

INDICADORES DE  
DESEMPENHO ASSOCIADOS A  
**TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS  
DE BAIXO CARBONO**

NO BRASIL

EVIDÊNCIAS PARA UM GRANDE  
IMPULSO ENERGÉTICO



NAÇÕES UNIDAS

CEPAL



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos  
*Ciência, Tecnologia e Inovação*



Empresa de Pesquisa Energética



cooperação  
alemã

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



PÁTRIA AMADA  
**BRASIL**  
GOVERNO FEDERAL

# Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 [www.cepal.org/es/publications](http://www.cepal.org/es/publications)

 [www.cepal.org/apps](http://www.cepal.org/apps)

# Indicadores de desempenho associados a tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil

Evidências para um grande impulso energético



Este documento foi redigido por Marcelo Poppe (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE), Bárbara Bressan Rocha (CGEE), Mayra Juruá Gomes de Oliveira (CGEE) e Camila Gramkow (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe - CEPAL), com base nos relatórios do projeto produzidos por Carolina Grottera (Programa de Planejamento Energético do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia —COPPE— da Universidade Federal do Rio de Janeiro) com o apoio de Amanda Vinhoza (COPPE/UFRJ) e nas contribuições de especialistas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e dos membros do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do projeto *Energy Big Push*.

Este documento foi preparado no âmbito das atividades de cooperação entre a Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) 2018-2020, projeto "Sustainable development paths for middle-income countries under the 2030 Agenda for Sustainable Development in Latin America and the Caribbean". No âmbito dessa cooperação, realiza-se o projeto Grande Impulso Energia ou *Energy Big Push* Brasil, realizado sob a coordenação do Escritório da CEPAL no Brasil e do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) e com o apoio da GIZ e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI).

Este relatório é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2º Contrato de Gestão CGEE, supervisionado pelo MCTI – 18º Termo Aditivo/Ação: Internacionalização da CT&I Brasileira/Atividade: Inserção do CGEE em Agendas Internacionais - Projeto Agenda Positiva para a Mudança do Clima e do Desenvolvimento Sustentável 52.01.50.01/MCTI/2018.

As opiniões expressadas neste documento, que não foi submetido a revisão editorial, são de exclusiva responsabilidade dos autores e podem não coincidir com as visões da CEPAL, do CGEE ou das instituições parceiras nesse projeto.

Publicação das Nações Unidas

LC/TS.2020/73

LC/BRS/TS.2020/5

Distribuição: L

Copyright © Nações Unidas, 2020. Todos os direitos reservados

Copyright © CGEE, 2020. Todos os direitos reservados

Impresso nas Nações Unidas, Santiago

S.20-00345

Esta publicação deve ser citada como: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL)/Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), "Indicadores de desempenho associados a tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil: evidências para um grande impulso energético", *Documentos de Projetos* (LC/TS.2020/73; LC/BRS/TS.2020/5), Santiago, 2020.

A autorização para reproduzir total ou parcialmente esta obra deve ser solicitada à Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), Divisão de Publicações e Serviços Web: publicaciones.cepal@un.org. Os Estados-membros das Nações Unidas e suas instituições governamentais podem reproduzir esta obra sem autorização prévia. Solicita-se apenas que mencionem a fonte e informem à CEPAL tal reprodução.

---

C389p

Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL)/Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), "Indicadores de desempenho associados a tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil: evidências para um grande impulso energético", *Documentos de Projetos* (LC/TS.2020/73; LC/BRS/TS.2020/5), Santiago, 2020.

52 p. : il.

1. Energia. 2. Indicadores de desempenho. 3. Baixo carbono. 4. Tecnologia.  
I. CEPAL. II. CGEE. III Brasil.

CDU 620:661.66 (81)

---

## Projeto Grande Impulso Energia (*Energy Big Push*) Brasil

### Dirigentes das instituições

CEPAL	CGEE
Alicia Bárcena, Secretária Executiva Mario Cimoli, Secretário Executivo Adjunto	Marcio de Miranda Santos, Presidente Luiz Arnaldo Pereira da Cunha Junior, Diretor Regina Maria Silvério, Diretora

### Supervisão do projeto

CEPAL	CGEE
Carlos Henrique Fialho Mussi Luiz Fernando Krieger Merico	Regina Maria Silvério

### Coordenação do projeto

CEPAL	CGEE
Camila Gramkow	Marcelo Poppe

### Equipe técnica do projeto

CEPAL	CGEE
Ruben Enrique Contreras Lisperguer	Bárbara Bressan Rocha Emilly Caroline Costa Silva

### Suporte administrativo do projeto

CEPAL	CGEE
Camila Leotti Márcia Moreschi Maria Pulcheria Graziani Pedro Brandão da Silva Simões Sofia Furtado	Carolina Conceição Rodrigues

### Comitê Consultivo do Projeto

Regina Maria Silvério (CGEE)  
Carlos Henrique Fialho Mussi (CEPAL)  
Thiago Barral Ferreira (EPE)  
Renato Domith Godinho (MRE)

### Consultores e especialistas do projeto

Eixo 1: André Tosi Furtado (coord.),  
Silvia de Carvalho e Lucas Motta  
Eixo 2: Carolina Grottera (coord.)  
e Amanda Vinhoza  
Eixo 3: Edilaine V. Camillo (coord.),  
Victo José da Silva Neto e Tatiana Bermudez  
Eixo 4: Carolina R. Vieira (coord.)  
e Ludmila Viegas



# Índice

<b>Sumário executivo .....</b>	<b>9</b>
<b>Apresentação .....</b>	<b>11</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>15</b>
<b>I. Indicadores de desempenho para soluções energéticas de baixo carbono selecionadas.....</b>	<b>17</b>
Seleção de soluções energéticas de baixo carbono .....	17
Construindo um painel de indicadores .....	18
Indicadores de desempenho sistematizados por pilar .....	18
Pilar ambiental .....	19
Pilar tecnicoeconômico .....	19
Pilar social .....	19
Pilar político-institucional .....	20
<b>II. Considerações metodológicas .....</b>	<b>21</b>
Pilar ambiental .....	21
Uso de água.....	21
Uso da terra.....	22
Emissão de gases de efeito estufa .....	22
Emissões não GEE .....	23
Pilar tecnicoeconômico .....	24
Nível de prontidão da tecnologia (TRL, na sigla em inglês) .....	24
Custos de capital (CAPEX, na sigla em inglês) .....	24
Custos operacionais (OPEX, na sigla em inglês) .....	25
Custos totais.....	25
Diversificação energética.....	25
Pilar social .....	26
Criação de emprego .....	26
Geração de renda .....	26

<b>III. Resultados e discussão</b> .....	<b>27</b>
Geração de electricidade .....	27
Uso de água.....	27
Uso da terra.....	28
Emissão de gases de efeito estufa .....	29
Nível de prontidão da tecnologia .....	29
Custos de capital (CAPEX) .....	29
Custos operacionais (OPEX) .....	30
Custos totais.....	31
Diversificação energética.....	31
Criação de emprego .....	32
Geração de renda .....	32
Transporte.....	33
Emissão de gases de efeito estufa .....	33
Emissões não GEE .....	33
Nível de prontidão da tecnologia (TRL).....	34
Custos de capital (CAPEX) .....	35
Custos operacionais (OPEX) .....	35
Custos totais.....	36
Biocombustíveis .....	37
Uso de água.....	37
Uso da terra.....	37
Emissão de gases de efeito estufa .....	38
Nível de prontidão da tecnologia .....	39
Custos de produção de capital (CAPEX) .....	39
Custos operacionais (OPEX) .....	39
Custos totais.....	40
Diversificação energética.....	41
Criação de emprego .....	41
<b>IV. Considerações finais, recomendações e desenvolvimentos futuros</b> .....	<b>43</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>45</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>49</b>

#### Tabelas

Tabela 1	Indicadores de uso de água.....	21
Tabela 2	Indicadores de uso da terra .....	22
Tabela 3	Indicadores de GEE .....	22
Tabela 4	Indicadores não GEE .....	23
Tabela 5	Indicador TRL.....	24
Tabela 6	Indicadores de CAPEX.....	24
Tabela 7	Indicadores OPEX .....	25
Tabela 8	Indicadores de custo total.....	25
Tabela 9	Indicadores de criação de emprego.....	26
Tabela 10	Indicadores de geração de renda .....	26
Tabela 11	Contribuição para a diversificação energética em 2017 .....	31
Tabela 12	Nível de prontidão da tecnologia ( <i>technology readiness level</i> , TRL) para tecnologias de transporte .....	34

Tabela 13	Nível de prontidão da tecnologia ( <i>technology readiness level</i> , TRL) de biocombustível .....	39
Tabela 14	Contribuição para a diversificação energética em 2018 .....	41
Tabela A1	Tecnologias de geração de eletricidade em tempo de construção e tempo de vida (anos).....	53

### Gráficos

Gráfico 1	Uso da água para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade .....	28
Gráfico 2	Uso da terra para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade .....	28
Gráfico 3	Emissões de GEE para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade.....	29
Gráfico 4	CAPEX para tecnologias de geração de eletricidade.....	30
Gráfico 5	OPEX para tecnologias de geração de eletricidade.....	30
Gráfico 6	LCOE para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade.....	31
Gráfico 7	Criação de emprego para tecnologias de geração de eletricidade .....	32
Gráfico 8	Geração de renda para tecnologias de geração centralizada de eletricidade .....	32
Gráfico 9	Emissões de GEE para tecnologias de transporte .....	33
Gráfico 10	Emissões não GEE para tecnologias de transporte .....	34
Gráfico 11	CAPEX para tecnologias de transporte .....	35
Gráfico 12	OPEX para tecnologias de transporte .....	36
Gráfico 13	TCO para tecnologias de transporte.....	36
Gráfico 14	Uso da água para tecnologias de biocombustíveis .....	37
Gráfico 15	Uso da terra para tecnologias de biocombustíveis .....	38
Gráfico 16	Emissões de GEE para tecnologias de biocombustíveis .....	38
Gráfico 17	CAPEX para tecnologias de biocombustíveis .....	39
Gráfico 18	OPEX para tecnologias de biocombustíveis .....	40
Gráfico 19	LCOF para tecnologias de biocombustíveis.....	40
Gráfico 20	Criação de emprego por tecnologias de biocombustíveis.....	41



## Sumário executivo

O presente relatório apresenta os trabalhos conduzidos no âmbito do Eixo 2 do projeto *Energy Big Push* (EBP) Brasil, que teve como objetivo fornecer um painel de indicadores técnicoeconômicos, sociais, ambientais e político-institucionais para avaliar o desempenho de determinadas tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil. O relatório descreve a metodologia, que envolveu levantamento de dados e revisão de literatura, análise dos dados e das informações coletadas; e o desenvolvimento de um conjunto de indicadores de desempenho associados a soluções energéticas de baixo carbono. O relatório apresenta, também, as estimativas produzidas para um conjunto de indicadores que fornecem um panorama dos impactos potenciais de várias tecnologias energéticas de baixo carbono em várias dimensões do desenvolvimento sustentável no Brasil.

As escolhas eficazes de soluções energéticas que levam em consideração as circunstâncias nacionais são importantes e podem se beneficiar da criação e aplicação de ferramentas baseadas em evidências para orientar os tomadores de decisão. Um painel de indicadores que contemple um amplo espectro de dimensões do desenvolvimento sustentável é essencial para identificar possíveis áreas sinérgicas e complementares para investimentos, acompanhar e monitorar os impactos dos investimentos realizados e, indiretamente, das políticas e estratégias implementadas e, por fim, avaliar e melhorar a estrutura regulatória e os mecanismos de incentivo de modo que sejam eficazes na promoção de investimentos para um grande impulso energético no Brasil.

Com base em (i) relevância do setor em relação ao desempenho econômico, participação no suprimento e demanda de energia e impactos ambientais, (ii) potencial de tecnologias para implantação em escala no Brasil and (iii) perspectivas futuras sobre curvas de aprendizagem e relevância na política energética e desenvolvimento estratégico nacional, foram selecionadas soluções energéticas de baixo carbono. Isso inclui o setor de transporte, biocombustíveis e geração elétrica (centralizada e mini e micro geração). Para essas soluções selecionadas, 26 indicadores foram propostos para desenvolvimento em quatro pilares: ambiental, técnicoeconômico, social e político-institucional. Tendo em conta as restrições e lacunas de dados, estimativas foram produzidas e calculadas para 11 indicadores. O fato de nem todos os indicadores poderem ser estimados revela lacunas de dados, restrições e desafios significativos para o desenvolvimento de um conjunto abrangente de indicadores de desempenho de tecnologias energéticas para múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável.

No pilar ambiental, os indicadores calculados cobriram o uso da água, o uso da terra, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e as emissões não-GEE. No pilar tecnicoeconômico, as estimativas incluíram os indicadores de nível de prontidão tecnológica (*technology readiness level*, TRL), custos de capital (CAPEX, na sigla em inglês), custos de operação e manutenção (OPEX, na sigla em inglês), custos totais e diversificação energética. Em relação ao pilar social, os indicadores calculados foram a criação de empregos e a geração de renda.

A análise desses indicadores mostrou que nenhuma tecnologia supera outras em todos os aspectos, o que sugere que uma combinação de tecnologias deve ser desenvolvida para que vários objetivos sociais, econômicos e ambientais sejam alcançados. Essa constatação enfatiza a necessidade de coordenação para um grande impulso energético no Brasil.

O estudo dos indicadores revelou que não existe um indicador “tamanho único” e alguns deles permitem apenas uma análise qualitativa. Essa descoberta destaca a importância de ter um painel de indicadores, em vez de considerar apenas um único indicador. As informações fornecidas por vários indicadores geralmente são complementares em todas as dimensões do desenvolvimento sustentável. É necessária uma análise transversal de diversos indicadores para permitir uma compreensão abrangente do desempenho das tecnologias energéticas. O presente relatório também recomenda um conjunto de indicadores que devem ser desenvolvidos, atualizados e mantidos, que incluem, além dos indicadores calculados mencionados acima: qualidade da água e biodiversidade aquática, qualidade do solo e biodiversidade terrestre, e vulnerabilidade e riscos no pilar ambiental; eficiência da cobertura e uso de energia, propriedade da tecnologia, requisitos de infraestrutura e prontidão da cadeia de suprimentos no pilar tecnicoeconômico; acesso à eletricidade, população diretamente afetada, acidentes de trabalho, doenças e fatalidades, impacto nas comunidades indígenas e tradicionais, e riscos ao patrimônio cultural, histórico e arqueológico no pilar social; e simplicidade do processo de licenciamento ambiental; compatibilidade com a política energética e acordos internacionais; compatibilidade com o quadro regulatório e institucional existente no pilar político-institucional.

Como em qualquer exercício quantitativo, a qualidade das estimativas produzidas depende da disponibilidade, robustez e confiabilidade dos dados e informações coletados, bem como da precisão do método de análise empregado. Nesse sentido, o trabalho realizado no Eixo 2 do EBP representa um avanço na revisão e compilação de vários indicadores de soluções energéticas de baixo carbono no Brasil. Mas há terreno fértil para desenvolvimentos futuros, a fim de melhorar a qualidade, comparabilidade e cobertura do painel de indicadores de soluções energéticas de baixo carbono no país.

## Apresentação

### Contexto e motivações

Os compromissos climáticos firmados no marco do Acordo de Paris e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 inspiraram o lançamento de diversas iniciativas globais, regionais e nacionais. Nesse sentido, o projeto Grande Impulso Energia ou *Energy Big Push* (EBP) Brasil nasceu a partir da convergência de motivações e de esforços sinérgicos nas atividades de seus parceiros que permeiam os temas do desenvolvimento sustentável, da transição energética e da cooperação internacional.

