

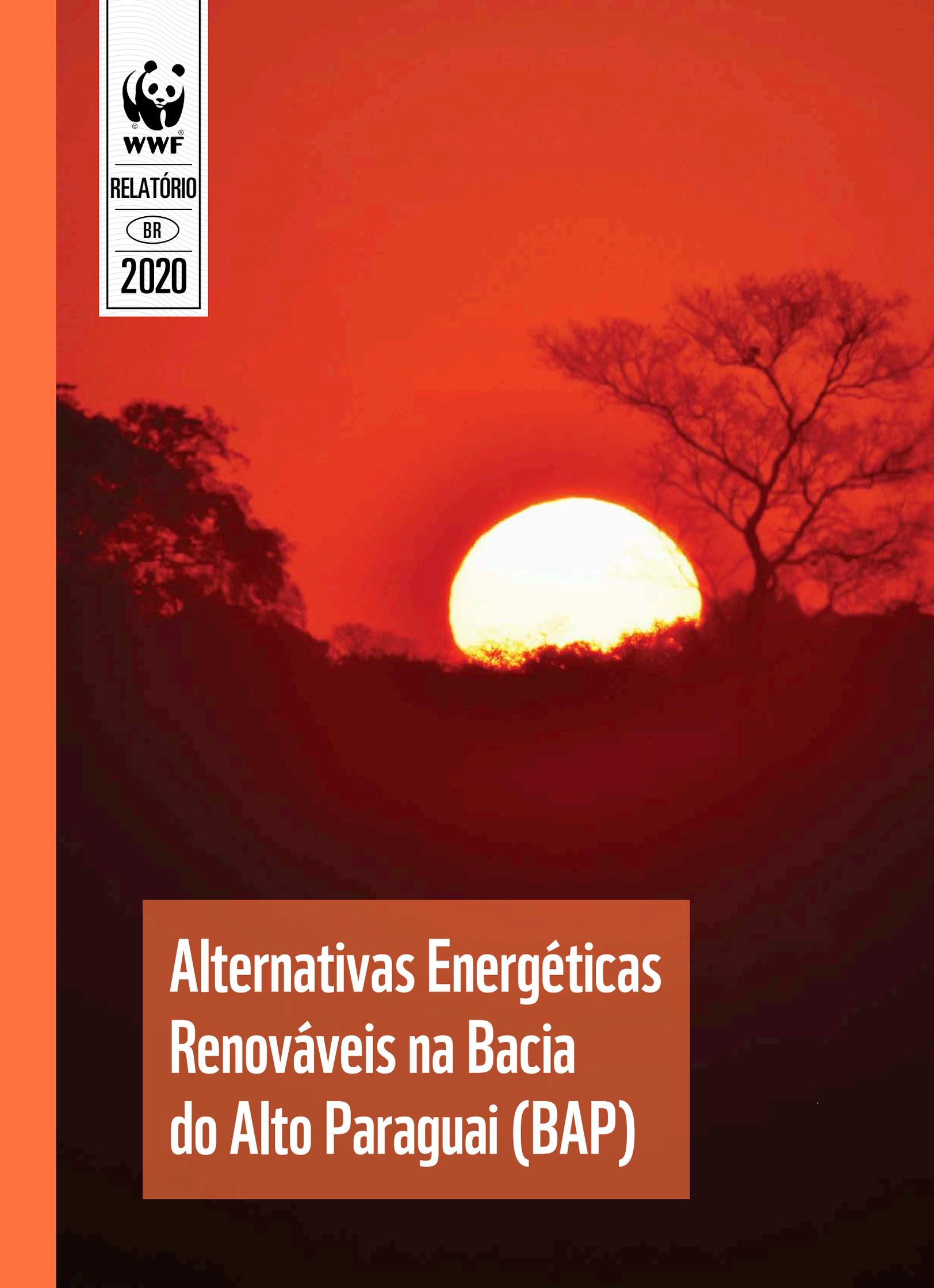


WWF

RELATÓRIO

BR

2020



# Alternativas Energéticas Renováveis na Bacia do Alto Paraguai (BAP)

## **WWF-BRASIL**

Diretor-executivo: **Mauricio Voivodic**

Diretor de Economia Verde: **Alexandre Prado**

Gerente do Programa Cerrado Pantanal: **Julio César Sampaio**

## **EQUIPE TÉCNICA:**

Texto: **Aurélio de Andrade Souza (Usinazul) e Luís Gustavo Tudeschini, Ph.D**

Revisão técnica: **Alessandra Mathyas; Breno Melo e Ricardo Fujii (WWF-Brasil)**

Edição e revisão de texto: **Davi Miranda**

Editoração eletrônica e tratamento de imagens - **Supernova Design**

Foto da capa: **Regina Alves – Concurso Áreas que Protegem a Vida – Pantanal /WWF-Brasil**

Agradecimentos: **Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho, Dra. Marilín Mariano dos Santos e Dra. Vanessa Pecora Garcilasso, do Grupo de Pesquisa em Bioenergia (GBio) da Universidade de São Paulo (USP)**

Este relatório é um produto do WWF-Brasil, preparado como parte do projeto “Avaliação da Substituição dos Projetos Hidrelétricos na Bacia do Alto Paraguai (BAP) nos Estados de MT e MS”.

# Alternativas Energéticas Renováveis na Bacia do Alto Paraguai (BAP)

Brasília, Brasil

2020

## **WWF-BRASIL**

Diretor-executivo: **Mauricio Voivodic**

Diretor de Economia Verde: **Alexandre Prado**

Gerente do Programa Cerrado Pantanal: **Julio César Sampaio**

## **EQUIPE TÉCNICA:**

Texto: **Aurélio de Andrade Souza (Usinazul) e Luís Gustavo Tudeschini, Ph.D**

Revisão técnica: **Alessandra Mathyas; Breno Melo e Ricardo Fujii (WWF-Brasil)**

Edição e revisão de texto: **Davi Miranda**

Editoração eletrônica e tratamento de imagens - **Supernova Design**

Foto da capa: **Regina Alves – Concurso Áreas que Protegem a Vida – Pantanal /WWF-Brasil**

Agradecimentos: **Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho, Dra. Marilin Mariano dos Santos e Dra. Vanessa Pecora Garcilasso, do Grupo de Pesquisa em Bioenergia (GBio) da Universidade de São Paulo (USP)**

Este relatório é um produto do WWF-Brasil, preparado como parte do projeto “Avaliação da Substituição dos Projetos Hidrelétricos na Bacia do Alto Paraguai (BAP) nos Estados de MT e MS”.

# Alternativas Energéticas Renováveis na Bacia do Alto Paraguai (BAP)

Brasília, Brasil

2020



# SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2. Geração de Energia Elétrica no Brasil</b>	<b>12</b>
2.1. Emissões de GEE na Geração de Energia Elétrica	16
2.2. Geração Hidroelétrica na Região Hidrográfica do Paraguai (RH-Paraguai)	19
<b>3. Alternativas sustentáveis de geração de eletricidade</b>	<b>22</b>
3.1. Energia Solar	24
3.2. Biomassa de cana de açúcar	34
3.3. Resíduos Sólidos Urbanos - RSU	40
3.4. Tratamento de Efluentes	46
3.5. Geração de Empregos	57
<b>4. Combinação das alternativas de geração de eletricidade - ano de 2030</b>	<b>58</b>
<b>Referências</b>	<b>64</b>
<b>Anexo: Metodologia</b>	<b>68</b>
1. Cálculo dos Potenciais de Geração de Eletricidade para os Estados de MT e MS	70
1.1. Fotovoltaica	70
1.2. Cana-de-açúcar	72
1.3. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) nos estados de MT e MS e o potencial de geração de eletricidade	73
1.4. Tratamento de Efluentes	74

# 1. INTRODUÇÃO





Atualmente existem mais de 125 aproveitamentos hidrelétricos em estudo na Região Hidrográfica do Paraguai, cuja maioria é voltada para construção de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Dados do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Rio Paraguai (PRH-Paraguai) apontam que o potencial hidrelétrico explorado da região totaliza uma capacidade instalada de 1,2 GW. (ANA, 2018).

A Bacia do Alto Paraguai (BAP) ocupa aproximadamente 1.100.000 km<sup>2</sup> de extensão, abrangendo os biomas Pantanal e parte do Cerrado. A Região Hidrográfica Paraguai ocupa 4,3% do território brasileiro (363.446 km<sup>2</sup>), compreendendo parte de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, o que inclui a maior parte do Pantanal (61% do total), que é a maior área úmida contínua do planeta. Os principais cursos d'água são os rios Paraguai, Taquari, São Lourenço, Cuiabá, Itiquira, Miranda, Aquidauana, Negro, Apa e Jauru (ANA, 2018) <sup>1</sup>.

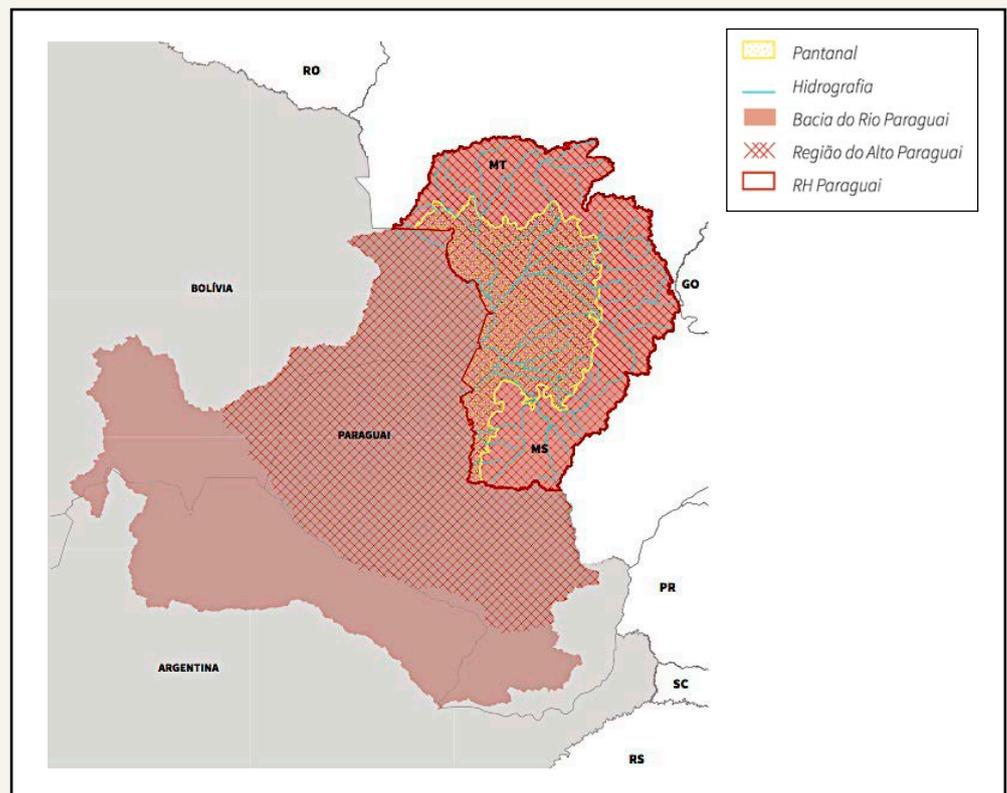


Figura 1 - Mapa da Região Hidrográfica do Paraguai. Fonte: ANA (2018).

