, medido em dólares americanos PPC com base em 2017.

³⁷ <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI>
³⁸ GROVER, R. B. *An examination of the narratives about the electricity sector*. Current Science, 2020, vol. 119, n.º 12, p. 1910l

Com este objetivo de longo prazo definido e para fazer projeções do PIB, foram utilizadas diferentes ferramentas e metodologias de estimativa. Essas ferramentas e metodologias são detalhadas a seguir:

A Tendência histórica: regressão linear

As projeções do PIB foram feitas através de uma regressão linear dos dados utilizando a tendência histórica dos dados disponíveis para o período entre 1990 e 2021 pertencentes ao Banco Mundial³⁹. Na tabela 14, são apresentadas as fórmulas utilizadas nas regressões lineares dos países:

Tabela 14 ► Fórmulas de regressão linear por país

País	Regressão linear
Colômbia	$Y=223,7x+7.484,9$
Brasil	$Y=180,46x+9.926,5$
México	$Y=141,56x+15.498$
Peru	$Y=280,46x+3.954$
República Dominicana	$Y=392,86x+4.856,1$

Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial. x: ano; Y: PIB.

Contudo, é necessário levar em consideração que as regressões lineares autorregressivas apresentam grandes problemas de heterocedasticidade na estimativa de mais de 10 anos de projeção.

³⁹ <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.KD?locations=BR-CO-MX-PE-DO>

Desta forma, o resultado não reflete as melhorias no ambiente de negócios ou nos níveis educacionais dos últimos 20 anos que deveriam ser a base para um maior crescimento e desenvolvimento dos países.

B Tendência histórica: modelo *logit*

As projeções do PIB foram feitas através do modelo *logit* utilizando a tendência histórica dos dados disponíveis para o período entre 1990 e 2021 pertencentes ao Banco Mundial⁴⁰.

Esta forma de estimativa combina dois esquemas de projeção e permite simular um emparelhamento do PIB dos países com o mundo desenvolvido. Neste caso, utiliza-se como ponto de saturação o PIB per capita dos Estados Unidos estimado em 2100, no qual se assume uma taxa de crescimento constante e fixa de 0,9% anual. Esta taxa de crescimento é a taxa efetiva anual mínima (TEA) dos Estados Unidos no período entre 1990 e 2021, correspondente ao ano de 2007. O PIB de saturação per capita utilizado para o modelo *logit* é de USD 132.805.

Dada a pequena quantidade de dados disponíveis (31 anos) e o fosso entre os países em desenvolvimento e o mundo desenvolvido, as projeções dos países não conseguem atingir o nível de saturação.

C Extrapolação da taxa efetiva histórica

Para a extrapolação das taxas efetivas históricas, são utilizadas as taxas de crescimento dos últimos 31 anos do período entre 1990 e 2021. A Tabela 15 mostra as taxas efetivas históricas utilizadas por país:

⁴⁰ <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.KD?locations=BR-CO-MX-PE-DO>

Tabela 15 ▶ Taxa efetiva anual entre 1990 e 2021 por país

País	TEA
Colômbia	1,80 %
Brasil	1,10 %
México	0,70 %
Peru	2,85 %
República Dominicana	3,61 %

Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial.

Note-se que este parâmetro não reflete as mudanças no ambiente nos últimos anos, nem prevê melhorias na produtividade total dos fatores dos diferentes países.

D Modelo ARIMA

Com base na base de dados do PIB per capita no período entre 1990 e 2021, vários modelos ARIMA são executados para projetar automaticamente o ano 2060 através de um sistema de processamento de dados. O sistema é solicitado a selecionar o modelo ARIMA que apresenta o melhor ajuste de acordo com o Critério de Informação de Akaike (AIC).

É necessário levar em conta que, dada a limitada base de dados disponível (31 dados), os modelos ARIMA podem apresentar problemas em suas estimativas e podem não conseguir observar autocorrelações de mais de um período.

Desta forma, espera-se que as projeções destes modelos tendam a se assemelhar às projeções feitas com a extrapolação das taxas efetivas.