Em 2015, foi lançada uma iniciativa global liderada por 24 países e a União Europeia, destinada a acelerar a inovação em energia limpa, a Missão Inovação (Mission Innovation – MI). Os representantes do governo brasileiro na MI —o Ministério das Relações Exteriores (MRE) e o Ministério de Minas e Energia (MME)— acionaram a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) com o intuito de realizar um levantamento dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) em tecnologias energéticas para apoiar o monitoramento da inovação do setor no país.

A EPE realizou um esforço inicial e organizou uma primeira base de dados de investimentos públicos e publicamente orientados em PD&D, entre 2018 e 2019, utilizando a classificação da Agência Internacional de Energia (IEA, da sigla em inglês). A partir dessa iniciativa, foi identificada a necessidade de incorporar outras fontes de dados e ampliar a série temporal, aprimorando o entendimento dos principais esforços em inovação em energia no país através de um único conjunto de dados estruturado e harmonizado. Nesse contexto, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), foi convidado como parceiro estratégico a planejar e executar um projeto que, de forma colaborativa, fosse capaz de construir capacidade técnica e institucional para suprir a necessidade de ampliar o acesso a dados estratégicos para a tomada de decisão no setor energético.

A necessidade do governo brasileiro em dispor de subsídios e informação estratégica para acelerar a transição energética sustentável e de baixo carbono, coincide plenamente com a abordagem do *Big Push* para a Sustentabilidade para o setor energético. Essa abordagem vem sendo desenvolvida desde 2016 pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) das Nações Unidas para apoiar os países da região na construção de estilos de desenvolvimento mais sustentáveis. O *Big Push* (ou

Grande Impulso) para a Sustentabilidade representa uma coordenação de políticas (públicas e privadas, nacionais e subnacionais, setoriais, fiscais, regulatórias, financeiras, de planejamento etc.) que alavanquem investimentos nacionais e estrangeiros para produzir um ciclo virtuoso de crescimento econômico, geração de emprego e renda, redução de desigualdades e lacunas estruturais e promoção da sustentabilidade ambiental (CEPAL/FES, 2019).

Investimentos na expansão, integração e diversificação das energias limpas e renováveis representam uma das grandes oportunidades para um *Big Push* para a Sustentabilidade na região da América Latina e do Caribe, devido a seus múltiplos impactos positivos em diversas áreas, que são discutidos em mais detalhe no relatório final do EBP intitulado “Um grande impulso para a sustentabilidade no setor energético do Brasil: subsídios e evidências para a coordenação de políticas”. Assim, no contexto do programa de cooperação técnica da CEPAL com a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) para apoiar países selecionados da região em condições de elaborar suas estratégias de implementação da Agenda 2030, de acordo com um *Big Push* para a Sustentabilidade, a CEPAL somou aos esforços do CGEE e parceiros do governo brasileiro para promover um grande impulso para os investimentos com foco em inovação de tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil.

A IEA, também somou esforços ao EBP, no âmbito do seu Programa para a Transição Energética Limpa (em inglês, *Clean Energy Transitions Programme – CETP*). Esse programa tem como missão acelerar as transições energéticas globais limpas, especialmente nas principais economias emergentes, através de atividades que incluem trabalho analítico colaborativo, cooperação técnica, treinamento e capacitação, e diálogos estratégicos. O programa fornece apoio independente e de ponta aos governos cujas políticas energéticas influenciarão significativamente as perspectivas e a velocidade da transição global para produção e uso energético mais sustentável, sendo o Brasil um dos países prioritários. A ampla experiência em energia da IEA, principalmente, em análise e levantamento de gastos em pesquisa e desenvolvimento em energia limpa, converge claramente com o EBP.

Em 2019, a partir das sinérgicas motivações dos parceiros, o projeto EBP foi executado, contando com colaboração multi-institucional em nível internacional, regional e nacional, formando um ambiente único de troca de experiências para a construção colaborativa de conhecimentos para um Grande Impulso Energético no Brasil.

## O Projeto *Energy Big Push*

O projeto Grande Impulso Energia ou *Energy Big Push* (EBP), fruto da parceria CGEE-CEPAL, tem como objetivo principal apoiar a promoção de mais e melhores investimentos públicos e privados em energias sustentáveis, com ênfase em inovação, contribuindo para um grande impulso energético no Brasil.

O projeto está articulado em torno de quatro eixos de atuação. Cada eixo corresponde a um objetivo específico, conforme indicado a seguir:

- Eixo 1 - Desenvolvimento de um processo para coleta, estruturação e gerenciamento de dados de investimentos públicos e privados em pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) em energia;
- Eixo 2 - Levantamento de indicadores de desempenho técnico, econômico, social e ambiental associados a soluções energéticas de baixo carbono;
- Eixo 3 - Identificação de linhas estratégicas e instrumentos prioritários para acelerar investimentos em inovação em energia;
- Eixo 4 - Estratégia de comunicação inovadora e eficaz dos resultados do projeto, voltada para tomadores de decisão.

Para cada um desses eixos foram formados grupos de trabalho, que se reuniram regularmente e ofereceram aportes técnicos e de dados ao projeto EBP. Além de CGEE, EPE, CEPAL e IEA, os grupos de

trabalho contaram com participações de especialistas de MRE, MME, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) —ver participantes em cada grupo nos anexos. Portanto, mais de uma dúzia de instituições, nacionais, regionais e globais, foram articuladas e contribuem ativamente para o EBP, aproximando o mundo da energia e o mundo da inovação. A colaboração de cada parceiro se dá de forma voluntária, valorizando as diferentes experiências de cada participante, fortalecendo a inteligência coletiva do grupo e agregando mais valor aos resultados obtidos no projeto.

A partir dos insumos e interações dos grupos de trabalho, foram gerados relatórios técnicos preliminares dos eixos 1, 2 e 3, apresentando estimativas e considerações preliminares para cada um desses eixos. Os relatórios preliminares foram apresentados e discutidos no *Workshop Energy Big Push*, realizado no CGEE em outubro de 2019. O *workshop* teve o objetivo de propiciar intercâmbio de experiências, aprendizado entre pares e revisão e aprimoramento dos resultados preliminares do projeto. O evento contou com a participação de 47 pessoas, incluindo especialistas e representantes das instituições parceiras do projeto (ver lista de participantes no anexo 1). As ricas discussões desse *workshop* geraram insumos fundamentais para os relatórios finais dos eixos 1, 2 e 3 e para as atividades de comunicação e engajamento do eixo 4, bem como o relatório final do projeto que sumariza e integra os resultados de cada eixo à luz da abordagem do *Big Push* para a Sustentabilidade.

Os relatórios produzidos no marco do EBP são, portanto, fruto de um esforço coletivo e das contribuições de diversas instituições parceiras e especialistas com efetiva atuação no tema. São eles:

- Relatório final do Eixo 1: Panorama dos investimentos em inovação em energia no Brasil: Dados para um grande impulso energético
- Relatório final do Eixo 2, que é o presente documento: Indicadores de desempenho associados a tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil: Evidências para um grande impulso energético
- Relatório final do Eixo 3: Mecanismos de incentivo à inovação em energias limpas: Caminhos para um grande impulso energético
- Relatório síntese do projeto EBP: Um grande impulso para a sustentabilidade no setor energético do Brasil: Subsídios e evidências para coordenação de políticas.

Espera-se que o EBP se consolide como um processo de co-criação de diversos estudos e análises para subsidiar a tomada de decisões; de construção de capacidades e aprendizados adquiridos por parte das equipes dos diversos órgãos sobre questões relacionadas a energias limpas e de baixo carbono, inovação e investimentos; e, finalmente, de desenvolvimento de recomendações sobre os temas tratados, que poderão servir de insumos para políticas públicas e estratégias empresariais, para acelerar os investimentos em energias limpas no Brasil, com foco em inovação.



## Introdução

Esse relatório apresenta o trabalho realizado no âmbito do Eixo 2 do projeto *Energy Big Push* (EBP) Brasil. O principal objetivo do EBP Eixo 2 é fornecer um painel de indicadores técnicoeconômicos, sociais, ambientais e político-institucionais para avaliar o desempenho das tecnologias energéticas de baixo carbono no Brasil. Esse trabalho envolve mapeamento, levantamento e revisão dos dados e da literatura existentes; análise dos dados e das informações coletadas; e apresentação de estimativas para uma seleção de indicadores de desempenho associados a soluções de baixo carbono e seus respectivos valores. Escolhas eficazes de soluções energéticas que levam em consideração as circunstâncias nacionais são importantes e podem se beneficiar da criação e aplicação de ferramentas para orientar os tomadores de decisão. Um painel de indicadores pode ser uma ferramenta útil para apoiar a tomada de decisões, oferecendo evidências sobre o potencial desempenho social, econômico e ambiental de cada solução energética de baixo carbono. Esse conjunto de evidências pode ajudar a identificar setores e tecnologias complementares que podem ser o foco de um conjunto de políticas articuladas e coordenadas para acelerar a inovação e os investimentos em energia limpa, em consonância com um grande impulso para a sustentabilidade no setor energético do Brasil. Um painel de indicadores que contemple um amplo espectro de dimensões do desenvolvimento sustentável é essencial, a fim de identificar possíveis áreas sinérgicas e complementares para investimentos, acompanhar e monitorar os impactos dos investimentos realizados e, indiretamente, das políticas e estratégias implementadas e, por fim, avaliar e melhorar a estrutura regulatória e os mecanismos de incentivo de modo que sejam eficazes na promoção de investimentos para um grande impulso energético no Brasil.

Os indicadores produzidos nesse trabalho podem ajudar a detectar a combinação adequada, para o contexto do Brasil, de investimentos complementares e coordenados para a construção de uma matriz energética mais sustentável, resiliente e de baixo carbono e, ao mesmo tempo, para a promoção de uma economia mais inclusiva, eficiente e competitiva. Além disso, um painel de indicadores pode ser uma “painel de bordo” útil para os tomadores de decisão, pois permite ajustes contínuos no curso da ação em direção à sustentabilidade do desenvolvimento que se pretende alcançar. Como em qualquer exercício quantitativo, a qualidade das estimativas produzidas depende da disponibilidade, robustez e confiabilidade dos dados e informações coletados, bem como da precisão do método de análise empregado. Nesse sentido, o trabalho realizado no Eixo 2 do EBP é um passo importante na revisão e compilação de vários indicadores de soluções energéticas de baixo carbono no Brasil, que devem ser

continuamente desenvolvidos para melhorar a qualidade e a cobertura do painel de indicadores sobre soluções energéticas de baixo carbono no país.

A metodologia e as estimativas preliminares para o conjunto de indicadores foram apresentadas no *Workshop Energy Big Push*, em outubro de 2019, no qual estes foram submetidos ao escrutínio de especialistas. O conteúdo do presente relatório incorpora, portanto, sugestões de melhorias e *feedback* recebidos dos especialistas do *workshop*, bem como contribuições recebidas nas reuniões técnicas do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do projeto EBP. Com base nesse esforço colaborativo e nos critérios descritos nesse relatório, foram selecionadas as seguintes soluções e para as quais indicadores foram produzidos:

- Transporte: veículos leves, ônibus e caminhões (híbridos, elétricos a bateria e com motor de combustão interna, quando relevante);
- Geração centralizada de eletricidade: usina hidrelétrica, pequena central hidrelétrica, termelétrica a biomassa (florestal, bagaço de cana), central solar fotovoltaica, central heliotérmica, central eólica *onshore* (em terra) ou *offshore* (no mar);
- Mini e microgeração de eletricidade: termelétrica a biogás (de resíduos agrícolas) e painéis fotovoltaicos distribuídos;
- Biocombustíveis: bioetanol de cana, biodiesel de soja, biogás (de resíduos sólidos urbanos) e bioquerosene de aviação.

O presente relatório é organizado como segue. Além do preâmbulo no qual o contexto, as motivações e uma descrição do projeto EBP são apresentados, e dessa introdução, há quatro capítulos. O capítulo I apresenta o exercício de seleção de soluções de baixo carbono e o processo de construção de um painel de indicadores. O capítulo II descreve considerações metodológicas essenciais para o cálculo das estimativas de um conjunto de indicadores. No capítulo III, os resultados para vários indicadores são apresentados e discutidos. O capítulo IV apresenta as considerações finais, recomendações e áreas para desenvolvimento futuro.

## I. Indicadores de desempenho para soluções energéticas de baixo carbono selecionadas

Este capítulo descreve o exercício de seleção de soluções energéticas de baixo carbono e o processo de construção de um painel de indicadores. As implicações ambientais, sociais e econômicas do *mix* e da política energética devem ser consideradas de maneira holística e refletidas nos arranjos institucionais. Ter evidências como um painel de indicadores pode ajudar os formuladores de políticas a considerar os efeitos atuais e futuros da produção e usos de fontes alternativas de energia na saúde, equidade, economia, meio ambiente, entre outros, para apoiar processos fundamentados de tomada de decisão. Nesse sentido, os indicadores são úteis para monitorar o progresso em direção às metas específicas do país e para identificar os fatores mais sensíveis às mudanças nas políticas.

### Seleção de soluções energéticas de baixo carbono

Para os fins do projeto *Energy Big Push* (EBP) Brasil, soluções energéticas de baixo carbono são aquelas definidas pela IEA (2011) nas categorias 1 – Eficiência energética, 3 – Fontes de energia renovável, 5 – Hidrogênio e células a combustível, 6 – Outras tecnologias elétricas e de armazenamento e 7 – Outras tecnologias transversais ou pesquisa.

Após essa categorização, os membros do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP (GT2, ver lista de participantes no anexo 4) realizaram uma seleção de tecnologias para setores específicos. Os critérios de seleção consideraram, entre outros aspectos:

- i) no nível setorial: relevância atual e futura do setor em relação ao desempenho econômico, participação no suprimento e demanda de energia e impactos ambientais (Brasil, 2015; EPE, 2018a e Rathmann (org.), 2017);
- ii) no nível tecnológico: potencial identificado para implantação em escala no Brasil, perspectivas de desenvolvimento futuro e curvas de aprendizagem, bem como relevância na política energética e no desenvolvimento estratégico nacional (EPE, 2018a e b; MME, 2018; Rathmann (org.), 2017); La Rovere e outros, 2018; MCTI, 2018).

Com base nesses critérios, as tecnologias selecionadas são:

- Transporte: veículos leves (LDV, na sigla em inglês), ônibus e caminhões (híbridos, elétricos a bateria —BEV, na sigla em inglês— e com motor a combustão interna —ICE, na sigla em inglês— quando relevante);
- Geração centralizada de eletricidade: usina hidrelétrica, pequena central hidrelétrica (PCH), termelétrica a biomassa (florestal, bagaço de cana), central solar fotovoltaica, central heliotérmica (CSP, na sigla em inglês), central eólica *onshore* (em terra) ou *offshore* (no mar);
- Mini e microgeração de eletricidade: termelétrica a biogás (de resíduos agrícolas) e painéis fotovoltaicos distribuídos (solar FV);
- Biocombustíveis: bioetanol de cana, biodiesel de soja, biogás (de resíduos sólidos urbanos) e bioquerosene de aviação<sup>1</sup>.

A análise não considerou tecnologias de distribuição e armazenamento de energia, uma vez que existem dados escassos para essas tecnologias. O impacto das redes inteligentes, por exemplo, é bastante difuso e, portanto, difícil de avaliar.