A região onde a BAP está inserida apresenta elevado índice pluviométrico, sendo o Pantanal a maior planície de inundação do mundo, além de regular a vazão do rio Paraguai. A geração de energia hidrelétrica na BAP é uma das atividades que poderão impactar drasticamente os rios da bacia.

<sup>1</sup> <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/ana-interrompe-temporariamente-concessao-de-outorgas-para-novas-hidreletricas-na-regiao-hidrografica-do-paraguai>

De acordo com o PRH-Paraguai, a principal questão em torno de empreendimentos hidrelétricos diz respeito aos possíveis impactos socioeconômicos (em especial na pesca e no turismo), causados pelas alterações do regime hidrológico dos cursos d'água barrados e pelo comprometimento da qualidade das águas, gerando dificuldades para assegurar seu uso múltiplo, o que requer a incorporação de especificidades construtivas e operativas nos projetos dos futuros aproveitamentos, além de criteriosos estudos de impacto ambiental no âmbito dos seus licenciamentos.

A região do Pantanal apresenta grande sensibilidade para empreendimentos de aproveitamentos hídricos devido às suas características geográficas e às suas características ambientais particulares. Conforme descrito no PRH-Paraguai, as “ameaças aos recursos hídricos nem sempre apresentam impacto diretamente mensurável devido aos efeitos difusos e sistêmicos, mas reconhecidamente afetam a quantidade, a qualidade, o regime ou o acesso à água” e geralmente “envolvem situações de degradação ambiental”.

Uma das primeiras recomendações do PRH-Paraguai é que sejam incorporadas “especificidades construtivas e operativas nos estudos e projetos de aproveitamentos hidrelétricos visando à diminuição dos potenciais impactos e a preservação das condições do ambiente em que se inserem”. Ademais, o PRH-Paraguai recomenda ao setor elétrico considerar os resultados dos estudos em curso pela ANA para avaliação dos efeitos da implantação de empreendimentos hidrelétricos na BAP, de forma que as conclusões atendam aos anseios da sociedade, proporcionando o melhor aproveitamento energético possível da BAP.

Os cenários a seguir foram realizados a partir de estudos consolidados e levantamento de informações complementares, considerando fontes de geração de energia elétrica que poderiam ser promovidas e aproveitadas nos estados de MS e MT, de tal forma que o abastecimento de eletricidade regional seja garantido, como prevê a expansão no Plano Decenal de Energia. Em outras palavras, buscam-se identificar as alternativas energéticas para a região (estendido para o Centro-Oeste) que poderão substituir a energia que poderá ser gerada pela fonte hídrica, sem impactar na oferta de energia elétrica futura e sem colocar em risco o ecossistema do Pantanal.

Nesse contexto, foram consideradas diversas fontes de energia disponíveis na região que poderiam substituir a geração hidroelétrica, sem prejuízo para o ecossistema único do Pantanal. Foram consideradas as fontes de energia solar fotovoltaica, energia da biomassa de cana-de-açúcar, energia dos Resíduos Sólidos Urbanos, particularmente das duas principais cidades da região (Cuiabá e Mato Grosso), além da energia dos efluentes líquidos (esgoto) e dejetos animais.

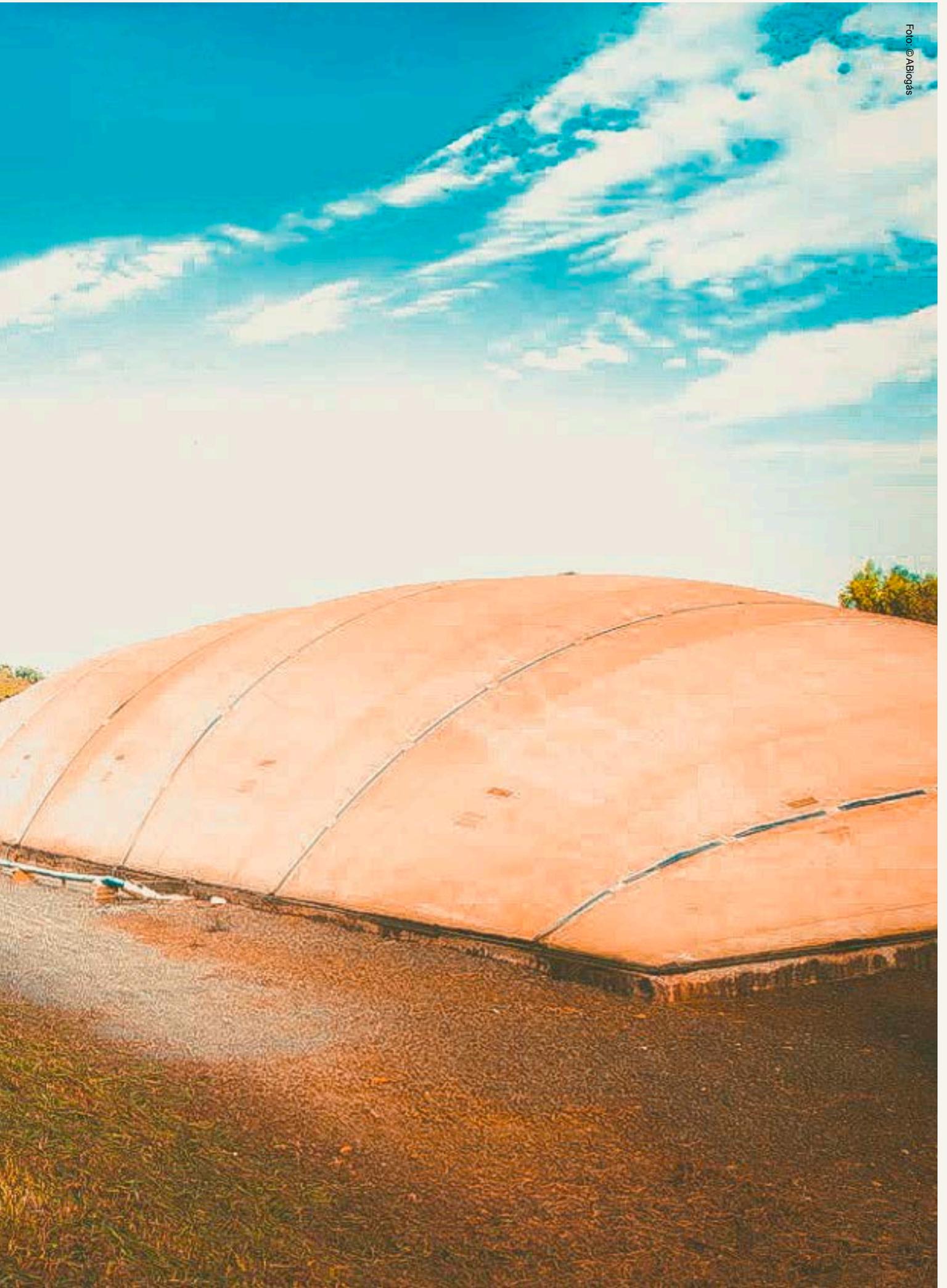
---

**A REGIÃO DA BACIA DO ALTO PARAGUAI OCUPA 4,3% DO TERRITÓRIO BRASILEIRO E ESTÁ LOCALIZADO NOS ESTADOS DE MT E MS.**

---

## 2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL





O Brasil é um país que possui uma matriz elétrica largamente dependente da geração hidroelétrica, conforme indicam os dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2018), com cerca de 60% da geração elétrica dependente do regime hídrico.

A segunda fonte de maior participação na matriz elétrica é a termoeletricidade (gás, carvão, diesel etc.). Em terceiro lugar de maior contribuição na oferta interna de energia elétrica está a energia eólica, com quase 8% da capacidade instalada no país. As pequenas centrais hidroelétricas (PCHs) representam cerca de 3,2% da capacidade de geração de energia elétrica a partir da hidroeletricidade no Brasil.

O gráfico a seguir apresenta os números da capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW) do Balanço Energético Nacional (BEN, 2018), conforme elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia (MME) com dados fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

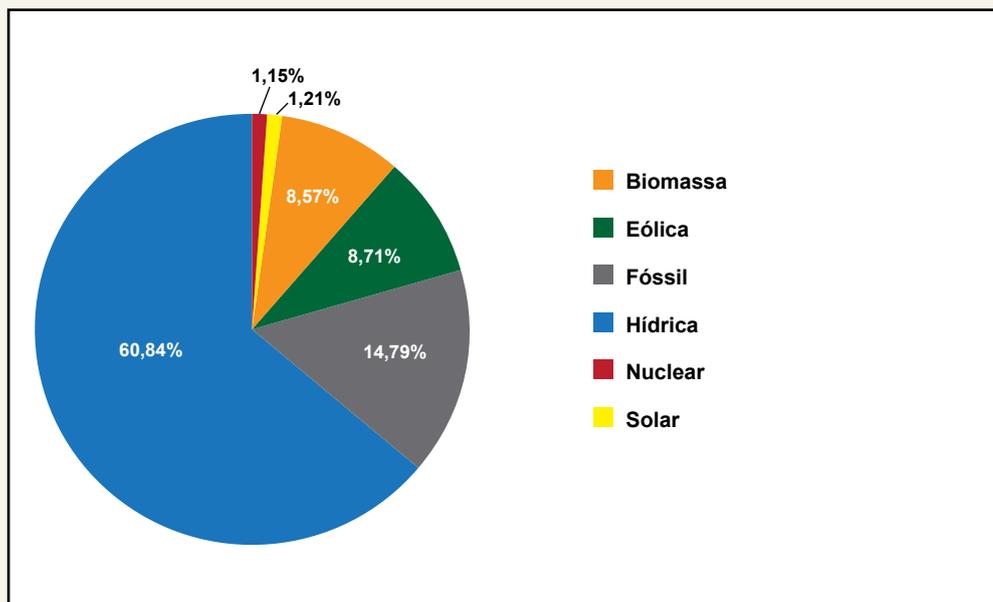


Figura 2 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil por fonte. Fonte: Aneel (2018).

A figura a seguir apresenta a divisão de geração de energia por fonte. A geração hídrica responde por 63,1% da geração de energia elétrica no Brasil, seguida por termoeletricas, biomassa e eólica. Os dados permitem quantificar a contribuição das diversas fontes de energia no Brasil.