E Esquema *ad hoc*: modelo *logit* ajustado

O esquema *ad hoc*, ou modelo *logit* ajustado (*catch up*), é uma proposta de consultoria que introduz uma taxa de crescimento mais elevada nas projeções assumindo um aumento nos níveis de produtividade dos países.

Embora esta metodologia careça de um suporte metodológico rigoroso como as metodologias anteriormente mencionadas, o modelo baseia-se na necessidade de aumentar a produtividade das economias em desenvolvimento para atingir os níveis-alvo.

Além disso, contribui para observar um cenário diferente e introduzir a necessidade de repensar os resultados obtidos pelos demais cenários.

F Comentários finais

Para todas as metodologias explicadas anteriormente, as estimativas do PIB total foram feitas ajustando o crescimento previsto do PIB per capita pelas taxas de crescimento populacional esperadas nos países.

Para isso, as estimativas e projeções populacionais publicadas pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL)⁴¹.

Os PIB totais projetados são expressos em milhões de USD medidos em PPP com base no ano 2017.

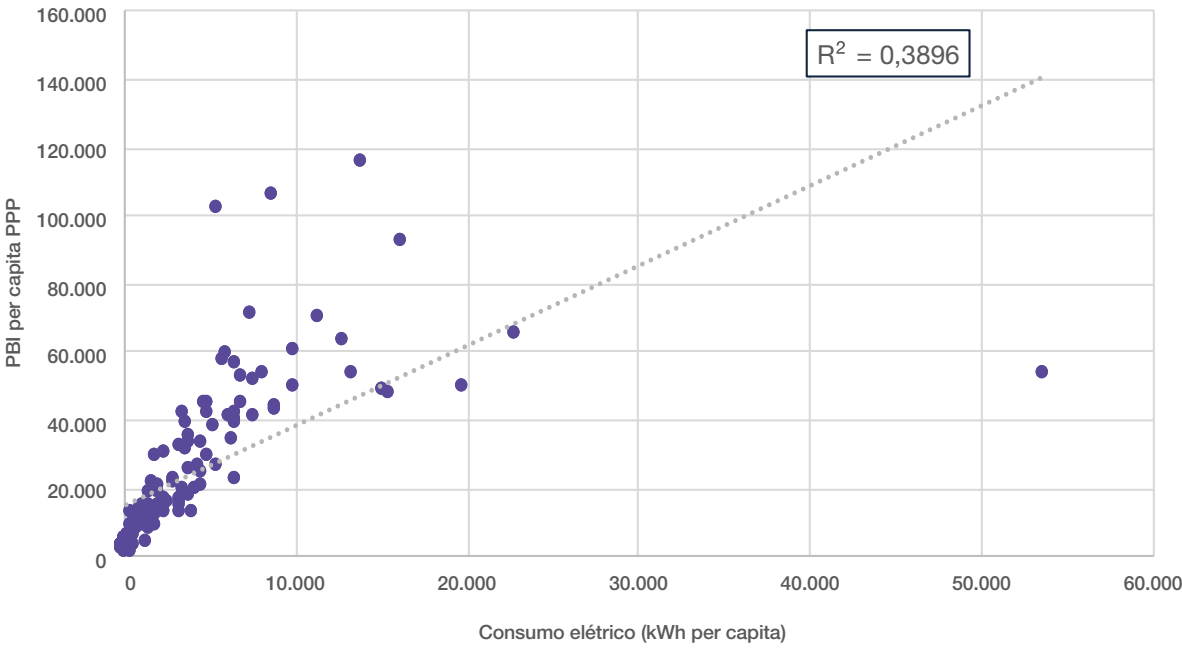
⁴¹ <https://www.cepal.org/es/subtemas/proyecciones-demograficas/america-latina-caribe-estimaciones-proyecciones-poblacion>