## Construindo um painel de indicadores

A Parceria de Indicadores de Biodiversidade (Biodiversity Indicators Partnership, BIP) define um indicador como “uma medida baseada em dados verificáveis que traz mais informações que os meros dados”. Isso significa que os indicadores dependem do objetivo —a interpretação ou o significado atribuído aos dados depende do objetivo ou problema em questão (BIP, 2011). Os indicadores se estendem além das estatísticas básicas para fornecer um entendimento mais profundo das relações causais nonexo energia–ambiente–economia e para destacar vínculos que podem não ser evidentes a partir de estatísticas simples. Tomados em conjunto, os indicadores podem dar uma imagem abrangente do sistema energético, incluindo interligações e *trade-offs* entre várias dimensões do desenvolvimento sustentável, bem como as implicações a longo prazo das decisões e comportamentos atuais (Vera e Langois, 2006).

Fatores que determinam o que faz um indicador “bem-sucedido” dependem naturalmente de sua finalidade. Em essência, as características subjacentes dos indicadores incluem (GBEP, 2011; BIP, 2011):

- ser relevante para as necessidades dos usuários: um indicador deve ser relevante na medida em que deve medir o mais próximo possível a tendência de um tema ou um componente de um tema. Deve ser responsivo a mudanças na questão de interesse;
- ser cientificamente válido: existência de teoria consensual da relação entre o indicador e seu objetivo, com concordância de que a mudança no indicador indica mudança na questão em pleito;
- ser prático: a praticidade de um indicador contribuirá para a extensão de seu uso (voluntário), dependendo da disponibilidade dos dados, para que possa ser produzido regularmente ao longo do tempo e com esforço razoável.

Geralmente, os indicadores não fornecem respostas nem constituem uma norma ou *benchmark*. Tampouco são juridicamente vinculantes. Em vez disso, eles representam as perguntas certas a serem feitas na avaliação do efeito de práticas e políticas no cumprimento de metas definidas nacionalmente para o desenvolvimento sustentável.

## Indicadores de desempenho sistematizados por pilar

Os indicadores propostos para medir o desempenho de tecnologias energéticas de baixo carbono são classificados em três grandes dimensões do desenvolvimento sustentável: social, econômico e ambiental. Um quarto pilar transversal avalia a viabilidade institucional. Essa seção apresenta a seleção de indicadores.

<sup>1</sup> Ésteres hidroprocessados e ácidos graxos (HEFA, na sigla em inglês).

## Pilar ambiental

A produção e o uso de energia levam a importantes pressões antropogênicas sobre o meio ambiente, incluindo mudanças climáticas, poluição atmosférica local, desmatamento, perda de qualidade da água e do solo, entre outras. Muitos dos efeitos ambientais de atividades relacionadas à energia são de longo prazo e envolvem certo grau de incerteza. Os indicadores do pilar ambiental consideram esses aspectos, bem como riscos associados à atividade humana e desastres naturais.

Indicadores:

- Uso de água
- Impactos na qualidade da água e na biodiversidade aquática
- Uso da terra
- Impactos na qualidade do solo e na biodiversidade terrestre
- Emissões de gases de efeito estufa (GEE)
- Emissões não GEE
- Vulnerabilidade e riscos

## Pilar técnicoeconômico

O pilar técnicoeconômico avalia principalmente os custos de produção associados a diferentes tecnologias energéticas de baixo carbono, um aspecto subjacente que determina as decisões de alocação de mercado para tecnologias energéticas. Ele também contempla outros aspectos, como curva de aprendizagem, efeitos a montante e a jusante na cadeia de produção, eficiência energética e diversificação.

Indicadores:

- Eficiência na conversão e uso de energia
- Nível de prontidão ou maturidade da tecnologia (TRL, na sigla em inglês)
- Propriedade da tecnologia
- Custos de capital ou de investimento (CAPEX, na sigla em inglês)
- Custos de operação e manutenção (OPEX, na sigla em inglês)
- Custos totais
- Requisitos de infraestrutura associados
- Diversificação energética
- Prontidão da cadeia de suprimentos

## Pilar social

Os indicadores do pilar social abrangem a geração de renda e emprego, que estão intrinsecamente relacionadas ao crescimento econômico e a questões distributivas e apoio a políticas. Mas esses fatores devem considerar os possíveis impactos sobre a população local, os trabalhadores e o patrimônio. Esses são aspectos de equidade que podem prejudicar o apoio popular, principalmente em relação aos projetos de geração de energia.

Indicadores:

- Criação de emprego
- Geração de renda
- Acesso à eletricidade
- População diretamente afetada
- Incidência de lesões ocupacionais, doenças e óbitos
- Respeito às comunidades indígenas e tradicionais
- Riscos ao patrimônio cultural, histórico e arqueológico

### **Pilar político-institucional**

Por fim, há várias questões difíceis de quantificar ou mais qualitativas por natureza e que precisam ser levadas em consideração em qualquer processo de tomada de decisão e na formulação final das principais políticas energéticas (Vera e Langois, 2006). Esse é fundamentalmente o caso de indicadores medindo a viabilidade institucional, que compõem o pilar político–institucional. Segundo IRENA (2014), uma das razões pelas quais a viabilidade institucional tende a ser avaliada qualitativamente é que o critério não mede o sucesso, mas ajuda a explicar o potencial de uma política ser bem sucedida. Nesse sentido, os resultados também podem ser mais difíceis de interpretar, pois não incorporam uma referência métrica com a qual as comparações possam ser feitas. Essas dificuldades podem atrapalhar a avaliação da viabilidade institucional mais do que outros critérios para os quais os métodos quantitativos são mais adequados.

Indicadores:

- Simplicidade do processo de licenciamento ambiental
- Compatibilidade com a política energética e acordos internacionais
- Compatibilidade com o quadro regulatório e institucional existente

## II. Considerações metodológicas

O presente capítulo fornece considerações metodológicas importantes sobre o escopo e a abrangência dos cálculos realizados para um conjunto de indicadores (os resultados são apresentados no capítulo III). Os limites do sistema para o cálculo de indicadores devem ser claramente definidos e declarados, a fim de permitir um monitoramento e uma comparação adequados entre as tecnologias energéticas de baixo carbono.

A seleção dos indicadores para os quais as estimativas foram produzidas foi baseada em considerações sobre a aplicabilidade, disponibilidade e qualidade dos dados, bem como na relevância dos indicadores.

Alguns indicadores podem ser facilmente quantificados, sujeitos à disponibilidade dos dados. Outros envolvem um certo grau de subjetividade ou implicam requisitos tão altos de dados e suposições específicas que só podem ser avaliadas qualitativamente. Nesses casos, geralmente é aplicada uma escala qualitativa. Como dito anteriormente, os indicadores do pilar político-institucional só podem ser avaliados por meio de uma abordagem qualitativa, que está fora do escopo desse estudo.

### Pilar ambiental

#### Uso de água

**Tabela 1**  
Indicadores de uso de água

Descrição	
(1) Volume de água necessário para a produção e processamento de energia por unidade de energia produzida ou capacidade instalada	
(2) Volume de água necessário na produção por unidade de produção.	
Unidades de medida	
(1) m <sup>3</sup> / MW	(2) m <sup>3</sup> / unidade
(1) m <sup>3</sup> / MWh	
(1) m <sup>3</sup> / MJ	

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador permite avaliar as necessidades de uso direto de água para produção e uso de energia de uma determinada tecnologia. Pode ser aplicado à geração de eletricidade e aos biocombustíveis. Para usinas de geração de eletricidade (centralizada e mini/micro), o uso da água depende do tipo/fonte e valores nulos são esperados para algumas tecnologias. Para os biocombustíveis, o indicador compreende o uso da água na fase industrial da produção de biocombustíveis (por exemplo, a irrigação das culturas é excluída). Esse indicador não é aplicável às tecnologias de transporte e distribuição e armazenamento de energia, pois os requisitos de água durante a fase de operação podem ser considerados insignificantes.

## Uso da terra

**Tabela 2**  
Indicadores de uso da terra

Descrição
(1) Superfície total do terreno utilizada para a produção e processamento de energia por unidade de produção de energia ou capacidade instalada
Unidades de medida
(1) hectares/MW
(1) hectares/MJ

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador permite entender os requisitos de terra para produção e uso de energia de uma determinada tecnologia. As usinas de geração de energia ocupam a terra através de sua capacidade instalada (instalações e equipamentos). Portanto, esse indicador é aplicável a tecnologias centralizadas de geração de eletricidade e biocombustíveis. Os requisitos de terra para micro e minigeração de eletricidade podem ser considerados insignificantes, uma vez que os projetos geralmente são implementados em áreas já ocupadas com atividades humanas (por exemplo, comunidades rurais, telhados).

## Emissão de gases de efeito estufa

**Tabela 3**  
Indicadores de GEE

Descrição
(1) Emissões de GEE da produção e processamento de energia por unidade de produção de energia
Unidades de medida
(1) toneladas de CO <sub>2</sub> e / MWh
(1) toneladas de CO <sub>2</sub> e / MJ

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador compreende as emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE) devido à produção e ao uso de energia de uma determinada tecnologia. Os fatores de emissão dependem da fonte de energia empregada, como combustíveis, biomassa e eletricidade. Idealmente, os fatores de emissão devem ser sensíveis às especificidades regionais e de processamento.

Os GEE cobertos são dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), perfluorcarbonos (PFCs), hidrofluorcarbonetos (HFCs), hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) e trifluoreto de nitrogênio (NF<sub>3</sub>). Valores de GEE que não sejam CO<sub>2</sub> devem ser convertidos em CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e).

As emissões indiretas relacionadas ao ciclo de vida dos ativos/atividades (por exemplo, durante a produção, processamento, transporte, descarte etc.) estão fora do escopo da presente análise, pois sua avaliação requer uma metodologia complexa, fortemente dependente da formulação de premissas, cenários e requisitos de muitos dados. Contudo, quando disponíveis, os dados são apresentados para fins de comparação.

Esse indicador é aplicável ao transporte (somente fase de operação), tecnologias de geração de eletricidade e biocombustíveis.

## Emissões não GEE

**Tabela 4**  
**Indicadores não GEE**

Descrição	
(1) Emissões de poluentes do ar não GEE a partir da produção e processamento de energia por unidade de produção de energia	
(2) Maior ocorrência de doenças respiratórias por unidade de produção de energia	
Unidades de medida	
(1) toneladas/MWh	(2) escala qualitativa
(1) toneladas/MJ	

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador permite analisar as emissões diretas de gases que não causam o efeito estufa, devido à produção e ao uso de energia de uma determinada tecnologia. Os não GEEs abrangidos são: material particulado de 2,5 micrômetros de diâmetro ( $PM_{2,5}$ ), partículas de 10 micrômetros de diâmetro ( $PM_{10}$ ), monóxido de carbono (material particulado de  $CO$  com 2,5 micrômetros de diâmetro), óxidos nitrosos ( $NO_x$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e aldeídos (RCHO).

Os não GEE estão relacionados principalmente à poluição local do ar, que se origina de diferentes fontes e apresenta efeitos indesejáveis, descritos abaixo:

- $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  (geração de energia, transporte): doenças respiratórias;
- $CO$  (transporte, geração de energia): reduz a quantidade de oxigênio que pode ser transportada na corrente sanguínea para órgãos críticos como coração e cérebro;
- $NO_x$  (geração de energia, transporte, agricultura): doenças respiratórias, chuva ácida, poluição fotoquímica;
- $SO_2$  (transporte): doenças respiratórias, chuva ácida; e
- RCHO (transporte, especialmente bioetanol): compostos cancerígenos, doenças respiratórias.

As emissões indiretas relacionadas ao ciclo de vida dos ativos/atividades (por exemplo, durante a produção, processamento, transporte, descarte etc.) estão fora do escopo da análise, pois sua avaliação requer uma metodologia complexa, fortemente dependente da formulação de premissas e requisitos de muitos dados.

Esse indicador é aplicável às tecnologias de transporte (somente fase de operação) e geração de eletricidade. Mas para as tecnologias de geração de eletricidade analisadas, as emissões foram consideradas desprezíveis. Para os biocombustíveis, as emissões não GEE não são avaliadas, uma vez que estão relacionadas principalmente às queimadas do canavial (Violante, 2018), o que está fora do escopo dessa análise e está se tornando uma prática ultrapassada. As emissões da combustão de biocombustíveis são contabilizadas no setor de transporte.

## Pilar técnicoeconômico

### Nível de prontidão da tecnologia (TRL, na sigla em inglês)

**Tabela 5**  
**Indicador TRL**

Descrição
(1) Nível de maturidade de uma determinada tecnologia em relação ao seu ciclo de desenvolvimento
Unidades de medida
(1) escala de 1 a 9, sendo: TRL 1 – Princípios básicos observados e relatados TRL 2 – Conceito e/ou aplicação tecnológica formulada TRL 3 – Função crítica e experimental analítica e/ou prova de conceito característica TRL 4 – Validação de componente e/ou protótipos de ensaio em ambiente de laboratório TRL 5 – Validação de componente e/ou protótipos de ensaio em ambiente relevante TRL 6 – Modelo de sistema/subsistema ou demonstração de protótipo em um ambiente relevante TRL 7 – Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente operacional TRL 8 – Sistema real concluído e qualificado através de teste e demonstração TRL 9 – Sistema real comprovado através da operação em condições reais

Fonte: Elaboração própria com base em comunicação interna com a Agência Internacional de Energia (IEA). Esse indicador mede a viabilidade técnica de uma determinada tecnologia em nível global. Ele mede se as aplicações estão nas fases experimental ou de demonstração (baixa disponibilidade) ou se foram alcançados estágios quase comerciais em larga escala (alta disponibilidade), ver tabela 5.

Dentro de uma determinada tecnologia, opções e rotas em diferentes níveis de TRL podem ser encontradas (por exemplo, FV solar e FV solar com filme orgânico de grafeno são incluídas na mesma categoria, mas encontradas em diferentes estágios em suas curvas de aprendizagem). Nesse caso, a análise deve considerar a opção mais avançada, ou seja, aquela com o TRL mais alto.

O TRL é aplicável a todas as tecnologias de baixo carbono, exceto para redes inteligentes, pois envolve um pacote de diferentes tecnologias e exigiria uma metodologia complexa, fortemente dependente da formulação de suposições e requisitos de dados pesados.

### Custos de capital (CAPEX, na sigla em inglês)

**Tabela 6**  
**Indicadores de CAPEX**

Descrição	
(1) Requisitos de capital total por unidade de produção de energia ou capacidade instalada	
(2) Requisitos de capital total por unidade de produção	
Unidades de medida	
(1) \$ / MW	(2) \$ / unidade
(1) \$ / MJ	

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador compreende os investimentos (CAPEX) em uma determinada tecnologia: investimentos em bens de capital (máquinas, equipamentos e qualquer tipo de capital físico). Geralmente indica os custos iniciais necessários para implantar uma determinada tecnologia.

Prevê-se uma redução de custos para muitas das tecnologias de baixo carbono selecionadas no futuro, principalmente para aquelas que estão nos estágios iniciais de suas curvas de aprendizagem. Uma avaliação completa exige que os custos sejam apresentados para os níveis atuais e futuros. Os níveis atuais devem abranger os dados mais recentes disponíveis (por exemplo, de 2015 a 2019). Os custos futuros visam o período de 2025 a 2030. Esse indicador é aplicável a todas as tecnologias de baixo carbono selecionadas.

## Custos operacionais (OPEX, na sigla em inglês)

**Tabela 7**  
Indicadores OPEX

Descrição	
(1) Custos operacionais anuais totais por unidade de produção de energia	
(2) Custos operacionais anuais totais por unidade	
Unidades de medida	
(1) \$ / MWh	(2) \$ / unidade
(1) (2) \$ / MJ	

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador refere-se a gastos operacionais (OPEX) relativos a uma determinada tecnologia: despesas de manutenção, mão de obra, combustível, entre outras. Dado que o OPEX depende fortemente do preço das *commodities* energéticas, apenas os níveis atuais foram definidos (dados disponíveis mais recentemente). Esse indicador é aplicável a todas as tecnologias de baixo carbono selecionadas.