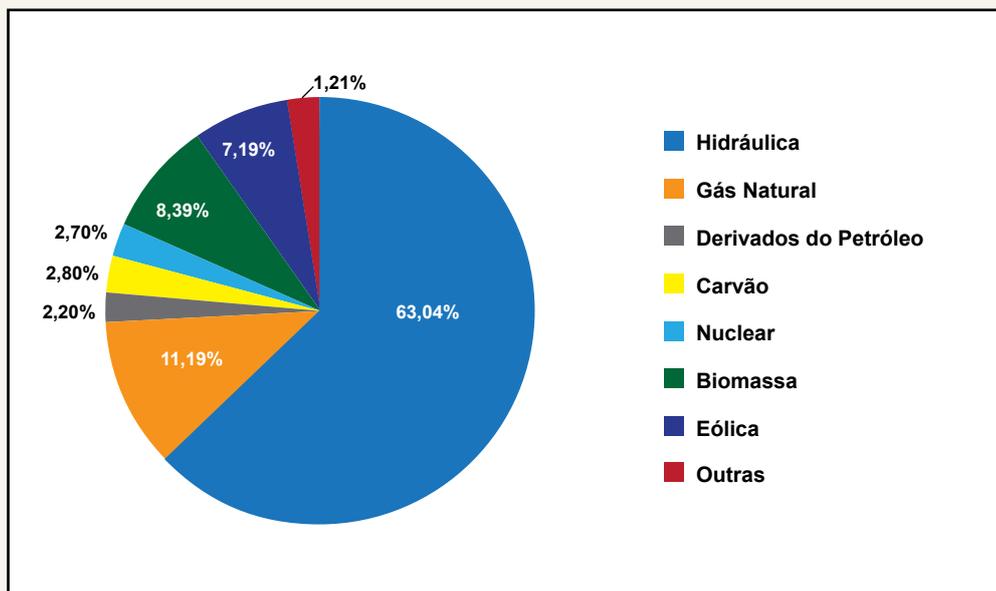


Figura 3 – Participação de cada fonte na geração de energia elétrica no Brasil. BEN (2018). Fonte: EPE (2019).

A tabela a seguir apresenta os dados de geração de eletricidade por grande região (EPE, 2018). Conforme esses dados, consolidados do ano 2017 (BEN, 2018), o Sudeste corresponde sozinho a quase 50% da geração de energia elétrica no Brasil.

**Tabela 1 - Geração de Energia Elétrica (GWh) por região. Fonte: EPE (2018).**

Região	Geração (GWh)	Participação (%)
SE	232.515	49,77%
S	84.997	18,19%
NE	79.731	17,07%
CO	35.408	7,58%
N	34.510	7,39%

Apesar de a região CO contabilizar apenas 7,58% da geração de energia elétrica no país, é possível aumentar essa contribuição utilizando resíduos sólidos (urbano e agropecuários), biomassa e a radiação solar, bem representativa na região, o que poderá contribuir para a geração de energia no SIN sem demandar a construção de novas PCHs.

O potencial de geração hidráulica na BAP tem capacidade para duplicar a atual geração hidroelétrica, com base nos estudos em curso, mas as outras fontes de energia poderão substituir tais projetos futuros, mantendo os “rios livres” sem interferência humana. Segundo estudos do WWF-Brasil, a instalação de pequenas centrais hidrelétricas ameaça o regime de inundações do Pantanal, que depende dos pulsos naturais de seca e cheia dos rios. Essa interrupção dos fluxos naturais dos rios ameaça todo o ecossistema a jusante.

A região do Pantanal apresenta grande sensibilidade para empreendimentos de aproveitamentos hídricos devido às suas características geográficas e ambientais particulares. Conforme descrito no PRH-Paraguai, as “ameaças aos recursos hídricos nem sempre possuem impacto diretamente mensurável devido aos efeitos difusos e sistêmicos, mas reconhecidamente afetam a quantidade, a qualidade, o regime ou o acesso à água” e geralmente “envolvem situações de degradação ambiental”.

Uma das primeiras recomendações do PRH-Paraguai é que sejam incorporadas as “especificidades construtivas e operativas nos estudos e projetos de aproveitamentos hidrelétricos visando a diminuição dos potenciais impactos e a preservação das condições do ambiente em que se inserem”. Ademais, o PRH-Paraguai recomenda ao setor elétrico considerar os resultados dos estudos em curso pela ANA, os quais estão avaliando os efeitos da implantação de empreendimentos hidrelétricos na BAP. Dessa forma, o melhor aproveitamento energético possível da BAP pode atender aos anseios da sociedade.

Os cenários a seguir foram realizados a partir de estudos consolidados e de levantamento de informações complementares, considerando fontes de geração de energia elétrica que poderiam ser promovidas e aproveitadas na região do Pantanal, de tal forma que o abastecimento de eletricidade regional seja garantido, como prevê a expansão no Plano Decenal de Energia. Em outras palavras, buscam-se identificar as alternativas energéticas para a região do Pantanal (estendido para o Centro-Oeste) com potencial de substituir a energia que poderia ser gerada pela fonte hídrica, sem impactar na oferta de energia elétrica futura e sem colocar em risco o ecossistema do Pantanal.

## 2.1 EMISSÕES DE GEE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nos últimos anos houve um aumento da contribuição da geração de energia termoeleétrica a gás no país; ainda assim, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Os dados de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) associados à geração de energia no Brasil são fornecidos pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).





LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO QUE EXISTEM CERCA DE 125 EMPREENDIMENTOS EM ESTUDO, E, SE CADA NOVO EMPREENDIMENTO UTILIZAR O LIMITE MÁXIMO DE ÁREA DE RESERVATÓRIO PERMITIDA, O LIMITE TEÓRICO DE ÁREA A SER INUNDADA E TRANSFORMADA EM RESERVATÓRIO É DE 1.625 KM<sup>2</sup> OU A CERCA DE 228 MIL CAMPOS DE FUTEBOL IGUAIS AO DO MARACANÃ, CUJA ÁREA É DE 7.136 M<sup>2</sup>

Considerando os dados no Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018, ano base 2017, o consumo de energia elétrica no Brasil foi de 587.962 GWh, sendo cerca de 11,1% da geração de GEE proveniente da região CO. Já os dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), ano base 2017, publicados em 2019, apontam que cerca de 21% das emissões de GEE são provenientes do setor de energia (incluindo transporte) equivalendo à emissão anual de 61,14 MtCO<sub>2</sub>.

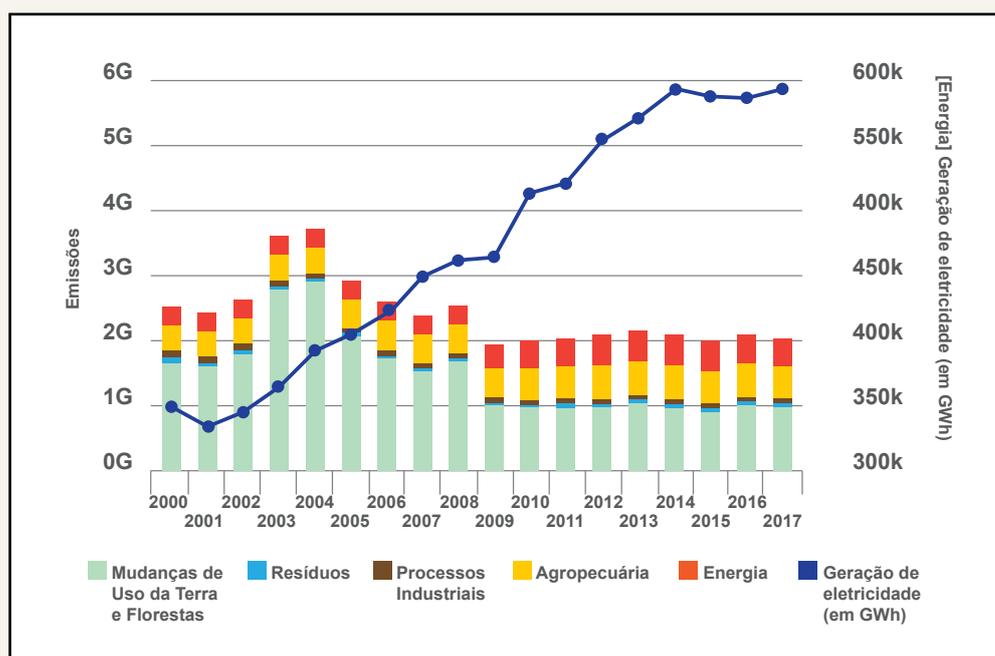


Figura 4 – Emissões totais de GEE e geração de energia no Brasil. Fonte: SEEG (2019).

Ainda segundo a base de dados do SEEG, ano base 2017, o estado do Mato Grosso do Sul (MS) emitiu 72,3 MtCO<sub>2e</sub> (bruta) e 69,8 MtCO<sub>2e</sub> (líquida), ocupando a 13ª posição no índice nacional. O estado do Mato Grosso (MT) é o segundo emissor de GEE no Brasil, totalizando 231,6 MtCO<sub>2e</sub> (bruta) e 192,1 MtCO<sub>2e</sub> (líquida), ficando atrás apenas do estado do Pará.

Considerando somente o setor de geração de energia elétrica de cada estado, a parcela de emissão de GEE no MS representa 12,2% das emissões globais do estado. No MT, a parcela de emissões de GEE relativa à geração de energia é de apenas 4,9% do total do estado (SEEG, 2019).

Nitidamente em MT e MS, as atividades que mais emitem GEE são a agropecuária e a mudança de uso das terras e florestas (desmatamento), conforme se vê no gráfico a seguir, que mostra a evolução histórica das emissões de GEE do estado por setor de atividade desde 1990 (SEEG, 2019). Percebe-se que a geração de energia

não é o principal vetor de emissões de GEE na região, permanecendo praticamente constante ao longo das últimas duas décadas.

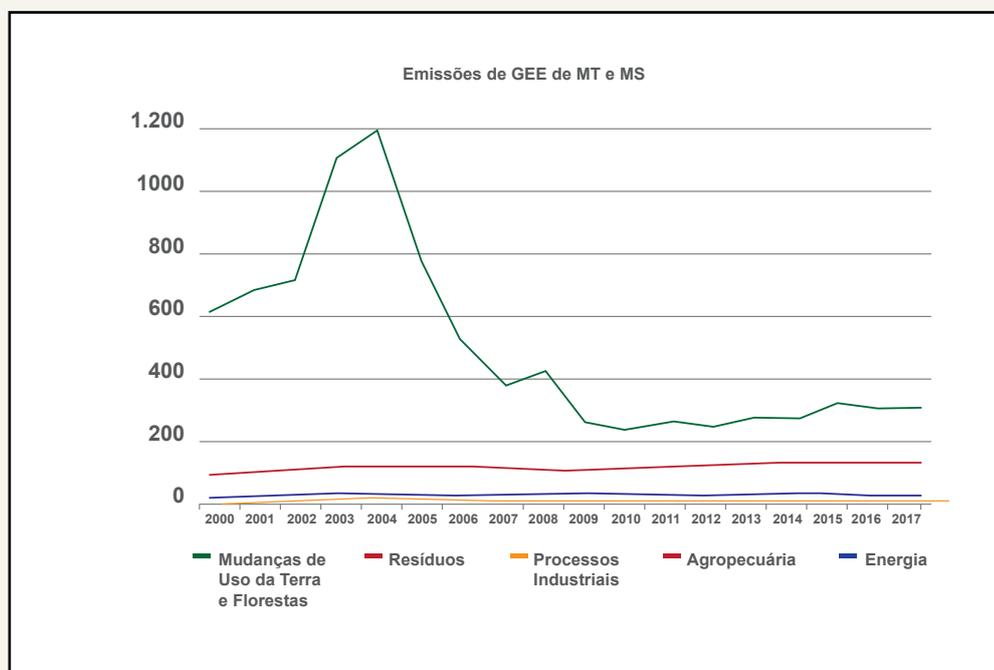


Figura 5 – Série histórica das emissões de GEE estadual (MT e MS). Fonte: SEEG (2019).