Identificação de países desenvolvidos

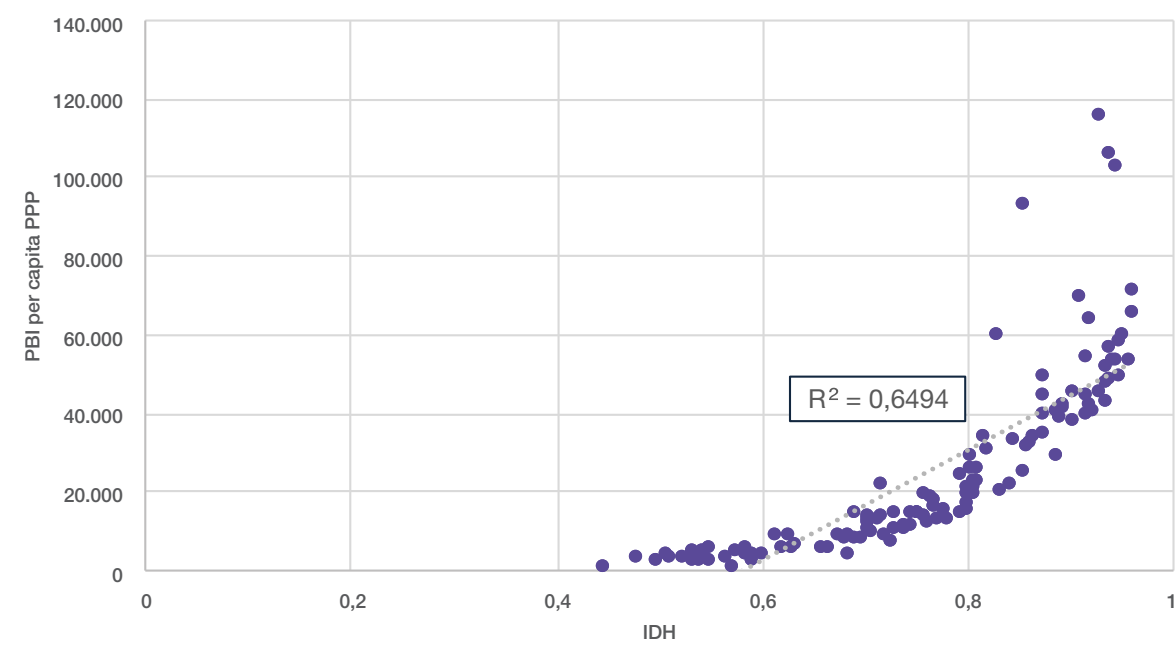
Os países desenvolvidos foram identificados para utilizar a frota média de veículos como ponto de saturação nas projeções. Para isso, foram feitas correlações entre o PIB per capita, o IDH e o consumo de eletricidade per capita para validar se os dois últimos são indicadores fiéis do nível de desenvolvimento dos países. Os resultados estão apresentados nos gráficos 16, 17 e 18:

Gráfico 16 ▶ Comparativo PIB per capita, consumo elétrico



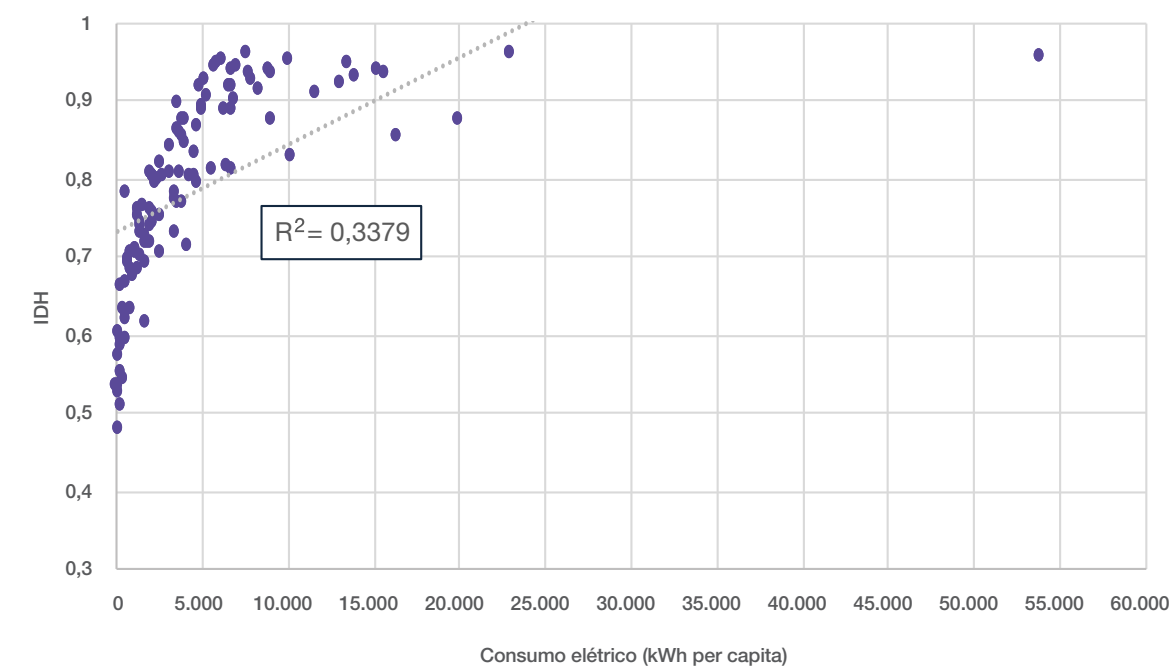
Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial.