## Custos totais

**Tabela 8**  
Indicadores de custo total

Descrição	
(1) Custos totais (anualizados) por unidade de produção de energia	
(2) Custos totais (anualizados) por unidade	
Unidades de medida	
(1) \$ / MWh	(2) \$ / unidade
(1) (2) \$ / MJ	

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

Esse indicador permite avaliar o custo total da implantação de uma determinada tecnologia<sup>2</sup>. Para cada categoria, é definido por uma metodologia diferente, a saber: (i) Custo Nivelado da Eletricidade (LCOE, na sigla em inglês) para tecnologias de geração elétrica; (ii) Custo Total de Propriedade (TCO, na sigla em inglês) para tecnologias de transporte; e (iii) Custo Nivelado de Combustível (LCOF, na sigla em inglês) para biocombustíveis. Essas metodologias estão detalhadas no anexo 7.

## Diversificação energética

Esse indicador descreve a contribuição potencial de uma determinada tecnologia para a segurança energética, medida pela diversificação das fontes de suprimento. É aplicável à geração de eletricidade<sup>3</sup> e biocombustíveis para 2018, calculando um índice de concentração<sup>4</sup> que contrasta cenários com e sem a fonte de energia (alocando as frações relacionadas ao uso alternativo mais provável). Considera que as tecnologias de geração de eletricidade substituem a termelétrica a gás natural. Para os biocombustíveis, considerou-se que o etanol substitui a gasolina e o biodiesel substitui o diesel.

<sup>2</sup> Esse indicador não pode ser expresso como a simples soma de CAPEX e OPEX. Ele requer uma metodologia mais complexa, que leva em consideração diversas variáveis, como fatores de anualização, premissas sobre o fator de capacidade (para tecnologias de geração de eletricidade), expectativa de vida e taxas de desconto, entre outras.

<sup>3</sup> Exceto a grandes centrais hidrelétricas, que responde por grande parte da matriz energética brasileira e não pode ser considerada uma fonte alternativa.

<sup>4</sup> Índice de Herfindal-Hirschman.

## Pilar social

### Criação de emprego

Esse indicador captura a geração direta bruta de emprego relacionada a uma determinada tecnologia, incluindo empregos temporários (contrato a termo) e permanentes (por tempo indeterminado). Não captura trabalhos indiretos ou induzidos, uma vez que isso exigiria métodos e suposições sofisticados. Trabalhos relacionados à pesquisa e desenvolvimento também não são contemplados. É aplicável para geração de eletricidade e biocombustíveis, sujeito à disponibilidade de dados.

**Tabela 9**  
**Indicadores de criação de emprego**

Descrição		
(1) Empregos diretos criados durante o pico da construção		
(2) Empregos diretos criados durante a fase de operação (incluindo manutenção)		
(3) Empregos diretos criados durante a produção		
Unidades de medida		
(1) empregos / MW	(2) (3) empregos / MJ	(3) empregos / unidade

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

### Geração de renda

Por fim, esse indicador mede as mudanças na renda salarial e não salarial devido à implantação de uma tecnologia. Relaciona-se com os possíveis conexões futuras, promovendo o desenvolvimento econômico. Considera a geração direta de renda (lucro real), bem como a renda indireta e induzida<sup>5</sup>. Contudo, o escopo é delimitado para os efeitos locais. Foi avaliado para algumas tecnologias de geração de energia, sujeitas à disponibilidade de dados.

**Tabela 10**  
**Indicadores de geração de renda**

Descrição		
(1) Impacto direto na renda relacionado à implantação de uma tecnologia		
(2) Impacto indireto na renda relacionado à implantação de uma tecnologia		
(3) Impacto induzido sobre a renda relacionado à implantação de uma tecnologia		
Unidades de medida		
(1) (2) (3) \$ / MW		

Fonte: Elaboração própria com base em informações do Grupo de Trabalho do Eixo 2 do EBP.

<sup>5</sup> As despesas efetivamente relacionadas ao projeto são conhecidas como impacto direto (por exemplo, trabalhadores da construção civil no local, fabricantes de equipamentos, pessoal de segurança etc.). Os efeitos econômicos de implicações em toda a cadeia de valor, que ocorrem como resultado desses gastos, são o impacto indireto (por exemplo, fornecedores de equipamentos de construção, serviços jurídicos e contábeis). O impacto induzido está relacionado às despesas feitas pelos ganhos dos trabalhadores que são suportadas por impactos diretos e indiretos (por exemplo, moradias, restaurantes, serviços em geral).

### III. Resultados e discussão

Foi realizada uma avaliação quantitativa para produzir estimativas para 11 dos 26 indicadores apresentados inicialmente no capítulo I. Quando relevante ou aplicável, são mostrados os valores da tecnologia de referência que pode ser potencialmente substituída pela solução energética de baixo carbono (por exemplo, usinas termelétricas a gás natural ou veículos com motores de combustível fóssil—ICE, na sigla em inglês), para fins de comparação. Os indicadores monetários são apresentados em dólares americanos, com valores constantes de 2018<sup>6</sup>.

Os dados são obtidos de diversas fontes, que empregam diferentes metodologias e premissas. A interpretação dos resultados deve levar isso em consideração. Os resultados apresentados no presente capítulo foram validados por uma equipe de especialistas do *Workshop Energy Big Push* realizado em Brasília nos dias 30 e 31 de outubro de 2019 (ver anexo 1 para lista de participantes).

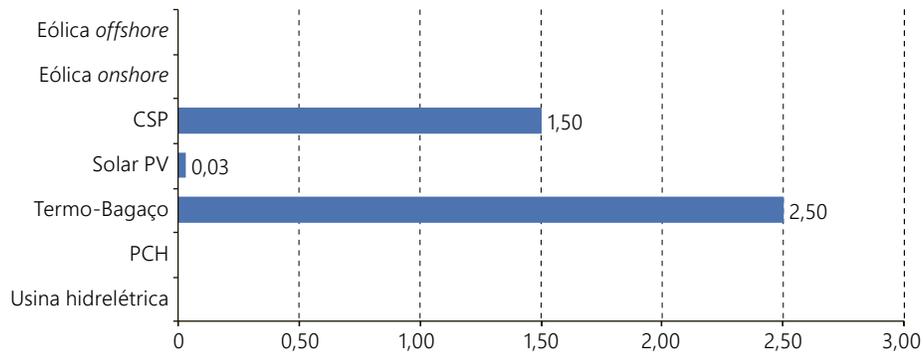
#### Geração de electricidade

##### Uso de água

Para termelétricas a biomassa e CSP, a água é consumida diretamente no processo de resfriamento durante a fase de operação. Na geração solar fotovoltaica (solar FV), o uso da água está relacionado principalmente à limpeza do painel e é muito limitado. Para geração hidrelétrica (grande ou pequena), a água não é consumida diretamente pelas usinas e as perdas são causadas pelo ciclo natural da água, ou seja, processo de evaporação dos reservatórios. Para as centrais eólicas (*onshore* ou *offshore*), não há consumo de água (IRENA/WRI, 2018).

<sup>6</sup> Taxa de câmbio média (2018): 3,65 BRL/US\$ (Banco Central do Brasil, 2019).

**Gráfico 1**  
**Uso da água para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade**  
 (Em  $m^3/MWh$ )

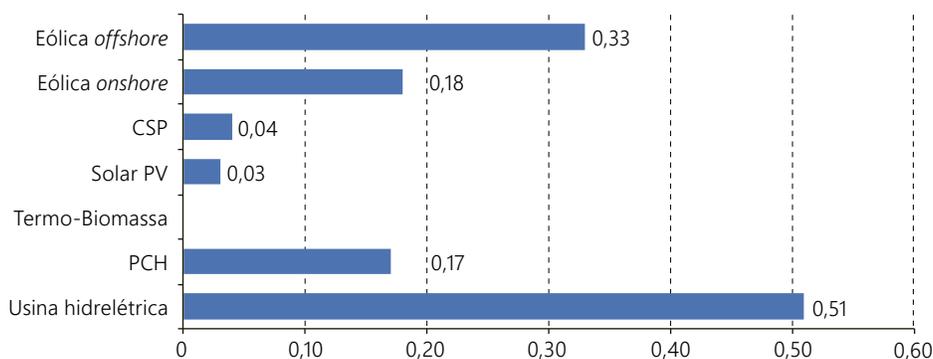


Fonte: Elaboração própria com base na Agência Nacional de Águas (ANA), *Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil*, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), Brasília, 2019; e Bukhary, Saria, Sajjad Ahmad e Jacimaria Batista, "Analisando os requisitos de terra e água para implantação solar no sudoeste dos Estados Unidos", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, 2018.

## Uso da terra

As usinas de geração de eletricidade ocupam a terra através de sua capacidade instalada (instalações e equipamentos). No caso de usinas hidrelétricas, são computadas as terras inundadas transformadas em reservatórios. Para usinas termelétricas movidas a biomassa, os requisitos de terra associados a culturas energéticas também devem ser considerados. Para tecnologias solares e eólicas, os requisitos de terra estão relacionados à instalação e espaçamento dos equipamentos (painéis e turbinas). Para energia eólica, especificamente, o espaçamento depende do tamanho e arranjo das turbinas; portanto, um valor médio para projetos existentes foi usado como referência.

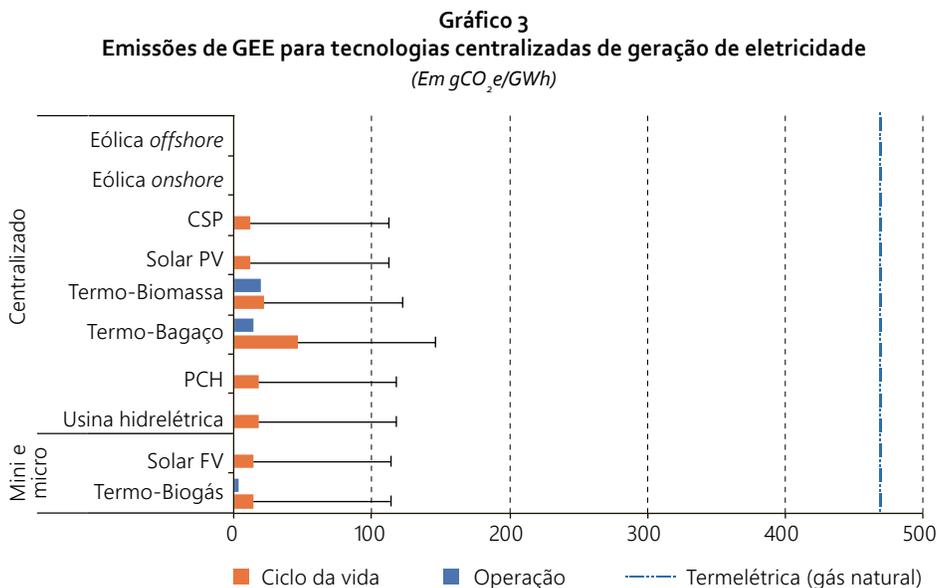
**Gráfico 2**  
**Uso da terra para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade**  
 (Em  $km^2/MW$ )



Fonte: Elaboração própria com base em Bukhary, Saria, Sajjad Ahmad e Jacimaria Batista, "Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 82, 2018; Musial, Walt e outros (2016), *Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States*, Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), Golden, CO; Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica EPE 026/2018 – Análise socioambiental das fontes energéticas do PDE 2027*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), novembro; e Simsek, Yeliz, David Watts e Rodrigo Escobar (2018), "Sustainability evaluation of Concentrated Solar Power (CSP) projects under Clean Development Mechanism (CDM) by using Multi Criteria Decision Method (MCDM)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 93, outubro.

### Emissão de gases de efeito estufa

Algumas fontes de energia não geram emissões de GEE durante a operação, mas ao considerar todo o seu ciclo de vida, as emissões não são desprezíveis. Assim, quando disponíveis, os dados são mostrados tanto para as emissões durante a operação como para o ciclo de vida. As emissões de GEE do ciclo de vida estavam disponíveis para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade no Relatório Especial de Fontes de Energia Renováveis e Mitigação das Mudanças Climáticas do IPCC (2006). Para comparação, também são mostradas emissões diretas da operação de usinas termelétricas a gás natural.



Fonte: Elaboração própria com base em Edenhofer Ottmar e outros (eds.), *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge, United Kingdom, IPCC, 2011; e Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, Simon e outros (Eds.), Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japão, 2006.

### Nível de prontidão da tecnologia

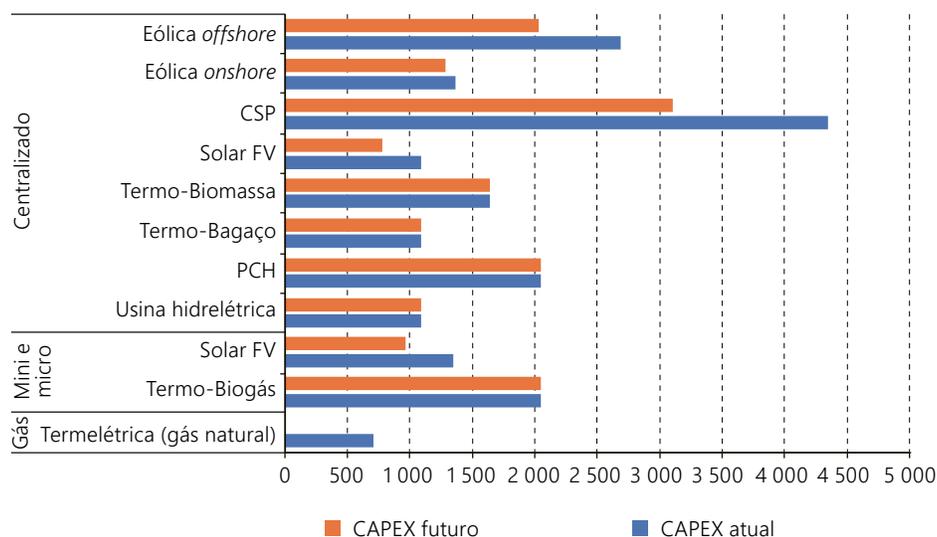
Para todas as tecnologias de geração de eletricidade analisadas, o TRL considerado foi 9, o mais alto, conforme definido de acordo com comunicação interna com a Agência Internacional de Energia (IEA). Isso significa que todas as tecnologias selecionadas estão em um estágio maduro de desenvolvimento tecnológico.

### Custos de capital (CAPEX)

Para a geração de eletricidade, os dados são apresentados tanto em custos atuais (dados disponíveis mais recentes) quanto em estimativas futuras (compreendendo o período de 2025 a 2030), pois são esperadas reduções de custos para algumas tecnologias no curto prazo.

Para comparação, também são mostrados os custos das usinas termelétricas a gás natural. Atualmente, essa fonte possui um CAPEX menor do que qualquer outra fonte. Num futuro próximo, apenas a energia solar fotovoltaica centralizada seria competitiva em relação ao gás natural em termos de custos de capital.