## 2.2 GERAÇÃO HIDROELÉTRICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAI (RH-PARAGUAI)

Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são usinas de tamanho e potência reduzidos, com capacidade instalada obrigatoriamente entre 5 e 30 megawatts (MW) de potência e, originalmente, com área de reservatório de no máximo 3 km<sup>2</sup> de área, segundo Resolução Normativa nº 652/2003 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). No artigo 4º, admite-se que o critério de área inundada possa ser modificado mediante a comprovação de que o dimensionamento do reservatório esteja relacionado com outros objetivos que não a geração de energia.

Contudo, em 22 de novembro de 2016, a Aneel publica a Resolução Normativa nº 745, atualizando as normas para empreendimentos de Geração de Energia, inclusive para as PCHs, alterando a área de reservatório para até 13 km<sup>2</sup> e potência entre 5 e 30 megawatts (MW).

Apesar de classificada como empreendimento de pequeno impacto ambiental, é necessário o licenciamento ambiental (licença prévia, licença de instalação e li-

PEQUENAS CENTRAIS  
HIDRELÉTRICAS SÃO  
USINAS DE TAMANHO E  
POTÊNCIA REDUZIDOS,  
COM CAPACIDADE  
INSTALADA  
OBRIGATORIAMENTE  
ENTRE  
**5 E 30**  
MEGAWATTS  
DE POTÊNCIA

cença de operação) e outorga de direito dos recursos hídricos para se ter a real dimensão desses impactos em ecossistemas, biota, condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, entre outros aspectos sociais, econômicos e culturais.

Em particular, para a região do Pantanal, existe a preocupação com os impactos ambientais das barragens e lagos das PCHs nas mudanças hidrológicas – a jusante e a montante – da represa, a interferência na migração dos peixes, alterações na fauna do rio, interferências no transporte de sedimentos, perda da biodiversidade, terrestre e aquática etc.

Atualmente, o potencial hidrelétrico da Região Hidrográfica do Paraguai (RH-Paraguai) é explorado por meio de 7 usinas hidrelétricas (UHE), 30 pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e 16 centrais geradoras hidrelétricas (CGH), totalizando a capacidade instalada de 1,2 GW (ANA, 2018a).

No entanto, o desenvolvimento de novos projetos hidrelétricos levanta uma série de preocupações com relação aos possíveis impactos socioeconômicos, à alteração do regime hidrológico e ao comprometimento da qualidade das águas (ANA, 2018a).



**NOS ÚLTIMOS ANOS  
HOUE UM AUMENTO  
DA CONTRIBUIÇÃO DA  
GERAÇÃO DE ENERGIA  
TERMOELÉTRICA A GÁS  
NO PAÍS; AINDA ASSIM,  
O BRASIL POSSUI  
UMA DAS MATRIZES  
ENERGÉTICAS MAIS  
LIMPAS DO MUNDO.**

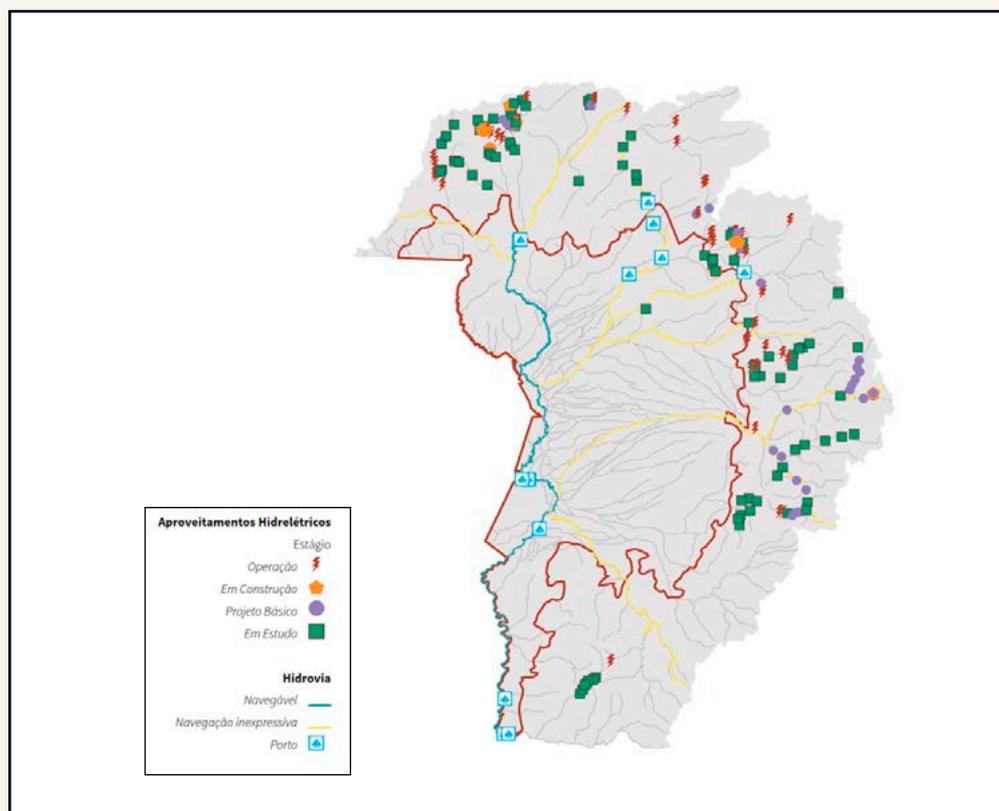


Figura 6 – Aproveitamentos hidrelétricos e navegação na RH-Paraguai, Fonte: ANA (2018b)

Ademais, estudos da Aneel indicam que existe na RH-Paraguai o potencial de dobrar essa capacidade, adicionando 1.172 MW com o desenvolvimento de 125 novos projetos hidrelétricos com tamanho médio de 9.376 kW por PCH. Atualmente a potência média das PCHs no CO é de 17.336 kW (em operação e construção).

Assim, levando em consideração que existem cerca de 125 empreendimentos em estudo, e, se cada novo empreendimento (PCH) utilizar o limite máximo de área de reservatório permitida (13 km<sup>2</sup>), o limite teórico de área a ser inundada e transformada em reservatório é de 1.625 km<sup>2</sup> (162.500 hectares) ou o equivalente a cerca de 228 228 mil campos de futebol iguais ao do Maracanã, cuja área é de 7.136 m<sup>2</sup> (0,7136 hectares).

Se os reservatórios conjuntamente formassem um único lago, e este tivesse a forma de um quadrado, seriam necessários cerca de 17 dias (408 horas) para caminhar 1.625 km, que seria um dos lados desse quadrado. Se o mesmo percurso fosse feito de bicicleta, seriam necessários 3,4 dias (82 horas) para percorrer o mesmo lado do quadrado.



Foto: © Abogás

# 3. ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE





A presente seção discute as fontes de energia sustentáveis disponíveis na região Centro-Oeste – como a energia solar e a biomassa da cana-de-açúcar, além dos resíduos de esgoto e agropecuários disponíveis – e como a expansão dessas fontes de energia pode contribuir para a ampliação e a diversificação da matriz elétrica nos estados de MT e MS.

### 3.1 ENERGIA SOLAR

A energia gerada pelo Sol pode ser aproveitada de várias maneiras, mas, em geral, para a geração de energia útil (elétrica e térmica) nas residências e indústrias, as principais formas são: (i) utilizando coletores solares térmicos para aquecimento de água; (ii) adotando concentradores solares (energia heliotérmica ou solar concentrada) visando geração térmica e também elétrica; e (iii) por meio da conversão direta da luminosidade em eletricidade, através dos módulos fotovoltaicos e do efeito fotoelétrico.

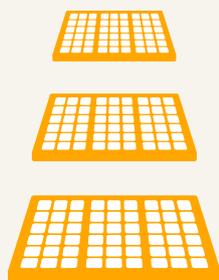
Este estudo se concentrará na tecnologia solar fotovoltaica, cujo efeito fotovoltaico foi inicialmente relatado por Edmond Becquerel, em 1839, quando verificou o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da radiação solar luminosa. A energia absorvida pelos semicondutores efetua a quebra das ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas (DUFFIE, 2013; ZILLES, 2012).

De qualquer sorte, para efeito deste estudo, ao considerarmos a geração de energia solar fotovoltaica, levaremos em conta o conjunto de equipamentos que compõem o sistema de energia solar fotovoltaico, e que é responsável pela entrega de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

#### 3.1.1 DESCRITIVO DA TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Existem diferentes tecnologias para conversão de energia solar em eletricidade, sendo a mais comum o uso de módulos fotovoltaicos cristalinos. Outras tecnologias disponíveis são conhecidas como filme finos, OPV, entre outros menos comuns. Os módulos fotovoltaicos atuam em conjunto com outros equipamentos, tais quais os inversores de corrente, transformadores, sistemas de proteção etc.

A célula fotovoltaica é o elemento básico do módulo fotovoltaico. É na célula que se dá a conversão de energia radiante do Sol em energia elétrica – o efeito fotoelétrico. O módulo fotovoltaico é constituído por um conjunto de células que podem ser ligadas em série ou em paralelo, conectadas eletricamente, montadas sobre uma estrutura metálica ou placa de vidro. O módulo fotovoltaico é identificado pela sua potência elétrica (watt) de pico (Wp).



Além dos módulos, outro componente importante no gerador fotovoltaico é o inversor de corrente, que é um dispositivo eletrônico que converte a energia elétrica em corrente contínua (CC) proveniente dos módulos fotovoltaicos para energia elétrica em corrente alternada (CA), conforme tensão da rede de energia.

Um arranjo fotovoltaico é uma associação de módulos fotovoltaicos conectados em série e/ou em paralelo para se produzir uma potência elétrica na tensão definida por cada projeto. Portanto, para se dimensionar um gerador fotovoltaico, é necessário conhecer as características elétricas dos módulos fotovoltaicos, tais como corrente, tensão e potência nominal, além das características associadas à eficiência de conversão de energia desses componentes e das perdas associadas com temperatura, poeira etc. Os parâmetros variam conforme o fabricante, a característica construtiva, o tipo de material semicondutor, a resistência elétrica interna, a tecnologia de fabricação e o local de instalação.

Contudo, um dos dados de entrada mais importantes para projeções é conhecer o potencial do recurso energético solar disponível no local. A próxima sessão abordará o recurso solar na região em estudo e o potencial de geração de energia elétrica regional.

### 3.1.2 RECURSO SOLAR

O *Atlas Solarimétrico Brasileiro* fornece médias de longo prazo de recursos solares (nesse caso, na figura a seguir, apresentamos a irradiação global – GHI, que é um dos principais fenômenos climáticos que determinam o potencial de geração de energia solar num local).

A compreensão dos recursos solares é crucial para o desenvolvimento de aplicações de energia solar e planejamento dos projetos de geração de energia. As tecnologias fotovoltaicas (FV) normalmente requerem uma análise sobre a Irradiação Horizontal Global (GHI) e a Irradiação Global Inclinada (GTI), ou seja, a radiação solar recebida pela superfície dos módulos fotovoltaicos.

A radiação direta é aquela que provém diretamente da radiação do sol e produz sombras nítidas ao encontrar um obstáculo, como o módulo fotovoltaico. A radiação difusa é aquela proveniente de todas as direções e atinge a superfície após ser espalhada ou refletida pela atmosfera terrestre, nuvens etc.

A medida GHI representa a soma das componentes diretas e difusas da radiação solar, sendo considerada uma referência climática importante, pois permite comparar sítios ou regiões individuais.