Gráfico 17 ▶ Comparativo PIB per capita, IDH



Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial e do PNUD.

Gráfico 18 ▶ Comparativo IDH, consumo elétrico per capita



Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial e do PNUD.

Desta forma, dados os três últimos gráficos e as relações encontradas, conclui-se com segurança que tanto os índices de desenvolvimento humano como os níveis de consumo de eletricidade per capita são indicadores fiéis dos níveis de desenvolvimento dos países medidos em PIB per capita.

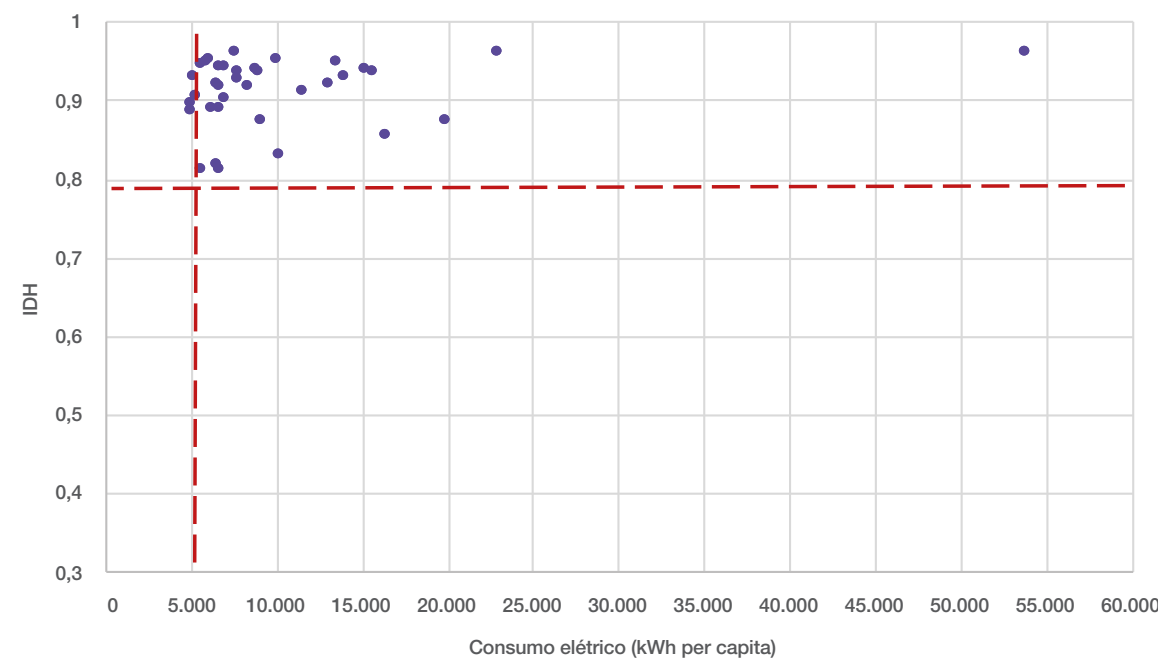
Seguindo a definição do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, considera-se que um país tem um desenvolvimento humano muito elevado quando o seu IDH é igual ou superior a 0,8⁴². Por sua vez, considera-se que um país é capaz de satisfazer todas as suas necessidades energéticas quando apresenta valores de consumo de eletricidade superiores a 5.000 kWh-ano⁴³.