**Gráfico 4**  
**CAPEX para tecnologias de geração de eletricidade**  
 (Em US\$/kW)

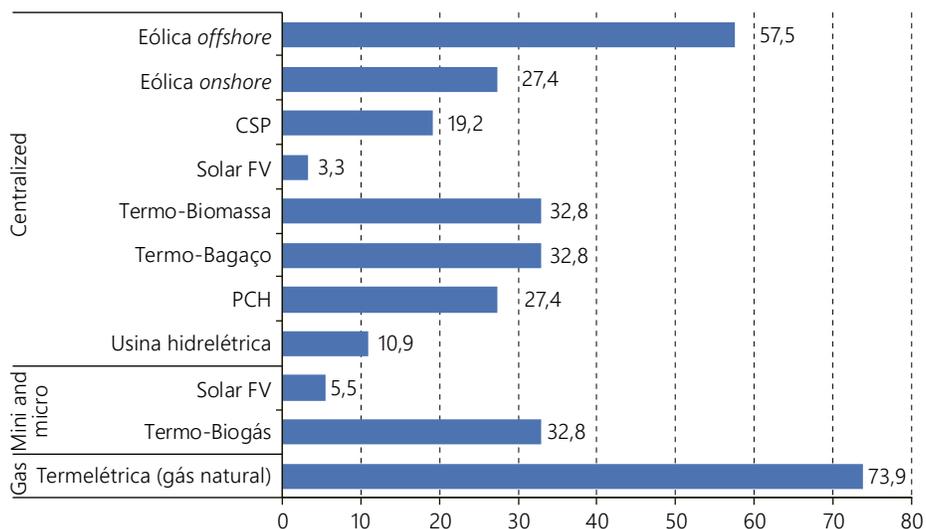


Fonte: Elaboração própria com base em na Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Estudos para Expansão da Geração – Custo Marginal de Expansão do Setor Elétrico Brasileiro Metodologia e Cálculo – 2017*, Brasília, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), 2017; e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica PR 18/07 – Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), novembro de 2018.

### Custos operacionais (OPEX)

Para comparação, também são mostrados custos operacionais para usinas termelétricas a gás natural. Embora a geração a gás natural seja mais barata em termos de CAPEX, seu OPEX é significativamente maior do que qualquer outra fonte examinada, principalmente devido aos custos de combustível.

**Gráfico 5**  
**OPEX para tecnologias de geração de eletricidade**  
 (Em US\$/kW/ano)

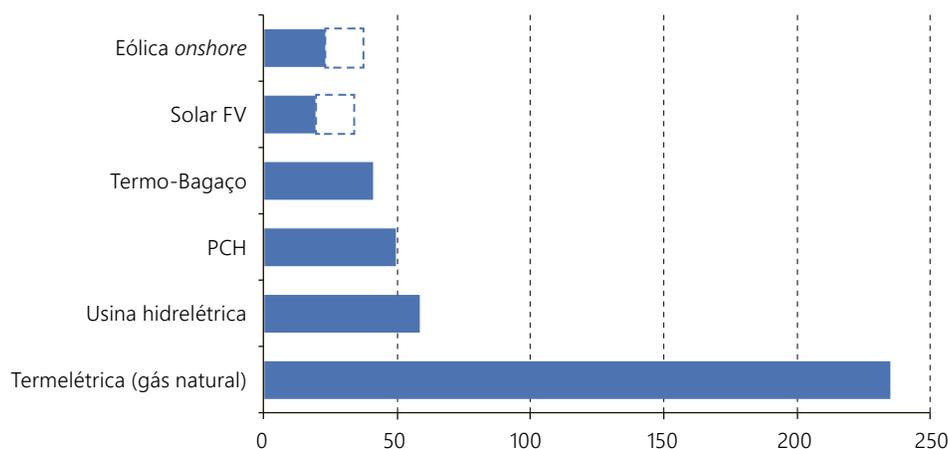


Fonte: Elaboração própria com base em Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica PR 07/18 - Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), novembro, 2018.

## Custos totais

Para a geração de eletricidade com tecnologias de baixo carbono, os custos totais são apresentados em termos do custo nivelado da eletricidade (LCOE; ver detalhes do anexo 7). A faixa de custo de geração das energias eólica e solar fotovoltaica se deve ao fato de os custos variarem regionalmente, sendo mais baixos na região Nordeste e mais altos na região Sul do Brasil. Para comparação, também são apresentados os custos totais das usinas termelétricas a gás natural. Os custos nesse caso são mais altos que os das outras fontes analisadas.

**Gráfico 6**  
LCOE para tecnologias centralizadas de geração de eletricidade  
(Em US\$/MWh)



Fonte: Elaboração própria com base em PSR, *Custos e Benefícios das Fontes de Geração Elétrica: Caderno de Geração*, Instituto Escolhas, agosto de 2018.

## Diversificação energética

**Tabela 11**  
Contribuição para a diversificação energética em 2017  
(Em porcentagens)

Geração de eletricidade	Percentual da geração de eletricidade no ano
<b>Geração centralizada de eletricidade</b>	
Grande hidrelétrica	não aplicável
Pequena hidrelétrica	1,2
Termelétrica (bagaço)	1,9
Termelétrica (biomassa)	0,3
Solar FV	0,2
CSP	não aplicável
Eólica onshore	2,5
Eólica offshore	não aplicável
<b>Mini e micro geração de eletricidade</b>	
Termelétrica (biogás) <sup>a</sup>	0,00
Solar FV	0,02

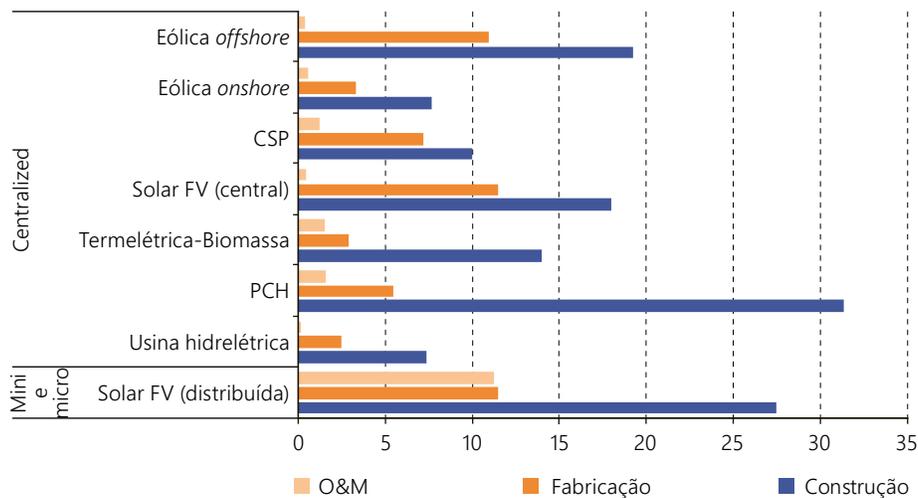
Fonte: Elaboração própria com base em Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Balanço Energético Nacional 2018: Relatório síntese*, ano base 2017, Brasília, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), 2018.

<sup>a</sup> Estimado.

## Criação de emprego

Para geração de eletricidade, são apresentados níveis de criação de emprego para as fases de construção, fabricação e operação. No setor sucroalcooleiro, as unidades de cogeração de electricidade não agregam uma quantidade expressiva de empregos diretos, uma vez que essa atividade também está associada à produção de açúcar e etanol. A energia solar FV distribuída é uma grande fonte de empregos, especialmente em atividades de operações e manutenção (O&M), inclusive porque a atividade é geograficamente difusa.

**Gráfico 7**  
Criação de emprego para tecnologias de geração de eletricidade  
(Em empregos/MW ou empregos/MW/ano)

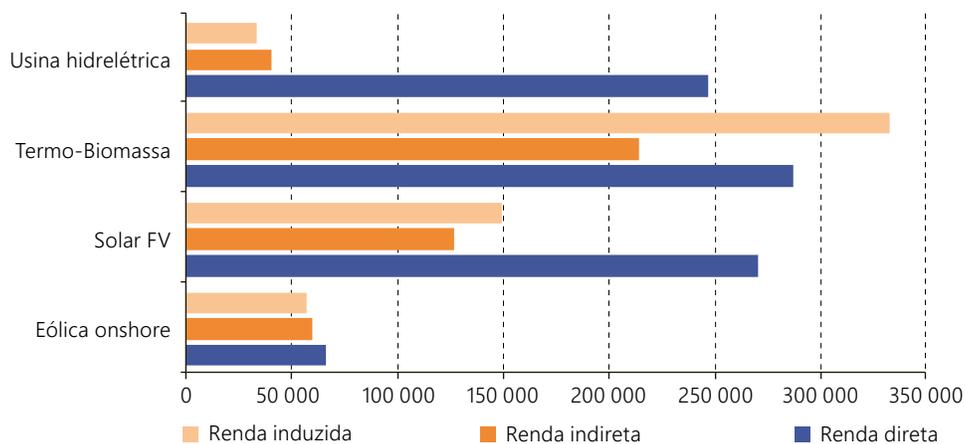


Fonte: Elaboração própria com base em Greenpeace, *Revolução Energética – Rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis*, Rio de Janeiro, 2016; Agência Internacional de Energia (IEA), *World Energy Investment*, Paris, 2017; Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica EPE 026/2018 – Análise socioambiental das fontes energéticas do PDE 2027*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), Novembro; 2018; e International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019*, Junho de 2019.

Nota: O&M significa operação e manutenção.

## Geração de renda

**Gráfico 8**  
Geração de renda para tecnologias de geração centralizada de eletricidade  
(Em mil US\$/MW/ano)



Fonte: Elaboração própria com base em Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), "Emissões Veiculares no Estado São Paulo – Fator de Emissão 2018" [online], <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>, 2019.

A geração de renda direta, indireta e induzida foi avaliada em quatro categorias de geração de eletricidade, de acordo com a disponibilidade dos dados: grandes hidrelétricas, solar fotovoltaica, termelétrica a biomassa florestal e eólica *onshore*<sup>7</sup>.

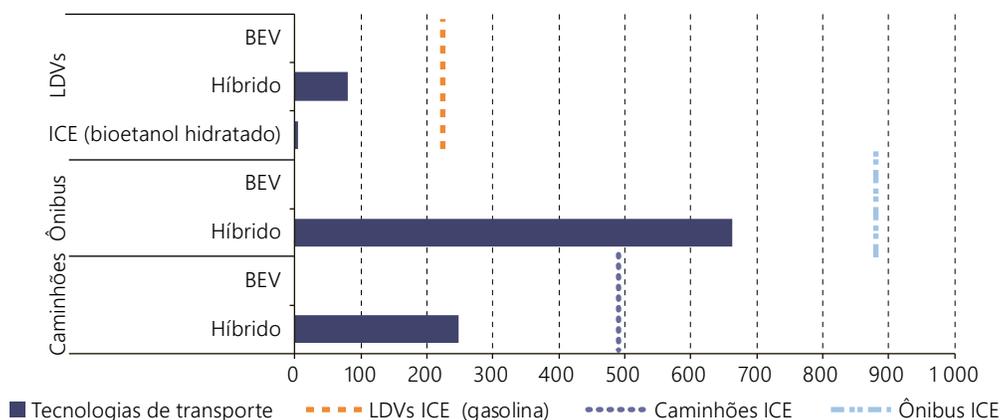
## Transporte

### Emissão de gases de efeito estufa

Para as tecnologias de transporte, foram consideradas as seguintes premissas: veículos híbridos requerem, em média, 50% menos combustível<sup>8</sup> que os veículos ICE correspondentes; emissões de CO<sub>2</sub> a partir de bioetanol são zero, considerando o ciclo de vida da biomassa; emissões do escapamento dos veículos elétricos a bateria (battery electric vehicles, BEV) são nulas. Embora o fator de emissão da rede elétrica possa ser computado em análises de escopo estendido, essa abordagem não foi seguida, dada a incerteza em relação ao fator de emissão da rede a ser considerado.

Embora caminhões e ônibus usem diesel no Brasil, o consumo de combustível para caminhões é menor do que nos ônibus urbanos, principalmente devido às diferenças nas condições de direção (por exemplo, paradas, tráfego).

**Gráfico 9**  
Emissões de GEE para tecnologias de transporte  
(Em gCO<sub>2</sub>e/km)



Fonte: Elaboração própria com base em International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019*, junho de 2019.

Nota: LVDs é a sigla de *light-duty vehicles* (veículos leves), BEV é de *battery-electric vehicles* (veículos elétricos) e ICE, de *internal combustion engine* (motores de combustão interna).

### Emissões não GEE

Para as tecnologias de transporte, os principais poluentes do ar analisados foram monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) e aldeídos (RCHO).

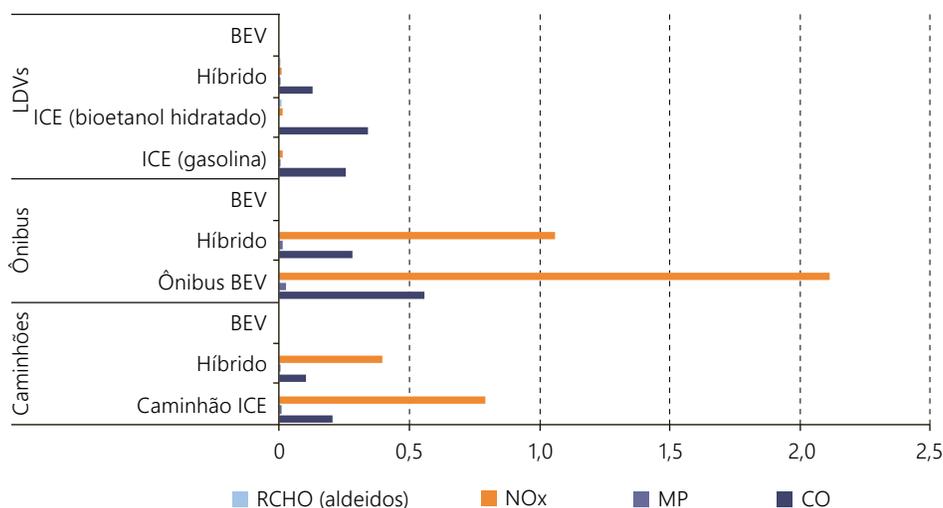
Entre os combustíveis avaliados, as emissões de MP e aldeídos são insignificantes. Para veículos ICE movidos a bioetanol hidratado, o CO é o poluente mais expressivo. Para veículos a diesel híbridos, o NO<sub>x</sub> é a fonte mais importante de poluição do ar.

<sup>7</sup> Os cálculos foram realizados usando o modelo Jedi, que aplica dados locais específicos para projetos de geração de eletricidade da seguinte forma: dados dos Estados Unidos para energia hidrelétrica, dados do México para energia solar fotovoltaica, dados da Colômbia para energia eólica e dados da África do Sul para biomassa. Os resultados devem ser interpretados levando isso em consideração.

<sup>8</sup> Depende de outros fatores, como o tipo de veículo híbrido, o comportamento ao dirigir e o alcance.

Para comparação, também são mostrados os valores de emissão para veículos ICE convencionais movidos a gasolina e diesel. Para veículos a gasolina, o CO é o poluente mais significativo, mas as emissões são inferiores às dos veículos ICE a bioetanol hidratado. E para veículos a diesel, o NOx é o poluente mais significativo, especialmente para ônibus urbanos.

**Gráfico 10**  
Emissões não GEE para tecnologias de transporte  
(Em g/km)



Fonte: Elaboração própria com base em International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019*, Junho de 2019.

Nota: LVDs é a sigla de *ligh-duty vehicles* (veículos leves), BEV é de *battery-electric vehicles* (veículos elétricos) e ICE, de *internal combustion engine* (motores de combustão interna).

### Nível de prontidão da tecnologia (TRL)

O TRL para a tecnologia de transporte também foi definido de acordo com comunicação interna com a Agência Internacional de Energia.