Considerando uma irradiação global no plano horizontal (GHI), a média diária regional em Campo Grande (MS) é de 5,35 kWh/m<sup>2</sup>. Já a média diária em Cuiabá (MT) é de 5,36 kWh/m<sup>2</sup>. De acordo com o *Atlas Solarimétrico Brasileiro*, em toda a região CO a média anual da GHI é de 5,07 kWh/m<sup>2</sup>.

---

**A ENERGIA SOLAR CONTRIBUI COM POUCO MAIS DE 1% DA GERAÇÃO DE ENERGIA NACIONAL, MAS APRESENTA UM POTENCIAL DE CRESCIMENTO ELEVADO GRAÇAS À REDUÇÃO DOS CUSTOS E AO AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE ENERGIA DA TECNOLOGIA.**

---

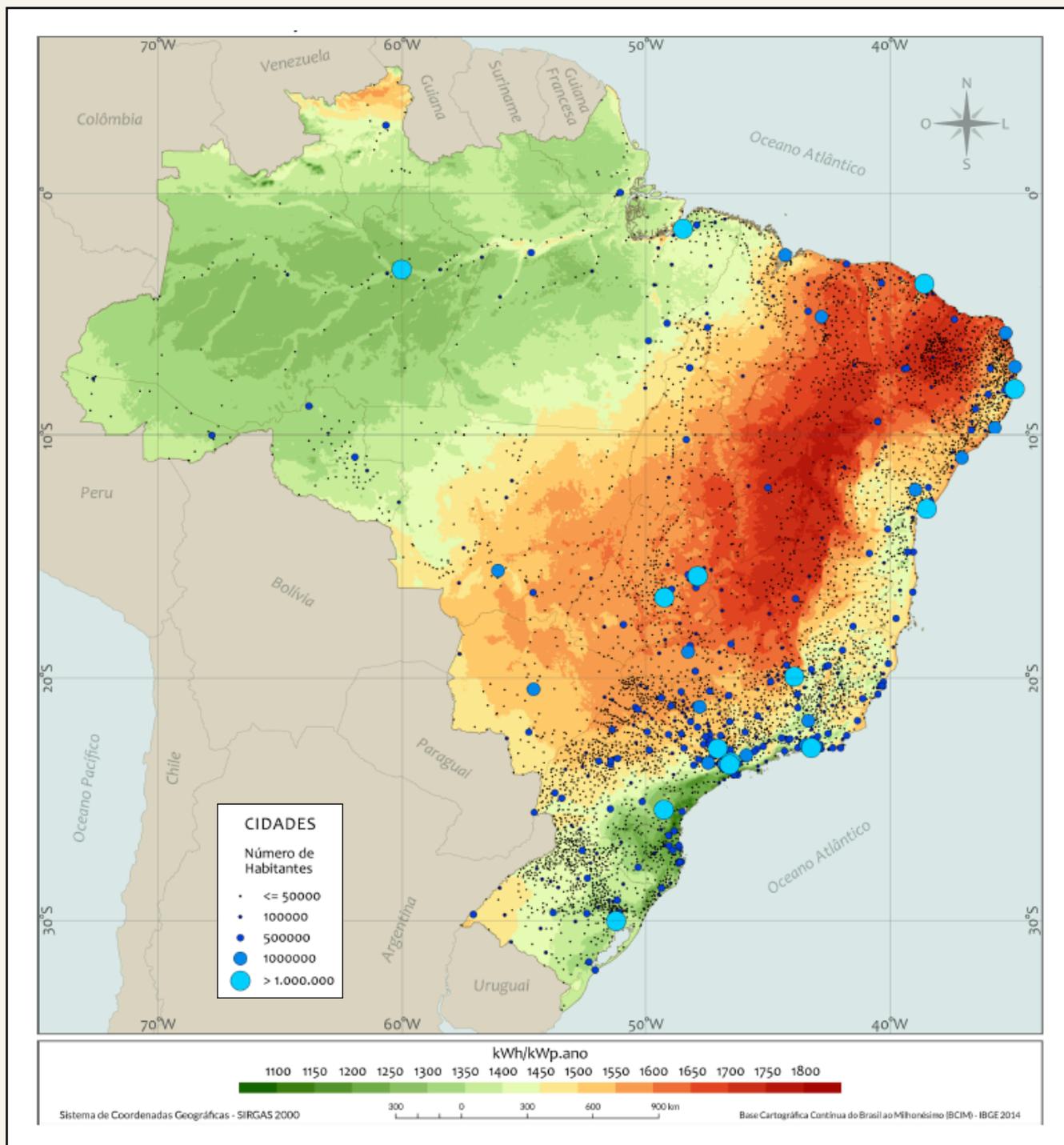


Figura 7 – Potencial de Geração Solar Fotovoltaica (kWh/kWp.ano). Fonte: IBGE (2014); Inpe (2018).

A Irradiação Global em Plano Inclinado (GTI) é a somatória da radiação solar direta e difusa que incide sobre a superfície inclinada dos módulos solares fotovoltaicos fixos. Em comparação com a superfície horizontal, a superfície inclinada recebe uma pequena quantidade de radiação solar a mais que é refletida no solo;

por isso o valor do GTI é maior que o do GHI. O GTI médio diário em Campo Grande, por exemplo, é de 5,70 kWh/m<sup>2</sup>.

De acordo com *Global Solar Atlas* e Solargis<sup>2</sup>, a produção estimada de energia solar média diária para cada kWp (quilo-watt-pico)<sup>3</sup> instalado na região Centro-Oeste (CO) está entre 4,20 kWh/kWp e 4,40 kWh/kWp. Ao se realizar a mesma comparação da produção de energia solar entre Campo Grande (MS) e Cuiabá (MT), verifica-se que a produção de energia solar varia de 4,39 kWh/kWp e de 4,25 kWh/kWp, respectivamente. Estes valores representam uma variação relativa entre as cidades de cerca de 3%, que é um valor que está abaixo do próprio desvios de medição e precisão.

Segundo a metodologia da Solargis, a precisão dos modelos meteorológicos é estimada comparando-os com dados de medições meteorológicas de alta qualidade e confiabilidade. Assim, o desvio no GHI esperado dos valores anuais está na faixa de  $\pm 4\%$  a  $\pm 8\%$  para a maioria dos casos medidos. Contudo, espera-se um desvio mais alto em condições geograficamente complexas e em regiões que não são suficientemente cobertas por medições meteorológicas de alta qualidade.

O Banco Mundial selecionou a Solargis como fornecedora global de dados solares e serviços de avaliação de energia solar, baseado em um banco de dados de recursos solares que eles possuem e mantêm. Quando comparados os dados produzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), contidos na segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, os valores da Solargis e Inpe são próximos e compatíveis com esse exercício de modelagem de cenários de geração de energia elétrica regional.

Assim, para efeito desse cenário energético, foi considerado um índice de produção de energia elétrica por potência instalada de 4,32 kWh/kWp-dia, o que corresponde a 1.577 kWh/kWp-ano, como demonstrado na Figura 7. Esse índice do Inpe é compatível com dados da Solargis e do Banco Mundial, validando assim a ferramenta de cálculo e a metodologia adotadas.

### 3.1.3 DADOS HISTÓRICOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

A Geração Distribuída (GD) foi definida a partir do Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163/2004, atualizada pelo decreto 786/2017, e versa sobre “a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências”.

<sup>2</sup> <https://globalsolaratlas.info/?c=11.609193,8.261719,3>

<sup>3</sup> kWp é uma medida para representar a capacidade nominal do sistema solar fotovoltaico. Está associado à potência total instalada em módulos de energia solar.

Contudo, foi a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, que regulamentou a GD na matriz energética brasileira como está sendo considerada neste estudo, classificando-a na seguinte forma: (i) microgeração distribuída para sistemas de geração de energia renovável ou cogeração qualificada conectados à rede com potência até 75 kW; (ii) minigeração distribuída para sistemas de geração de energia renovável ou cogeração qualificada conectados à rede com potência superior a 75 kW e inferior a 5 MW.

Todas as Unidades Consumidoras (UC) com Geração Distribuída (GD) são registradas no Sistema para Registro das Unidades Consumidoras com Geração Distribuída da Aneel. Esse registro permite a compensação da energia injetada na rede em relação à energia consumida. Nesse formato, não há comercialização de energia, mas a compensação de energia ativa injetada na rede da concessionária local.

De acordo com dados coletados no sistema supracitado, disponível na página eletrônica da Aneel, a geração distribuída cresce a passos largos no Brasil. Desde 2012, já foram conectados cerca de 83 mil sistemas fotovoltaicos, 86 CGHs (centrais geradoras hidroelétricas, com potência inferior a 5MW), 57 usinas eólicas e 162 usinas a biomassa, totalizando 1.015 MW (~1 GW). A Tabela 2 apresenta o resumo dos sistemas de GD instalados no Brasil até 15 de junho de 2019.

**Tabela 2 - Resumo dos sistemas de geração distribuída instalados no Brasil. Fonte: Aneel (2019).**

Tipo	Quantidade	Potência instalada (kW)
CGH	86	81.343,60
Eólica	57	10.314,40
Solar FV	83.308	879.161,91
UTE	162	44.795,78
<b>TOTAL</b>	<b>86.613</b>	<b>1.015.615,69</b>

O mapa a seguir apresenta a distribuição dos sistemas solares fotovoltaicos no Brasil.



**EXISTEM DIFERENTES TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELETRICIDADE, SENDO A MAIS COMUM O USO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CRISTALINOS. OUTRAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS SÃO CONHECIDAS COMO FILME FINOS, OPV, ENTRE OUTROS MENOS COMUNS.**



Figura 8 – Distribuição dos Sistemas de Energia Solar no Brasil. Fonte: Aneel, 2019.

O mapa apresenta os sistemas aglomerados em conjuntos de dados conforme registro da Aneel, adotando metodologia de “Amostragem de alta densidade em gráficos de dispersão”, que apresenta o número de sistemas de geração distribuída por unidade consumidora, de modo que cada círculo fornece informação de cada sistema de GD registrado.

A Figura 9 apresenta o número de sistemas de geração distribuída instalados com a fonte energia solar fotovoltaica. Percebe-se um crescimento exponencial nos últimos anos, mais especificamente a partir de 2012, quando foi regulamentada a RN 482/2012.