42 <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI>

43 GROVER, R. B. *An examination of the narratives about the electricity sector*. Current Science, 2020, vol. 119, no 12, p. 1910

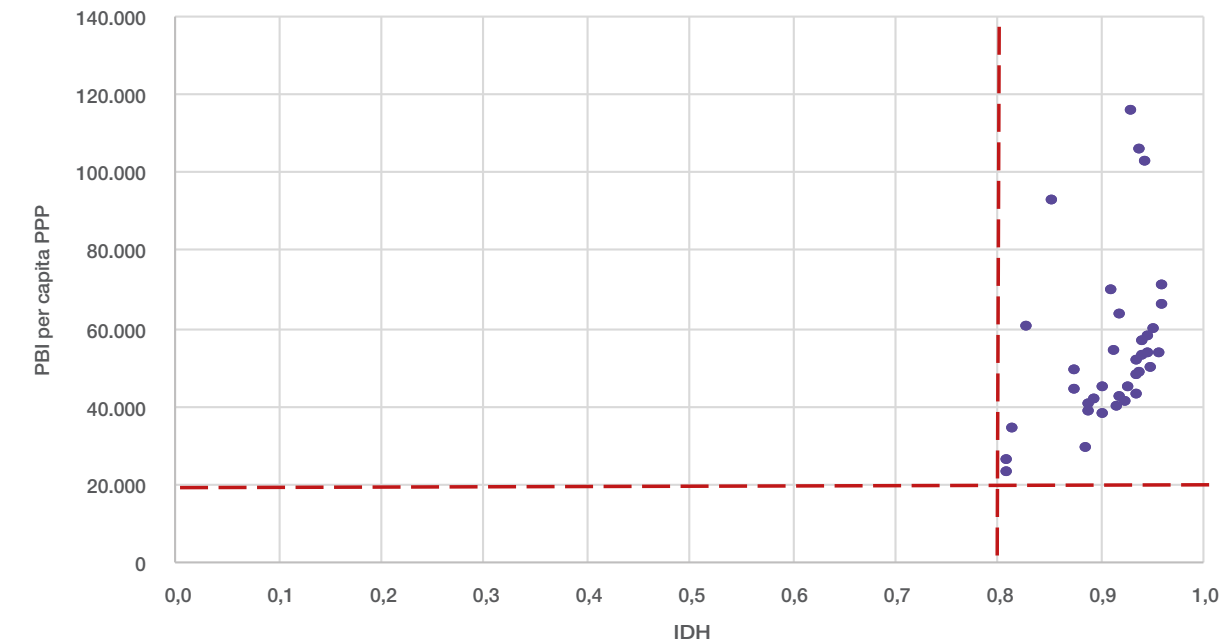
Por fim, os gráficos 19 e 20 apresentam os dados após filtragem prévia para consumo de energia elétrica superior a 5.000 kWh. Observa-se que todos aqueles países com níveis de consumo superiores ao especificado apresentam um nível de desenvolvimento humano muito elevado, ou seja, um IDH maior ou igual a 0,8.

Gráfico 19 ► Comparativo IDH, consumo elétrico maior a 5.000 kWh



Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial e do PNUD.

Gráfico 20 ► Comparativo PIB, IDH (consumo elétrico maior a 5.000 kWh)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do Banco Mundial e do PNUD.

Conclui-se assim que todos os países com níveis de consumo superiores ao especificado têm um PIB per capita superior a 20.000 dólares americanos medido em PPC com base em 2017. Por sua vez, dadas as conclusões obtidas no gráfico 20 acima, estes países são considerados de muito elevado níveis de desenvolvimento humano.