**Tabela 12**  
Nível de prontidão da tecnologia (*technology readiness level*, TRL) para tecnologias de transporte

Tecnologias	TRL
LDV híbrido	9
BEV LDV	9
ICE LDV	9
Ônibus híbrido	9
Ônibus BEV	8
Caminhão híbrido	8
Caminhão BEV	8

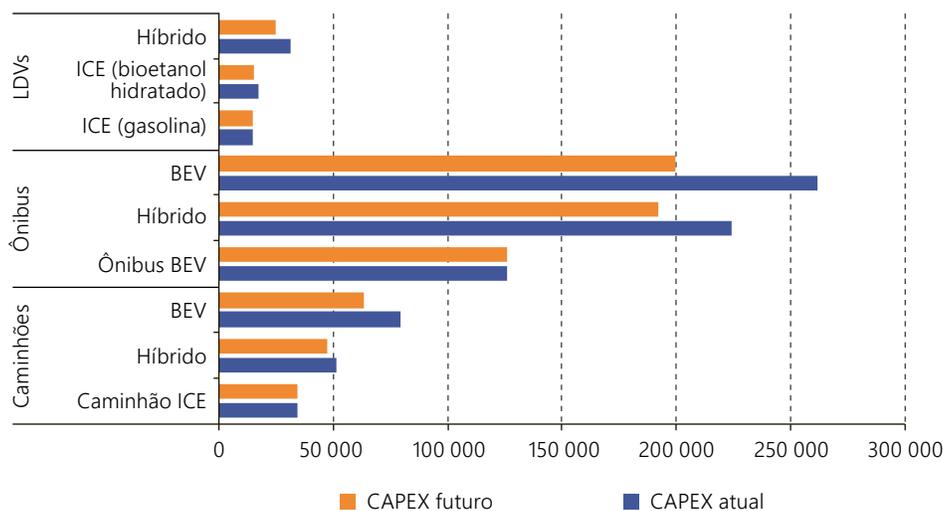
Fonte: Elaboração própria com base em comunicação interna com a IEA.

Nota: LVDs é a sigla de *ligh-duty vehicles* (veículos leves), BEV é de *battery-electric vehicles* (veículos elétricos) e ICE, de *internal engine combustion* (motores de combustão interna).

## Custos de capital (CAPEX)

Para veículos, os dados são apresentados tanto em custos atuais (dados disponíveis mais recentes) como nas estimativas futuras (compreendendo o período de 2025 a 2030). Para comparação, os valores de CAPEX para veículos ICE também são mostrados. Para todos os casos, o CAPEX dos veículos convencionais ICE atualmente é menor que o CAPEX das tecnologias alternativas avaliadas. Mas são esperadas reduções para algumas tecnologias, especialmente aquelas atualmente com TRL 8 (ver capítulo II).

**Gráfico 11**  
**CAPEX para tecnologias de transporte**  
 (Em milhares de US\$/veículo)



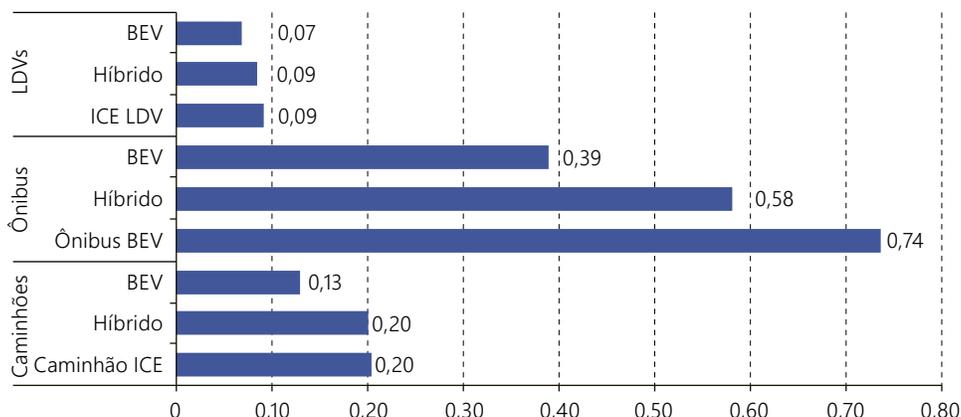
Fonte: Elaboração própria com base em C4o, *Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets*, C4o Cities, Climate Leadership Group, Clinton Foundation, Inter American Development Bank, julho, 2013; Delft, *Zero emissions trucks: An overview of state-of-the-art technologies and their potential*, Stuttgart, julho, 2013; Docklands Light Railway (DLR), *Project Report: Alternative Transport Technologies for Megacities*, German Aerospace Centre, Institute of Vehicle Concept, Stuttgart, February, 2015; Greenpeace, *Dossiê Ônibus Limpo: Benefícios de uma transição para combustíveis renováveis na frota de São Paulo*, São Paulo, agosto, 2016; International Council on Clean Transportation (ICCT), *PROMOBE: Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas*, Brasília, Agência Alemã de Cooperação Internacional/Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (GIZ/MDIC), novembro, 2019; e Union of Concerned Scientists (UCS), "Electric Vehicle Batteries: Materials, Cost, Lifespan" [online] <https://www.ucsusa.org/resources/ev-batteries>, 2018.

Nota: LDVs é a sigla de *ligh-duty vehicles* (veículos leves), BEV é de *battery-electric vehicles* (veículos elétricos) e ICE, de *internal combustion engine* (motores de combustão interna).

## Custos operacionais (OPEX)

Para comparação, os valores OPEX para veículos ICE também são mostrados. Para todos os casos, o OPEX para veículos convencionais ICE é maior que o OPEX para as tecnologias alternativas avaliadas. Isso se deve a maiores gastos com combustível e também aos requisitos mais altos de manutenção dos veículos ICE quando comparados ao BEVs, por exemplo, que possuem menos componentes que os veículos ICE.

**Gráfico 12**  
**OPEX para tecnologias de transporte**  
*(Em US\$/km)*

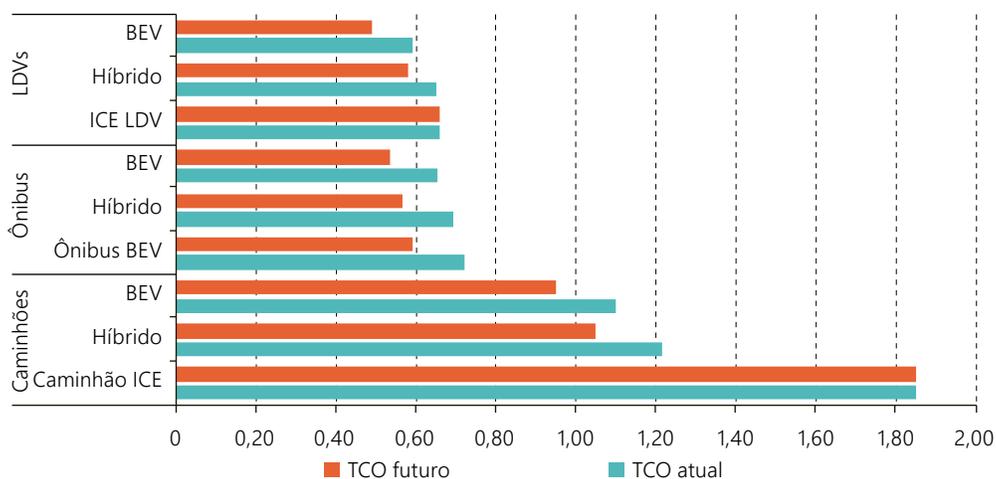


Fonte: Elaboração própria com base em International Council on Clean Transportation (ICCT), *PROMOBE: Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas*, Brasília, Agência Alemã de Cooperação Internacional/Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (GIZ/MDIC), novembro, 2019; Union of Concerned Scientists (UCS), "Electric Vehicle Batteries: Materials, Cost, Lifespan" [online] <https://www.ucsusa.org/resources/ev-batteries>, 2018; e Agência Internacional de Energia (IEA), *World Energy Outlook 2018*, IEA, Paris, 2018. Nota: LVDs é a sigla de *light-duty vehicles* (veículos leves), BEV é de *battery-electric vehicles* (veículos elétricos) e ICE, de *internal engine combustion* (motores de combustão interna).

### Custos totais

Para o transporte, os custos totais são apresentados em termos do custo total de propriedade (TCO; ver detalhes do anexo 7). Atualmente, em termos de TCO, os veículos híbridos e elétricos são atualmente mais competitivos que os veículos ICE, principalmente devido ao menor OPEX, como mostrado anteriormente. Além disso, reduções ainda são esperadas.

**Gráfico 13**  
**TCO para tecnologias de transporte**  
*(Em US\$/km)*



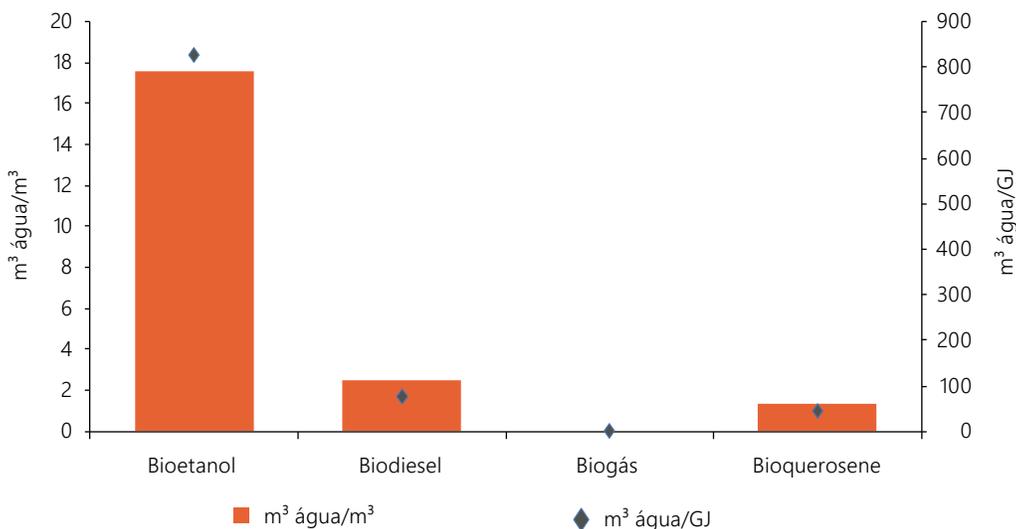
Fonte: Elaboração própria com base em International Council on Clean Transportation (ICCT), *PROMOBE: Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas*, Brasília, Agência Alemã de Cooperação Internacional/Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (GIZ/MDIC), novembro, 2019; Hagman, Jeans e outros, "Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion", *Research in Transportation Business & Management*, vol. 18, March, 2016; Lajunen, Antti e Timothy Lipman, "Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses", *Energy*, vol 106, julho, 2016; e Agência Internacional de Energia (IEA), *IEA G2o Hydrogen report: Assumptions*, Paris, 2019. Nota: LVDs é a sigla de *light-duty vehicles* (veículos leves), BEV é de *battery-electric vehicles* (veículos elétricos) e ICE, de *internal engine combustion* (motores de combustão interna).

## Biocombustíveis

### Uso de água

Somente o uso da água para o processamento de biocombustíveis durante a fase industrial foi considerado. A irrigação durante a fase agrícola não foi computada, devido à grande diversidade de culturas e às práticas agrícolas brasileiras, que raramente usam irrigação na produção de matérias-primas para biocombustíveis.

**Gráfico 14**  
**Uso da água para tecnologias de biocombustíveis**  
 (Em  $m^3$  água/GJ e  $m^3$  água/ $m^3$  biocombustível)



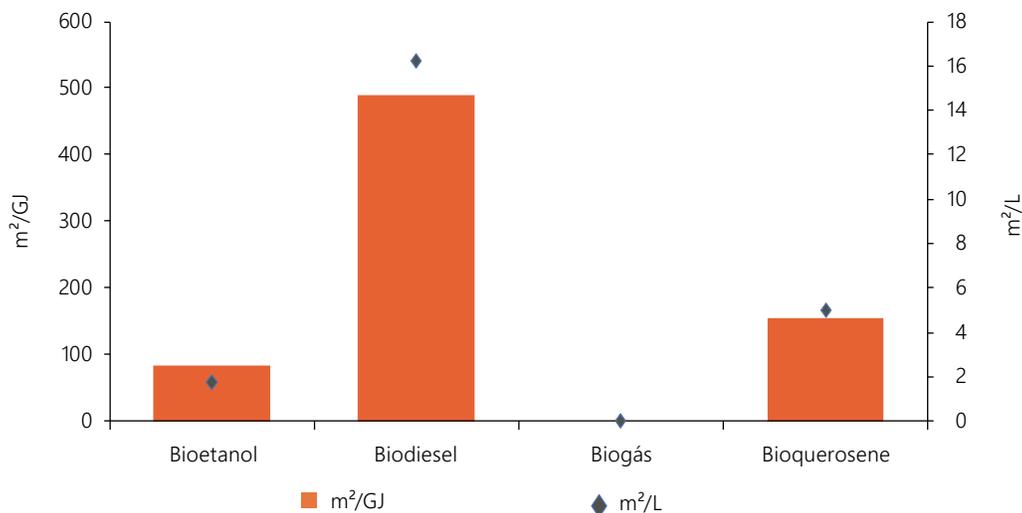
Fonte: Elaboração própria com base em Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), "RenovaCalc 2019" [online], [www.anp.gov.br/images/Consultas\\_publicas/CP10-2018\\_Calculadora](http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/CP10-2018_Calculadora), 2019.

### Uso da terra

Para os biocombustíveis, o uso da terra está relacionado principalmente a culturas agrícolas dedicadas ao fornecimento (não residual) de biomassa. Mas é necessário levar em consideração que os biocombustíveis no Brasil são coprodutos de culturas agrícolas, que no caso de soja ou milho, por exemplo, são extraídos simultaneamente, sem competir com a produção da proteína para uso alimentar.

As necessidades de terras para o biodiesel são maiores que para o bioetanol, porque a produtividade da cultura de cana é muito maior (dez vezes mais) que a da soja, principal matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil. Também, a quantidade de bioquerosene é maior que a quantidade de biodiesel, sendo ambos produzidos a partir da soja. Para o biogás, os requisitos de terra são nulos, pois a fonte é residual.

**Gráfico 15**  
**Uso da terra para tecnologias de biocombustíveis**  
*Em m<sup>2</sup>/GJ e m<sup>2</sup>/EU*

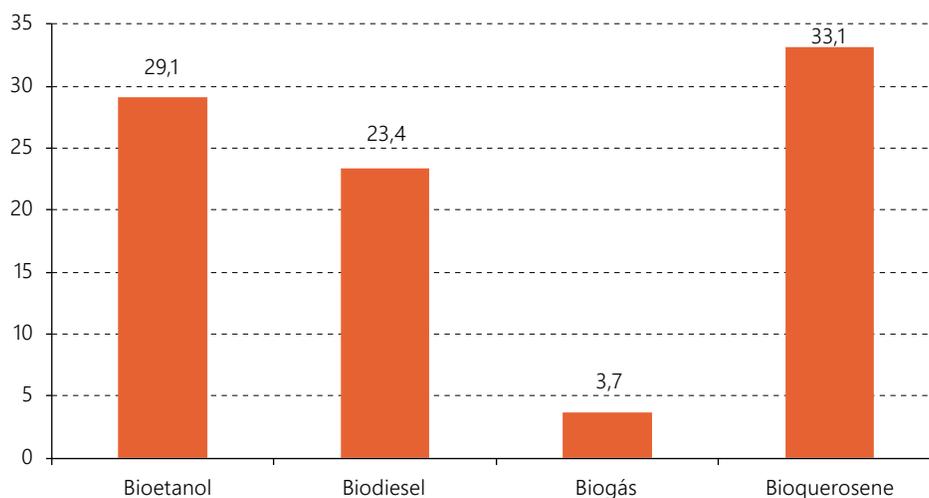


Fonte: Elaboração própria com base em Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), "RenovaCalc 2019" [online], [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br) > imagens > Consultas\_publicas > CP10-2018\_Calculadora, 2019.