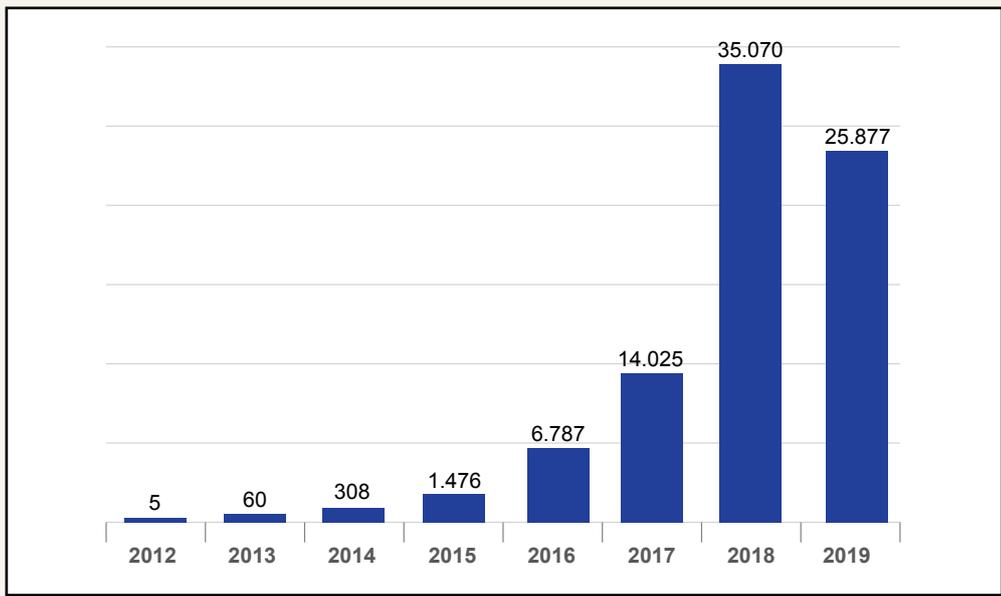


Figura 9 – Número de Sistemas de Energia Solar no Brasil. Fonte: Aneel (2019).

Desagregando os dados para a região Centro-Oeste (CO), são contabilizados total de 9.292 sistemas fotovoltaicos instalados até meados de junho, somando 122.884 kWp, que representam pouco menos de 14% das instalações no País.

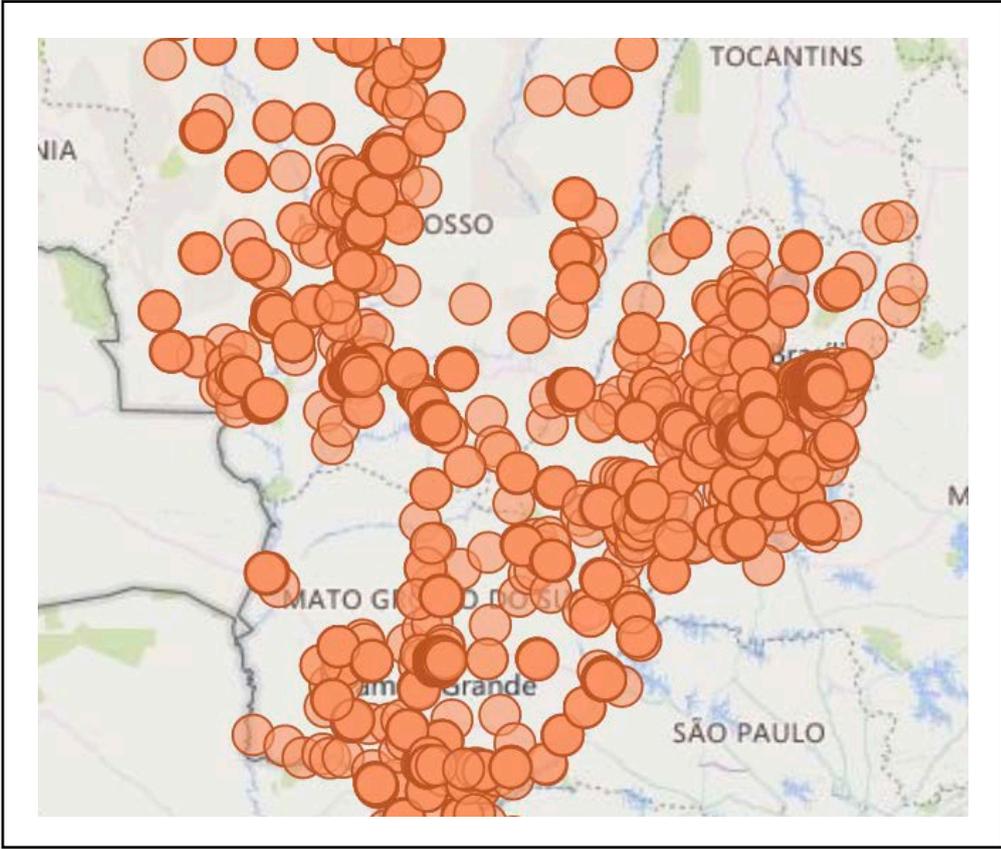


Figura 10 – Sistemas de Energia Solar Instalados no Centro-Oeste. Fonte: Aneel (2019).

**DE ACORDO COM A  
AGÊNCIA NACIONAL DE  
ENERGIA ELÉTRICA, A  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
CRESCERÁ A PASSOS  
LARGOS NO BRASIL.**

Como no resto do Brasil, nos últimos anos a geração solar fotovoltaica tem crescido muito no CO, principalmente nas classes residencial e comercial. Apesar da classe residencial contabilizar 6.815 instalações e a classe comercial 1.654 instalações, a potência total instalada na classe residencial é de 39.274 kW (potência média de 5,76 kWp) e na classe comercial é de 51.020 kW (potência média de 30,84 kWp).

Em termos de área, os sistemas solares instalados nas residências nos estados do CO ocupam 235.644 m<sup>2</sup> (considerando 6m<sup>2</sup>/kWp), pouco mais que 33 campos de futebol do tamanho do Maracanã, cuja área é de 7.136 m<sup>2</sup>. Já as instalações comerciais ocupam uma área de 43 campos de futebol do Maracanã (306.120 m<sup>2</sup>).

Outro dado importante é sobre a modalidade de geração; no caso da região CO, predomina a geração na própria unidade consumidora (próximo à carga), com 8.584 ocorrências, seguido de 696 unidades geradoras conectadas na modalidade de autoconsumo remoto e 12 unidades de geração no modelo de geração compartilhada (ambos os casos caracterizados por usinas fotovoltaicas instaladas longe da carga).

Na divisão por estado, a geração distribuída predomina em Goiás, seguido do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal, como visto na Tabela 3. Os estados de Mato Grosso e Goiás, juntos, representam 75% dos casos instalados na região CO.

**Tabela 3 – Quantidade de unidade geradoras solar FV por estado.**  
Fonte: Aneel (2019).

UF	Quantidade de Unidades Geradoras	Potência Instalada (kW)	Porcentagem (%)
DF	982	13.083	11%
GO	3.218	33.645	27%
MS	1.653	17650	14%
MT	3.438	58.504	48%
Total	9292	122.844	100%



Assim, considerando a produtividade de **1.577 kWh/kWp-ano**, conforme item 3.1.2 (Recurso Solar), na região CO são gerados anualmente 193,73 GWh de energia solar e, conforme visto na Tabela 1 - Geração de Energia Elétrica (GWh), na região são gerados 35.408 GWh de energia elétrica conectada no Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesses valores, a geração distribuída (solar) representa 0,54% da geração de energia nesse mercado (CO).

### 3.1.4 GERAÇÃO CENTRALIZADA DE ENERGIA SOLAR (GC)

Geração Centralizada (GC) de Energia Solar é regulamentada pela Resolução Normativa no 676, de 25 de agosto de 2015, que estabelece os “requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de centrais geradoras fotovoltaicas”.

Diferentemente da GD, a GC é caracterizada pela conexão da usina fotovoltaica em redes de transmissão e transportada até centros de consumo para distribuição. A autorização para exploração das centrais geradoras fotovoltaicas com potência superior a 5.000 kW deverá ser requerida à Aneel por meio de procedimentos padrões de registro de outorga.

A tecnologia solar fotovoltaica de conversão de energia adotada na GC é a mesma para a GD; o que muda na prática são as capacidades e o porte dos equipamentos instalados, a alta tensão de conexão com a rede de transmissão, além de outras características técnicas de proteção e controle. Ademais, numa Usina Solar Fotovoltaica (UFV) segundo o modelo de GC, há um ganho de escala na produção de energia; conseqüentemente, os custos de geração de energia são mais baixos.

Um dado importante na geração de energia é o fator de capacidade (**fc**) da UFV, que está diretamente associado aos equipamentos, à orientação e ao local de instalação da geração de energia. Assim, uma UFV que utiliza um equipamento para acompanhar o Sol, chamado “seguidor solar” (*tracker*, no idioma Inglês), apresenta um fator de capacidade maior que um UFV com estrutura fixa, sem seguir o Sol.

Um projeto de grande porte poderá ter um **fc** na ordem de 20 a 25%, enquanto um sistema solar com estrutura fixa poderá operar com **fc** na faixa de 14 a 19%, dependendo muito do local e do índice de irradiação médio. Aparentemente é uma diferença pequena, mas, considerando que uma UFV irá operar por período acima de 20 anos, o resultado de geração de energia compensará o investimento adicional no seguidor solar.

### 3.1.5 PROJEÇÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR DISTRIBUÍDA

Para efeito da projeção do crescimento da energia solar na modalidade de geração distribuída, foram considerados o crescimento médio dos últimos 5 anos de 33,56% e o crescimento anual adicional de 1%. Foi considerada também uma potência média de 13,22 kWp por sistema instalado, seguindo os valores médios verificados até o momento.

Como visto inicialmente, a energia solar contribui com pouco mais de 1% da geração de energia nacional, mas apresenta um potencial de crescimento elevado graças à redução dos custos e ao aumento da eficiência de conversão de energia da tecnologia.

---

**EM TERMOS DE ÁREA,  
OS SISTEMAS SOLARES  
INSTALADOS NAS  
RESIDÊNCIAS NOS  
ESTADOS DO CENTRO  
OESTE OCUPAM  
POUCO MAIS QUE 33  
CAMPOS DE FUTEBOL  
DO TAMANHO DO  
MARACANÃ**

---

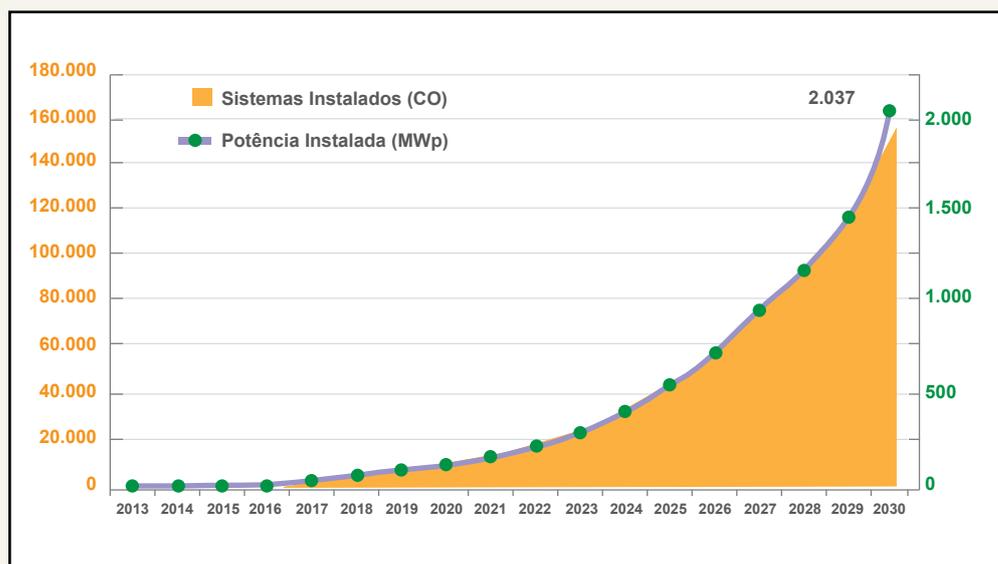


Figura 11 – Projeção de geração de eletricidade por sistemas fotovoltaicos. Fonte: Elaborado pelos autores.