### Emissão de gases de efeito estufa

Para os biocombustíveis, foram consideradas as fases de processamento agrícola e industrial (as emissões de combustão nos motores são contabilizadas no setor de transportes). As emissões da queima no campo na agricultura estão fora do escopo desse indicador, mas estão se tornando uma prática ultrapassada.

**Gráfico 16**  
**Emissões de GEE para tecnologias de biocombustíveis**  
*(Em gCO<sub>2</sub>e/MJ)*



Fonte: Elaboração própria com base em Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), "RenovaCalc 2019" [online], [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br) > imagens > Consultas\_publicas > CP10-2018\_Calculadora, 2019.

## Nível de prontidão da tecnologia

O TRL foi definido de acordo com comunicação interna com a Agência Internacional de Energia (IEA).

**Tabela 13**  
Nível de prontidão da tecnologia (*technology readiness level, TRL*) de biocombustível

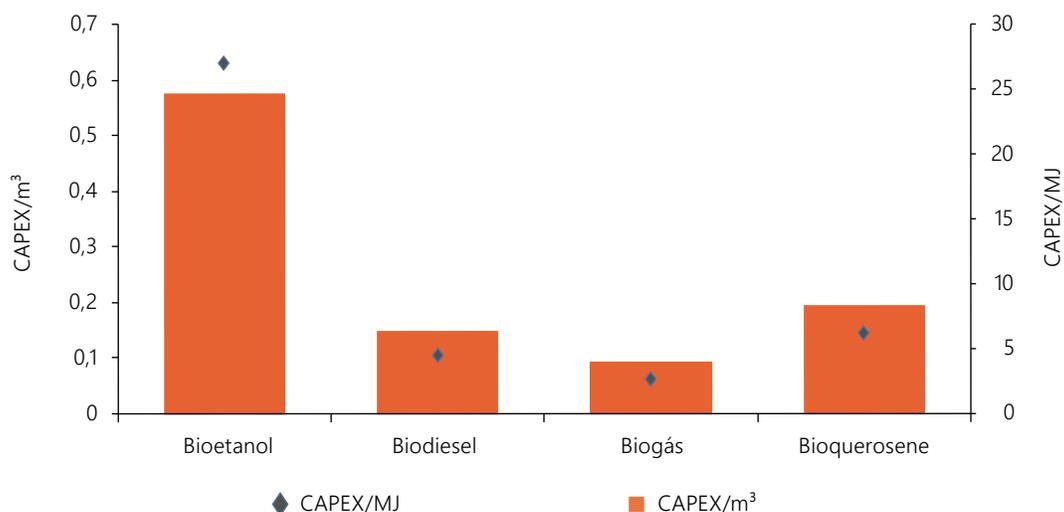
Tecnologias	TRL
Bioetanol	9
Biodiesel	9
Biogás	9
Bioquerosene	8

Fonte: Elaboração própria com base em comunicação interna com a IEA.

## Custos de produção de capital (CAPEX)

Para os biocombustíveis, não houve estimativas futuras da evolução dos custos devido a lacunas de dados.

**Gráfico 17**  
CAPEX para tecnologias de biocombustíveis  
(Em US\$/MJ e US\$/m<sup>3</sup>)

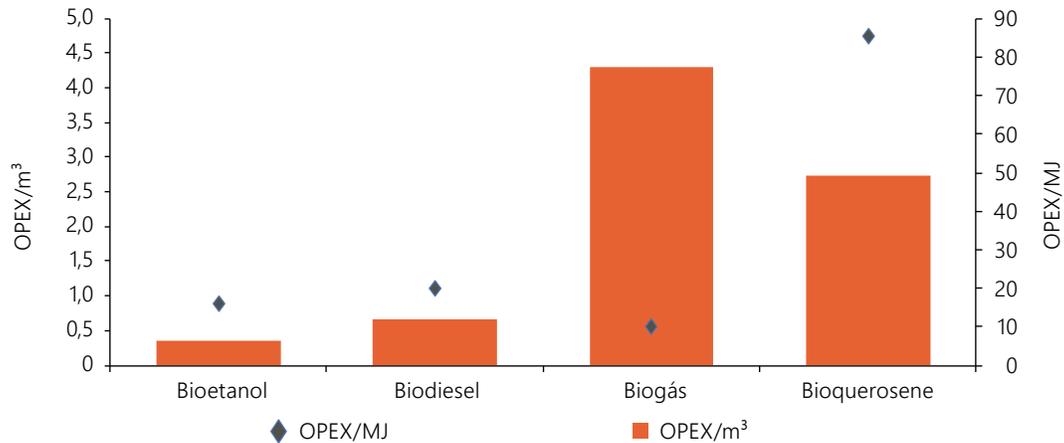


Fonte: Elaboração própria com base em Carvalho, Francielle, "Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels through Consolidated Routes", *Masters dissertation*, Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, February, 2017; Régis Rathmann (org.), *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), ONU Meio Ambiente, Brasília, 2017; e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica EPE 019/2018 – Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), agosto, 2018.

## Custos operacionais (OPEX)

Os valores mais baixos de OPEX para bioetanol, biodiesel e biogás devem-se ao fato de os insumos para a produção de biocombustíveis serem coprodutos de outras atividades (por exemplo, proteína de soja e resíduos agrícolas).

**Gráfico 18**  
**OPEX para tecnologias de biocombustíveis**  
 (Em US\$/MJ e US\$/m<sup>3</sup>)

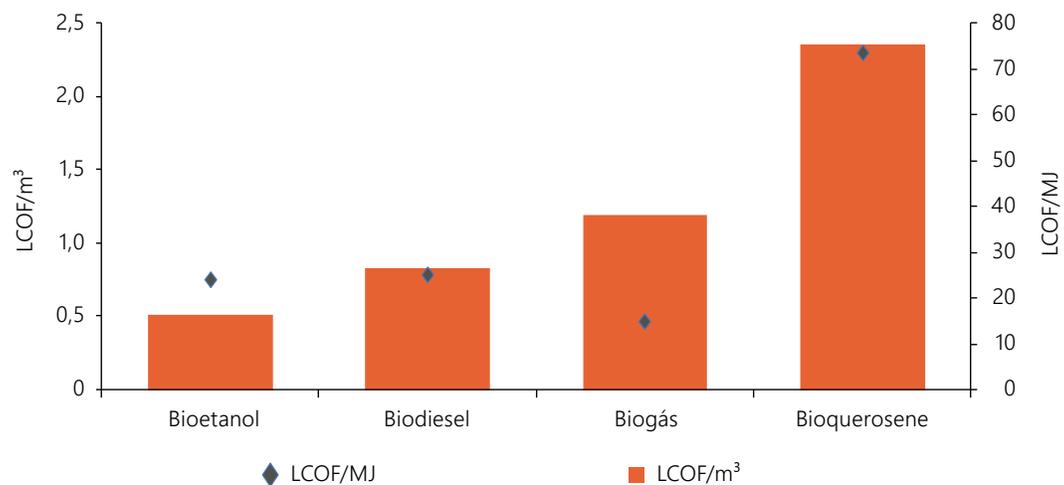


Fonte: Elaboração própria com base em Carvalho, Francielle, "Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels through Consolidated Routes", *Masters dissertation*, Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, February, 2017; Régis Rathmann (org.), *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), ONU Meio Ambiente, Brasília, 2017; e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica EPE 019/2018 – Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), agosto, 2018.

## Custos totais

Para os biocombustíveis, os custos totais são apresentados em termos de custo nivelado de combustível (LCOF; ver detalhes do anexo 7).

**Gráfico 19**  
**LCOF para tecnologias de biocombustíveis**  
 (Em US\$/MJ e US\$/m<sup>3</sup>)



Fonte: Elaboração própria com base em Carvalho, Francielle, "Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels through Consolidated Routes", *Masters dissertation*, Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, February, 2017; Régis Rathmann (org.), *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), ONU Meio Ambiente, Brasília, 2017; e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Nota Técnica EPE 019/2018 – Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), agosto, 2018.

## Diversificação energética

**Tabela 14**  
**Contribuição para a diversificação energética em 2018**  
*(Em porcentagens)*

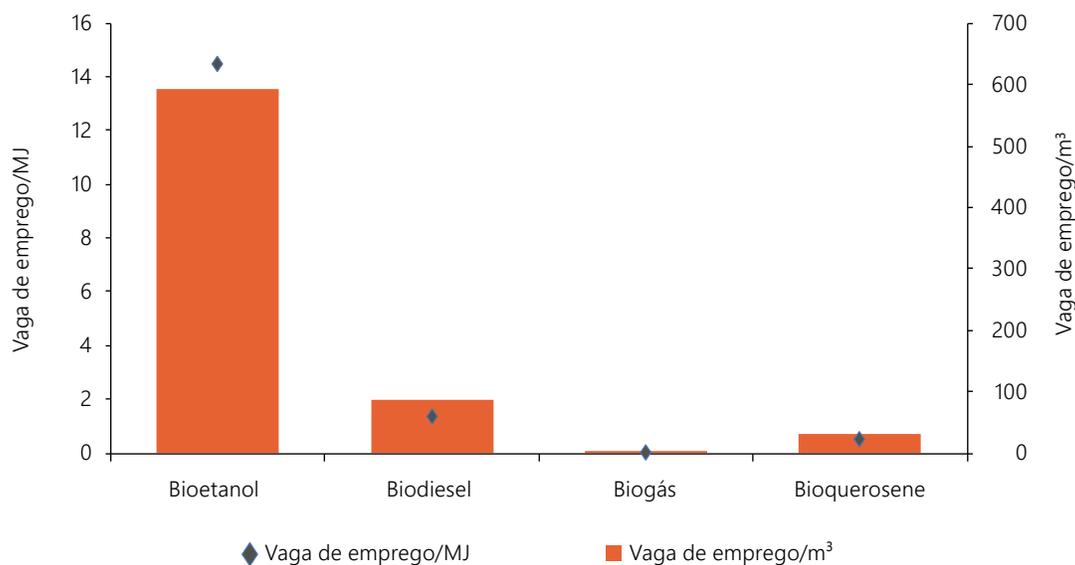
Biocombustíveis	Percentual para a matriz energética no ano
Bioetanol	28,1
Biodiesel	11,5
Biogás	n/d
Bioquerosene	não aplicável

Fonte: Elaboração própria com base em Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Balanço Energético Nacional 2018: Relatório síntese, ano base 2017, Brasília*, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), 2018.

## Criação de emprego

Para os biocombustíveis, as fases de processamento agrícola e industrial são consideradas agregadamente. Segundo a REN21 (2019), para o bioetanol, são considerados o processamento agrícola e o de biocombustíveis. Mas para o biodiesel, as fases consideradas não são especificadas. Portanto, diferentes suposições nesse sentido podem explicar as diferenças nos valores de criação de emprego. Mas sabe-se que o cultivo da soja é menos intensivo em recursos humanos do que o da cana-de-açúcar. Para o biogás, a criação de empregos foi considerada insignificante porque os empregos estão associados à atividade de aterro sanitário.

**Gráfico 20**  
**Criação de emprego por tecnologias de biocombustíveis**  
*(Em vaga de emprego/MJ e vaga de emprego/m<sup>3</sup>)*



Fonte: Elaboração própria com base em Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), "RenovaCalc 2019" [online], [www.anp.gov.br/images/Consultas\\_publicas/CP10-2018\\_Calculadora](http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/CP10-2018_Calculadora), 2019; REN21, *Renewables 2019 - Global Status Report*, Paris, 2019; e Wei, Max, Shana Patadia e Daniel Kammen, "Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?", *Energy Policy*, vol. 38, ed. 2, fevereiro, 2010.



## IV. Considerações finais, recomendações e desenvolvimentos futuros

O presente estudo apresenta um conjunto de indicadores de desempenho para tecnologias energéticas de baixo carbono selecionadas no Brasil. O exercício procurou contemplar todas as dimensões do desenvolvimento sustentável, considerando indicadores de diferentes pilares: ambiental, técnicoeconômico, social e político-institucional.

Foram realizadas estimativas para 11 dos 26 indicadores propostos inicialmente, com base na viabilidade, disponibilidade e qualidade dos dados, além de particularidades do contexto brasileiro. A constatação de que nem todos os indicadores podem ser estimados revela lacunas de dados, restrições e desafios significativos para o desenvolvimento de um conjunto abrangente de indicadores de desempenho de tecnologias energéticas em múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável. Além disso, nem todo indicador é aplicável a todas as tecnologias, o que ilustra os desafios de comparabilidade.

As principais descobertas desse estudo, endossadas por especialistas e partes interessadas no *Energy Big Push Workshop* em outubro de 2019, revelam que não existe um único indicador para tudo, e alguns deles permitem apenas uma análise qualitativa. Além disso, potenciais interligações entre indicadores e o modo como estes podem diferir sob a adoção conjunta de várias tecnologias simultaneamente devem ser considerados. A análise isolada de um indicador sozinho pode levar a erros de interpretação. As informações fornecidas por diferentes indicadores geralmente são complementares nas diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável, o que sublinha a importância de dispor de um painel de indicadores, em vez de considerar indicadores únicos. É necessária uma análise transversal de diversos indicadores para permitir uma compreensão abrangente do desempenho das tecnologias energéticas.

Outra conclusão importante do presente estudo é que o painel de indicadores considerado mostrou que nenhuma tecnologia supera outras em todos os aspectos, o que sugere que uma combinação de tecnologias deve ser desenvolvida para que os vários objetivos sociais, econômicos e ambientais sejam alcançados. Essa constatação enfatiza a necessidade de coordenação para um grande impulso energético no Brasil.

Como em qualquer exercício quantitativo, a qualidade das estimativas produzidas depende da disponibilidade, robustez e confiabilidade dos dados e informações coletados, bem como da precisão

do método de análise empregado. Nesse sentido, o trabalho realizado no Eixo 2 do EBP representa um avanço na revisão e compilação de vários indicadores de soluções energéticas de baixo carbono no Brasil. Mas há terreno fértil para desenvolvimentos futuros, a fim de melhorar a qualidade, comparabilidade e cobertura do painel de indicadores sobre tecnologias energéticas de baixo carbono no país.

Outros indicadores foram identificados como relevantes para a formulação de políticas e devem ser considerados como uma área para desenvolvimento futuro. Isso inclui intermitência e confiabilidade das fontes de energia, cobenefícios, pressão potencial no uso da terra, habilidades para implantação de tecnologias, métricas de inovação e dimensões de tempo e espaço dos indicadores. Além disso, os indicadores podem ser aprimorados ainda mais considerando todos os estágios de produção e uso de energia. Uma avaliação do ciclo de vida, que leve em consideração a fase agrícola (se aplicável), a cadeia de suprimentos e o descarte/descomissionamento, é necessária para cobrir todos os aspectos relevantes da tomada de decisão. Isso, porém, está fora do escopo dessa fase do projeto.

A relevância dos indicadores é outro tópico levantado por especialistas. Ela varia de acordo com o processo de tomada de decisão que eles informam. Métodos como análise multicritério e questionários Delphi para avaliações qualitativas podem ser ferramentas importantes para identificar prioridades.