**A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR PROJETADA PARA 2030 COM BASE NESTE ESTUDO É DE 3.212 GWH/ANO. ELA SERIA SUFICIENTE PARA ATENDER CERCA DE 1 MILHÃO DE FAMÍLIAS CONSUMINDO MENSALMENTE 250 KWH.**

A geração de energia projetada para 2030 com base no cenário acima é de 3.212 GWh/ano. Essa conta leva em consideração a irradiação solar média de 1.577 kWh/kWp-ano, para a capacidade instalada de 2.036.520 kWp (2,04 GWp). Nesse cenário, a geração de energia solar em 2030 seria suficiente para atender a cerca de 1 milhão de famílias consumindo mensalmente 250 kWh. A área necessária para instalar 2,04 GWp seria equivalente a 12.219.120 m<sup>2</sup> (1.712 campos do Maracanã), considerando a eficiência dos módulos fotovoltaicos de hoje.

O custo de investimento nesse cenário de 2030 considera o valor presente da tecnologia, de R\$ 4.500 / kWp, de modo que o investimento total seria de aproximadamente R\$ 9,2 bilhões. Ao assumirmos uma redução média no custo da tecnologia e nos equipamentos acessórios de 5% ao ano até 2030, o investimento total a ser realizado nesse cenário seria de R\$ 7,6 bilhões de reais.

Comparativamente, se o lago de 1.625 km<sup>2</sup> definido no item 2.2 fosse todo coberto com módulos fotovoltaicos, a potência total instalada seria equivalente a uma usina solar de 270,83 GWp; vale observar que, atualmente, existe pouco mais de 3 GWp de energia solar fotovoltaica instalada no Brasil (GD e GC). Esse comparativo serve para demonstrar o potencial da energia solar no Brasil (e no mundo).

### 3.2 BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR

No Brasil, o setor sucroenergético desempenha um importante papel na diversificação da matriz energética tanto com a produção de etanol quanto com a produção de eletricidade através do processo de cogeração (tratada aqui como bioeletricidade). Em 2017, esses produtos da cana-de-açúcar representaram cerca

de 17% da oferta interna de energia, com o etanol suprindo cerca de 16% da energia consumida no setor de transportes e a bioeletricidade representando cerca de 6,5% da capacidade instalada do setor elétrico (EPE, 2018).

No início do programa do Proálcool, os resíduos da produção de cana-de-açúcar (palha e bagaço) eram vistos como problemas, sendo queimados em caldeiras de baixa pressão com pouca eficiência energética. Porém, com o desenvolvimento do setor, as usinas passaram a investir em caldeiras mais eficientes, visando exportar a eletricidade excedente para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Atualmente existem 405 usinas somando uma capacidade instalada de 11,4 GW, potência 60% maior que a parte brasileira da Usina Hidrelétrica de Itaipu (ANEEL, 2019).

A presente seção discute como a expansão da cogeração nas usinas de cana-de-açúcar pode contribuir para a ampliação e a diversificação da matriz elétrica nos estados de MT e MS.

### 3.2.1 DESCRITIVO DA TECNOLOGIA

A cogeração pode ser definida como o processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada de energia térmica e mecânica, que geralmente é convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária (ANEEL, 2008). Nas usinas de etanol e açúcar, a cogeração utiliza resíduos do processamento da cana como combustível para a produção de energia. Conforme ilustra a Figura 12, nesse processo uma caldeira é utilizada para queimar os resíduos, aquecer e aumentar a pressão da água; ao passar pelas turbinas, esse vapor d'água é transformado em energia mecânica que pode ser utilizada tanto no processo produtivo da usina quanto para geração de eletricidade.

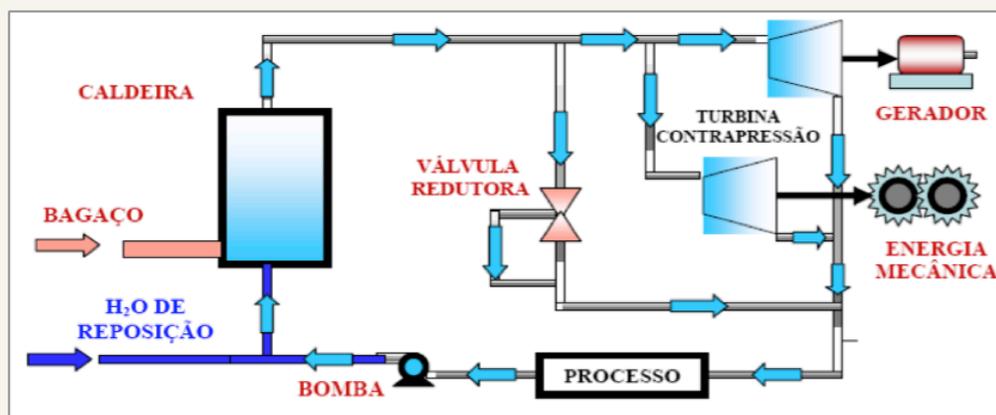


Figura 12 – Esquema simplificado dos principais componentes de uma unidade de cogeração. Fonte: (TOMAZ et al., 2017)

Apesar do aumento no uso da palha da cana-de-açúcar como combustível na cogeração, o bagaço continua como principal combustível nesse processo. O bagaço de cana é o resíduo sólido remanescente do processo de moagem da cana-de-açúcar. A proporção desse resíduo depende da variedade de cana-de-açúcar utilizada. O material genético em uso no Brasil apresenta um teor de 270 a 290 kg de bagaço (com 50% de umidade) por tonelada de cana processada. Nas usinas de etanol e açúcar, a maior parte (cerca de 90%) desse resíduo é queimado na usina para a produção do vapor que será utilizado no processo produtivo de açúcar, etanol ou energia elétrica (CONAB, 2011); o restante é aproveitado de inúmeras maneiras, como ração animal, fertilizante, biogás, matéria-prima para compensados e na utilização na indústria química em geral (DANTAS, 2010).

### 3.2.2 PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS ESTADOS DE MT E MS E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Nas últimas duas décadas, o setor sucroenergético passou por um forte ciclo de expansão, com a ampliação da área colhida de cana-de-açúcar na ordem de 112% e de 133% na quantidade produzida (IBGE, 2019a). Esse crescimento foi impulsionado principalmente pela conjuntura favorável de demanda interna e externa, bem como de preços do açúcar e do etanol.

O etanol teve sua demanda interna impulsionada pela popularização dos veículos *flex fuel*, principalmente a partir do ano 2006. Segundo dados da Unica (2019), os veículos *flex fuel* passaram de 6,1% em 2005 para mais três quartos (76%) da frota nacional de veículos leves em 2018. Conforme indica o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 – PDE2027 (MME/EPE, 2018), é projetado um crescimento de cerca de 4,3% ao ano na demanda de etanol com um maior número de consumidores substituindo o uso de gasolina automotiva. O PDE 2027 também projeta a construção de 11 novas usinas e a expansão produtiva em outras 23 unidades que, em conjunto com as unidades existentes, produzirão cerca de 44 bilhões de litros de etanol em 2027.

A dinâmica desse setor também está intrinsecamente ligada aos mercados internacionais de açúcar. Na safra de 2018/19, o Brasil foi o segundo maior produtor da *commodity*, com 29,5 milhões de toneladas, sendo a Índia a principal produtora com 33 milhões de toneladas e a União Europeia no terceiro lugar com cerca de 18,2 milhões de toneladas (FAS/USDA, 2019). Projeções da OECD/FAO (2016) apontam que o mercado global de açúcar irá crescer cerca de 2,1% ao ano chegando em 2025 com a produção total de 210 milhões de toneladas. O mesmo relatório da FAO projeta que o Brasil continuará sendo um dos maiores produtores: 42 milhões de toneladas no ano de 2025.

---

**APESAR DO AUMENTO NO USO DA PALHA DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO COMBUSTÍVEL NA COGERAÇÃO, O BAGAÇO CONTINUA COMO PRINCIPAL COMBUSTÍVEL NESSE PROCESSO**

---



NO INÍCIO DO PROGRAMA DO PROÁLCOOL, OS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR (PALHA E BAGAÇO) ERAM VISTOS COMO PROBLEMAS, SENDO QUEIMADOS EM CALDEIRAS DE BAIXA PRESSÃO COM POUCA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

No Brasil, os estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso são respectivamente o quarto e sexto maiores produtores de cana-de-açúcar, somando 66 milhões de toneladas no ano de 2017 (IBGE, 2019a). Porém, como ilustra a Figura 13, a magnitude da expansão da produção de cana-de-açúcar apresenta padrões bastante distintos nos dois estados. No período entre 2000 e 2017, a produção de cana-de-açúcar no estado de MS aumentou cerca de 700%, passando de 5,8 milhões para 46,9 milhões toneladas. Nesse mesmo período, a produção no estado de MT avançou numa taxa cerca de 6 vezes menor, passando de 8,5 milhões para 19,3 milhões de toneladas (IBGE, 2019a).

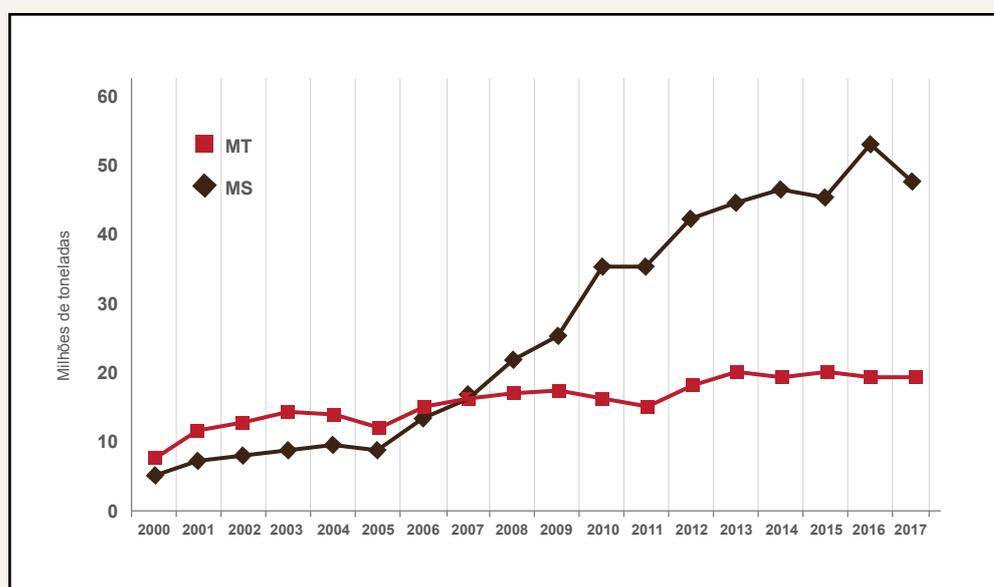


Figura 13 – Produção de cana-de-açúcar nos estados de MS e MT. Fonte: elaborado pelos autores baseado em IBGE (2019a).