Considerando os aspectos acima, uma das principais prioridades de ação é identificar as lacunas de dados existentes e os requisitos de harmonização para melhorar e expandir a quantificação de indicadores. Uma melhor coesão das fontes de dados é essencial para garantir a comparabilidade entre as tecnologias e permitir comparabilidade internacional. Um diagnóstico detalhado permitiria identificar as instituições encarregadas de fornecer esses dados regularmente, a fim de acompanhar o seu progresso. Nesse sentido, seria conveniente aumentar o número de instituições envolvidas no processo, o que pode contribuir para coesão e harmonização dos dados.

Por fim, é importante identificar mecanismos capazes de garantir a continuidade do desenvolvimento, alcance e adoção dos indicadores. Dado o ritmo acelerado de inovação e desenvolvimento tecnológico no setor energético, são esperadas reduções de custos e ganhos de eficiência para algumas tecnologias no médio prazo, bem como outros desenvolvimentos que exigem atualização contínua dos indicadores.

Um painel de indicadores bem concebido e firmemente fundamentado em dados robustos pode ser uma ferramenta de controle extremamente útil para os tomadores de decisão, fornecendo evidências que podem ajudar a ajustar continuamente o curso da ação em direção à sustentabilidade do desenvolvimento pretendido. Esse painel de indicadores é vital para embasar a combinação apropriada para o contexto brasileiro de investimentos complementares e coordenados para um grande impulso energético no país que ajude a construir uma matriz energética mais sustentável, resiliente e de baixo carbono, ao mesmo tempo que promove uma economia mais inclusiva, eficiente e competitiva.

## Bibliografia

- ANA (Agência Nacional de Águas) (2019), *Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil*, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), Brasília.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) (2019), "RenovaCalc 2019" [online], [www.anp.gov.br › images › Consultas\\_publicas › CP10-2018\\_Calculadora](http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/CP10-2018_Calculadora).
- Banco Central do Brasil (2019), "Taxa de câmbio comercial para venda: real (R\$) / dólar americano (US\$) - média 2019" [online] <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx> [date consulted: 21 de outubro de 2019].
- BIP (Biodiversity Indicators Partnership) (2011), *Guidance for national biodiversity indicator development and use*, UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, United Kingdom.
- Brasil (2015), *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*, Brasília.
- Bukhary, Saria, Sajjad Ahmad e Jacimaria Batista (2018), "Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 82.
- C40 (2013), *Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets*, C40 Cities: Climate Leadership Group; Clinton Foundation, Inter American Development Bank, julho.
- Carvalho, Francielle (2017), "Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels through Consolidated Routes", *Masters dissertation*, Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, fevereiro.
- CEPAL/FES (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe)/(Fundação Friedrich Ebert Stiftung) (2019), "Big Push Ambiental: Investimentos coordenados para um estilo de desenvolvimento sustentável", *Perspectivas*, nº 20, (LC/BRS/TS.2019/1 e LC/TS.2019/14), São Paulo.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) (2019), "Emissões Veiculares no Estado São Paulo - Fator de Emissão 2018" [online], <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.
- Delft (2013), *Zero emissions trucks: An overview of state-of-the-art technologies and their potential*, Stuttgart, julho.
- DLR (Docklands Light Railway) (2015), *Project Report: Alternative Transport Technologies for Megacities*, German Aerospace Centre, Institute of Vehicle Concept, Stuttgart, February.
- Edenhofer Ottmar e outros (eds.) (2011), *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge, United Kingdom, IPCC.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2019), *Balanco Energético Nacional 2019: Relatório síntese, ano base 2018*, Brasília, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE).
- \_\_\_\_\_ (2018a), *Balanco Energético Nacional 2018: Relatório síntese, ano base 2017*, Brasília, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE).

- \_\_\_\_\_ (2018b), *Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE).
- \_\_\_\_\_ (2018c), *Nota Técnica EPE 019/2018 – Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), August.
- \_\_\_\_\_ (2018d), *Nota Técnica EPE 026/2018 – Análise socioambiental das fontes energéticas do PDE 2027*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), November.
- \_\_\_\_\_ (2018e), *Nota Técnica PR 07/18 - Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050*, Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE), November.
- \_\_\_\_\_ (2018f), *Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*, Brasília, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE).
- \_\_\_\_\_ (2017), *Estudos Para a Expansão da Geração - Custo Marginal de Expansão do Setor Elétrico Brasileiro Metodologia e Cálculo – 2017*, Brasília, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE).
- GBEP (Global Bioenergy Partnership) (2011), *The global bioenergy partnership sustainability indicators for bioenergy*, GBEP/Global Bioenergy Partnership, Sweden.
- Greenpeace (2016a), *Dossiê Ônibus Limpo: Benefícios de uma transição para combustíveis renováveis na frota de São Paulo*, São Paulo, August.
- \_\_\_\_\_ (2016b), *Revolução Energética - Rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis*, Rio de Janeiro.
- Hagman, Jeans e outros (2016), "Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion", *Research in Transportation Business & Management*, vol. 18, March.
- ICCT (International Council on Clean Transportation) (2019), *PROMOBE: Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas*, Brasília, GIZ/MDIC (Agência Alemã de Cooperação Internacional/ Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços), November.
- IEA (International Energy Agency) (2019), *IEA G20 Hydrogen report: Assumptions*, IEA, Paris.
- \_\_\_\_\_ (2018), *World Energy Outlook 2018*, IEA, Paris.
- \_\_\_\_\_ (2017), *World Energy Investment 2017*, IEA, Paris.
- \_\_\_\_\_ (2011), "Guide to Reporting Energy RD&D Budget/Expenditure Statistics", *Statistics Report*, IEA, Paris, June.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*, Eggleston, Simon e outros (Eds.), Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2019), *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019*, United Arab Emirates, June.
- \_\_\_\_\_ (2014), *Evaluating Renewable Energy Policy: A Review of Criteria and Indicators for Assessment*, UK Energy Research Centre, January.
- IRENA/WRI (International Renewable Energy Agency/World Resources Institute) (2018), *Water use in India's power generation : Impact of renewables and improved cooling technologies to 2030*, janeiro.
- La Rovere, Emilio Lèbre e outros (2018), *Implicações Econômicas e Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil*, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE / UFRJ), Rio de Janeiro.
- Lajunen, Antti e Timothy Lipman (2016), "Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses", *Energy*, vol. 106, julho.
- MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações) (2018), *Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016-2022*, Brasília.
- \_\_\_\_\_ (2017), *Estimativas Anuais de Emissões Totais de Gases de Efeito Estufa no Brasil*, Brasília.
- MME (Ministério de Minas e Energia) (2018), *RenovaBio 2017*, Brasília.
- Musial, Walt e outros (2016), *Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2018), *Jobs and Economic Development Impact (JEDI) Models*, Estados Unidos.
- PSR (2018), *Custos e Benefícios das Fontes de Geração Elétrica: Caderno de Geração*, Instituto Escolhas, August.
- Rathmann, Régis (org.) (2017), *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), ONU Meio Ambiente, Brasília.

- REN21 (Renewables Now) (2019), *Renewables 2019 - Global Status Report*, Paris.
- Simsek, Yeliz, David Watts e Rodrigo Escobar (2018), "Sustainability evaluation of Concentrated Solar Power (CSP) projects under Clean Development Mechanism (CDM) by using Multi Criteria Decision Method (MCDM)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, outubro.
- UCS (Union of Concerned Scientists) (2018), "Electric Vehicle Batteries: Materials, Cost, Lifespan" [online], <https://www.ucsusa.org/resources/ev-batteries>.
- Vera, Ivan e Lucille Langlois (2007), "Energy indicators for sustainable development", *Energy*, vol. 32, ed. 6, Viena, junho.
- Violante, Adriano de Cerqueira (2018), "Avaliação dos indicadores de sustentabilidade de usinas sucroalcooleiras da região de Sertãozinho, São Paulo, Brasil: estudo de caso", *PhD thesis*, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Wei, Max, Shana Patadia e Daniel Kammen (2010), "Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?", *Energy Policy*, vol. 38, ed 2, fevereiro.



## **Anexos**

**Anexo 1**  
**Participantes do *Workshop Energy Big Push***

Ailson de Souza Barbosa (ANEEL)	Georgia Jordão (UnB)
Alice Abreu (CTIS/FITS)	Gustavo Naciff de Andrade (EPE)
Amanda Vinhoza (UFRJ)	Jackson Maia (CGEE)
André Furtado (Unicamp)	Jairo Couro (MCTI)
Aurélio Calheiros de Melo Júnior (ANEEL)	Jean-Baptiste Le Marois (IEA)
Barbara Bressan Rocha (CGEE)	Joerg Husar (IEA)
Bikashi Dawahoo (British Embassy)	Lucas Dantas Ribeiro (ANEEL)
Camila Gramkow (CEPAL)	Lucas Motta (Consultor)
Carlos Mussi (CEPAL)	Ludmilla Viegas (KAİROS)
Carlson Oliveira (CGEE)	Luiz de Oliveira (IEA)
Carmen Silvia Sanches (ANEEL)	Marcelo Poppe (CGEE)
Carolina Grottera (UFRJ)	Marcelo Wendel (EPE)
Carolina Ramalhete (KAİROS)	Marcia Moreschi (CEPAL)
Clarissa Forecchi Glória (MRE)	Mayra Juruá (CGEE)
Daniel Silva Moro (EPE)	Mônica Caroline Santos (MME)
Dante Luiz Hollanda (MCTI)	Natalia Gonçalves de Moraes (EPE)
Diego Frade (FINEP)	Pedro Brandão Silva Simões (CEPAL)
Domenico Lattanzio (IEA)	Raiza Fraga (CGEE)
Edilaine Camillo (UNICAMP)	Regina Silverio (CGEE)
Edison Benedito (IPEA)	Rodolfo Danilow (MME)
Emilly Caroline Costa Silva (CGEE)	Ruben Contreras (CEPAL)
Fernando Campagnoli (ANEEL)	Thiago Barral Ferreira (EPE)
Fernando Ribeiro (FINEP)	Victo Neto (UNICAMP)
Francisco Liu (UnB)	

**Anexo 2**  
**Participantes do Encontro Estratégico de Alto Nível**

Carlos Mussi (CEPAL)	Marcelo Poppe (CGEE)
Clarissa Forecchi (MRE)	Paulo Alvim (MCTI)
Dênis Moura (MME)	Regina Silverio (CGEE)
Joerg Husar (IEA)	Thiago Barral Ferreira (EPE)

### **Anexo 3**

#### **Participantes do Grupo de Trabalho do Eixo 1**

Alerino dos Reis e Silva Filho (CNPq)	Domenico Lattanzio (IEA)
Aurélio Calheiros de Melo Junior (ANEEL)	Elisabeth Saavedra Rivano (MCTI)
Bárbara Bressan Rocha (CGEE)	Erick Meira (FINEP)
Camila Ferraz (EPE)	Guilherme Arantes (BNDES)
Camila Gramkow (CEPAL)	Gustavo Naciff (EPE)
Carlson Oliveira (CGEE)	Jackson Maia (CGEE)
Daniel Moro (EPE)	José Carlos Tigre (ANP)
Dante Hollanda (MCTI)	Marcelo Paiva (CGEE)

### **Anexo 4**

#### **Participantes do Grupo de Trabalho Eixo 2**

Cristiano Ruschel (EPE)	Marcelo Poppe (CGEE)
Dante Hollanda (MCTI)	Marcelo Wendel (EPE)
Fernando Campagnoli (ANEEL)	Ruben Contreras (CEPAL)
João Antônio Moreira Patusco (MME)	Simon Bennett (IEA)

### **Anexo 5**

#### **Participantes do Grupo de Trabalho do Eixo 3**

Camila Gramkow (CEPAL)	Jean-Baptiste Le Marois (IEA)
Carmen Silvia Sanches (ANEEL)	Marcela Mazzoni (EMBRAPIL)
Daniel Moro (EPE)	Mayra Juruá (CGEE)
Diego de Carvalho Frade (FINEP)	Simone Landolina (IEA)
Erick Meira (FINEP)	Verena Barros (CGEE)
Edison Benedito (IPEA)	

### **Anexo 6**

#### **Participantes no Grupo de Trabalho do Eixo 4**

Bianca Torreão (CGEE)	Natalia de Moraes (EPE)
Mariano Berkenwald (IEA)	Pulcheria Graziani (CEPAL)
Mônica Caroline Pinheiro Faria (MME)	Raiza Fraga (CGEE)

## Anexo 7

### Metodologia de avaliação de custo total

1. Os custos totais de geração de eletricidade são expressos como o custo nivelado da eletricidade (LCOE):

$$LCOE = \frac{IC * FRC}{CF} + \frac{FOMCF}{CF} + VOM + HR * FC$$

Onde:

LCOE - custo nivelado da eletricidade (US\$/MWh)

IC - custo do capital

FRC - fator anual de recuperação do capital

CF - fator de capacidade

FOM - custos operacionais fixos

VOM - custos operacionais variáveis

HR - taxa de eficiência do sistema

FC - custo do combustível

2. Os custos totais de transporte são expressos como o custo total de propriedade (TCO) de um veículo:

$$TCO = (PP - RP) + FC(TKD) + \left( \frac{rP}{1 - (1 + r)^{-N}} N - P \right) + IC + MR + T - S$$

Onde:

TCO - custo total de propriedade para o proprietário (US\$/km)

PP - preço de compra

RP - preço de revenda (no final do período de propriedade)

FC - custo de combustível por quilômetro

TKD - total de quilômetros percorridos

r - taxa de juros mensal

P - montante do empréstimo (se aplicável)

N - número de pagamentos mensais de juros (se aplicável)

IC - custo do seguro

MR - custos de manutenção e reparo

T - impostos

S - subsídios

3. Os custos totais dos biocombustíveis são expressos como o custo nivelado do combustível (LCOF):

$$LCOF = \frac{\frac{IC}{T \cdot \sum_1^t (1 + tx)^t} + \frac{FOM + VOM}{\sum_1^n (1 + tx)^n}}{\frac{C}{\sum_1^n (1 + tx)^n}}$$

Onde:

LCOF - custo nivelado do combustível (em US\$/litro ou m<sup>3</sup>)

IC - custo do capital

FOM - custos operacionais fixos

VOM - custos operacionais variáveis

tx - taxa de desconto

C - capacidade de geração anual (litros)

T - tempo de construção

N - tempo de vida

## Anexo 8 Pressupostos para tecnologias de geração de electricidade

**Tabela A1**  
Tecnologias de geração de electricidade em tempo de construção e tempo de vida (anos)

Tecnologia	Tempo de construção	Vida útil
Grande hidrelétrica	5	30
Pequena hidrelétrica	3	30
Termelétrica – Biomassa	2	20
Solar FV (grande)	2	20
CSP	3	20
Eólica <i>onshore</i>	3	20
Eólica <i>offshore</i>	3	20
Solar FV (distribuído)	1	20

Fonte: Elaboração própria.



A conjuntura atual do Brasil e dos países no mundo todo é marcada pela busca da recuperação do dinamismo econômico e da qualidade de vida das pessoas. Nesse contexto, a Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) das Nações Unidas vem desenvolvendo o *Big Push* para a Sustentabilidade, uma abordagem renovada para apoiar os países da região na construção de estilos de desenvolvimento mais sustentáveis, por meio da coordenação de políticas para promover investimentos transformadores desses estilos.



O Escritório da CEPAL em Brasília e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), com a participação de diversos parceiros, desenvolveram o projeto Grande Impulso Energia (*Energy Big Push*) Brasil, buscando evidências para a promoção de investimentos em inovação para uma transição energética em bases sustentáveis no país. Mergulhar nas páginas desta publicação permitirá ao leitor ampliar sua compreensão sobre o desempenho de diversas tecnologias energéticas de baixo carbono nos setores de geração elétrica, veículos e biocombustíveis em termos ambientais, sociais e econômicos, contribuindo para um grande impulso energético no Brasil.