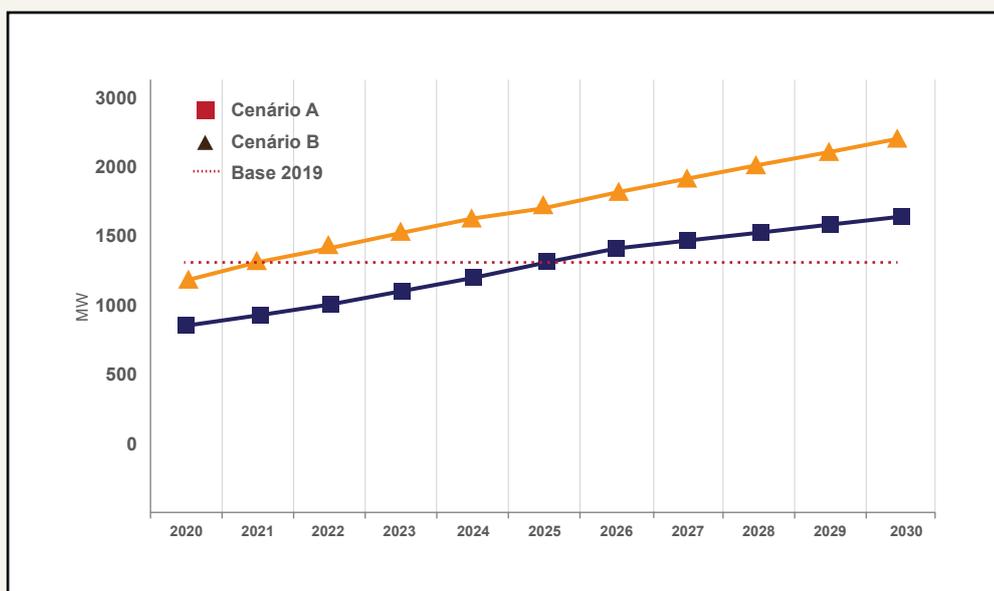
NO BRASIL, OS ESTADOS DE MATO GROSSO DO SUL E MATO GROSSO SÃO RESPECTIVAMENTE O QUARTO E SEXTO MAIORES PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, SOMANDO 66 MILHÕES DE TONELADAS NO ANO DE 2017

Para projetar os cenários de geração de eletricidade através da cogeração dos resíduos de cana-de-açúcar, são necessários dois componentes principais: i) a taxa de crescimento da quantidade de cana-de-açúcar produzida; e ii) a taxa de conversão de cana-de-açúcar em eletricidade. Para a primeira, adotou-se que o ritmo conservador de expansão<sup>4</sup> de cerca 8% ao ano para o estado de MS e cerca de 6% para MT. As projeções de capacidade de geração de eletricidade consideraram dois cenários tecnológicos seguindo metodologia desenvolvida em Coelho et al. (2012):

- **Cenário A:** considera o sistema de geração com a capacidade de produzir 60 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, com operação das usinas somente durante a safra (de abril a novembro), totalizando 5.563 horas (cerca 63%);

<sup>4</sup> Entre os anos de 2000 e 2017, a quantidade de cana-de-açúcar no estado de MS cresceu em média 14% ao ano (IBGE, 2019a).

- **Cenário B:** considera o sistema de geração com a capacidade de produzir 120 kWh<sup>5</sup> por tonelada de cana-de-açúcar, com operação das usinas na safra e entressafra em 85% das horas do ano, totalizando 7.446 horas. Esse cenário assume a utilização de outros resíduos além do bagaço, como palha e pontas.



**ATUALMENTE  
EXISTEM 31 USINAS  
NA REGIÃO QUE GERAM  
ELETRICIDADE: 23 NO  
ESTADO DE MS E OITO  
EM MT**

Figura 14 – Projeção de capacidade instalada de acordo com diferentes cenários de aproveitamento energético. Fonte: elaborado pelos autores baseado em Coelho et al. (2012) e IBGE (2019a).

Atualmente existem 31 usinas na região que geram eletricidade: 23 no estado de MS e oito em MT. Essas usinas somam a capacidade instalada de cerca de 1.263 MW e evidenciam a adoção do caminho tecnológico semelhante ao adotado no cenário B.

A Figura 14 ilustra a evolução da capacidade instalada, considerando os dois cenários. No cenário A, projeta-se que a potência instalada das usinas nos dois estados será de 1.794 MW no ano de 2030, o que significaria a adição de cerca de 531 MW à potência instalada atualmente e a geração de 2,9 TWh por ano. No cenário B, a potência instalada quase dobraria com a adição de 1.132 MW, totalizando 2.395 MW. Sob os parâmetros de geração do cenário B, essa potência adicional seria capaz de gerar cerca de 8.4 TWh por ano. Isso significaria expandir o atendimento de 1,5 milhão de residências no cenário A e de 4,4 milhões de residências no cenário B<sup>6</sup>.

5 Novas tecnologias possibilitam configurações produtivas que chegam a gerar 160 kWh/t (NOVA CANA, 2019).

6 Desconsidera as perdas de transmissão e distribuição. Considera o consumo médio mensal de 160 kWh por mês (MME/EPE, 2017).

A expansão de usinas de cana-de-açúcar pode ser feita pela ampliação e modernização de usinas existentes (*Brownfield*) ou com a construção de novas unidades produtivas (*Greenfield*). As opções requerem níveis de investimento diferentes. Caso a expansão projetada seja realizada inteiramente com investimentos em *Brownfield*, o custo total seria de cerca de R\$ 23 bilhões, requerendo a alternativa de *Greenfield* o investimento total de R\$ 32 bilhões. Vale ressaltar que, a partir desses investimentos, poderão ser produzidos 3 bilhões de litros de etanol por ano, além dos 8,4 TWh de eletricidade anuais e açúcar. Quando se divide esse investimento pelos três produtos, os valores caem para R\$ 7,7 bilhões com *Brownfield* e R\$ 10,8 bilhões com *Greenfield*.

### 3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Para o ano de 2030, projeta-se que a população brasileira será de 225 milhões de habitantes, com cerca de 4 milhões residindo no estado de Mato Grosso e outros 3,1 milhões em Mato Grosso do Sul (IBGE, 2019b). Se os padrões de produção e consumo *per capita* atuais forem mantidos, serão produzidas cerca de 234 mil toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por dia e serão demandados 278 milhões de tep<sup>7</sup> de energia. A adoção de tecnologias de transformação de resíduos em energia colabora com a construção de um caminho sustentável no qual são atendidos ambos: o gerenciamento eficiente dos RSU e a geração de energia.

Nesta seção é discutida como a tecnologia de conversão de RSU em energia pode ser utilizada de forma sinérgica, ajudando a expandir a oferta de energia elétrica de forma descentralizada e contribuindo para a redução dos impactos negativos da destinação inadequada de resíduos.

#### 3.3.1 DESCRITIVO DA TECNOLOGIA

A gaseificação é um processo termoquímico que transforma o carbono presente nas estruturas químicas dos elementos pela decomposição da matéria orgânica em um gás (gás de síntese ou *syngas*).

Os gaseificadores podem ser de fluxo contínuo ou batelada, sendo a técnica mais comum para a oxidação parcial a utilização de um agente de gaseificação (oxigênio, ar ou vapor quente), em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para combustão).

Os principais componentes do gás de síntese são o monóxido de carbono e o hidrogênio, contendo também dióxido de carbono e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor d'água em diferentes proporções.

A composição dos gases e a produção concomitante de combustíveis sólidos

<sup>7</sup> tep: tonelada equivalente de petróleo, aproximadamente 42 GJ.

(carvão) e líquidos condensáveis (pirolenhosos) dependem dos seguintes fatores: tipo de gaseificador, forma de fornecimento de energia ao processo, uso ou não de vapor d'água junto com o comburente (ar, O<sub>2</sub>), tempo de retenção da carga, sistema de retirada de gases e outros produtos da matéria orgânica utilizada (MIRANDA, 2014).

Os sistemas de pequeno porte são comercializados basicamente por empresas indianas, com a tecnologia de leito fixo *down-draft*. As unidades com potência abaixo de 100-200 kW operam, na maioria dos casos, alimentando motores diesel em sistema dual (diesel-gás de síntese<sup>8</sup>), mas há algumas experiências com motor a gás adaptado (não completamente comprovado). Esses sistemas são de simples operação e podem ser usados para geração de energia na zona rural e em sistemas isolados em países em desenvolvimento. Há vários exemplos de sistemas instalados na Índia (Bangalore) (IISc, 2010) e Brasil/Amazônia (CENBIO/IEE/USP, 2006).

A Tabela 4 a seguir representa algumas características gerais dos gaseificadores.

**Tabela 4 - Características dos gaseificadores. Fonte: Miranda (2014).**

Características	Variações
Poder Calorífico do gás Produzido	Baixo: até 5 MJ/Nm <sup>3</sup> (997 kcal/kg)
	Médio: 5 a 10 MJ/Nm <sup>3</sup> (997 a 1.993 kcal/kg)
	Alto: 10 a 40 MJ/Nm <sup>3</sup> (1.993 a 7.972 kcal/kg)
Tipo de agente gaseificador	ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio
Tipo de leito	Fixo: corrente paralela ou contracorrente
	Fluidizado: borbulhante ou circular
Pressão de trabalho	Baixa: pressão atmosférica
	Pressurizado: até 6 Mpa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos agrícolas, industriais ou sólidos urbanos
	Biomassa <i>in natura</i> , peletizada ou pulverizada

O tipo de biomassa alimentada depende basicamente do tipo de gaseificador. Os gaseificadores de leito fixo necessitam de uma granulometria adequada e de umidade de até 25%. Quanto às biomassas menos densas, esses gaseificadores re-

8 80% gas de síntese, 20% diesel

querem que elas sejam peletizadas, o que na maior parte dos casos inviabiliza o balanço energético e econômico.

A biomassa *in natura* ou pulverizada pode ser usada em gaseificadores de leito fluidizado, mas os projetos de maior potência elétrica instalada são limitados. Desde 2014 a única planta de gaseificação em leito fluidizado para geração de potência em maior escala de que se tem conhecimento (1 MW) está em Güssing, Áustria (GRE, 2014), onde o gaseificador é alimentado com cavaco de madeira, e o gás de síntese com um motor a gás.

As outras unidades de maior escala são apenas para geração de energia térmica. Isso ocorre porque o grande gargalo tecnológico é a limpeza adequada do gás de síntese para alimentar o motor elétrico; por esse motivo (dificuldade de limpeza dos gases), as plantas de grande porte construídas com a expectativa de alimentação em turbinas a gás foram desativadas.

O processo de gaseificação ocorre em equipamentos chamados de gaseificadores. Os principais tipos de gaseificadores são:

**Gaseificadores de leito fixo:** A matéria a ser gaseificada move-se por ação da gravidade. Esses gaseificadores são construídos com um leito fixo, onde o combustível é suportado por uma grelha, podendo ser de fluxo ascendente (*up-draft*) ou descendente (*down-draft*) com relação ao gás produzido. É a tecnologia mais difundida, conhecida e dominada operacionalmente, que vem sendo implementada principalmente em pequenas escalas.

Na geração de energia elétrica, gaseificadores de leito fixo têm sido (e podem ser) empregados na alimentação de motores de combustão interna, em sistema de capacidades entre 1 kW e 200 kW.

Os gaseificadores de leito fixo de fluxo descendente ou cocorrentes (*down-draft*) possuem o oxidante (ar) e o gás produzido fluindo para baixo (figura 15), gerando gases com baixos teores de alcatrão e de material particulado. O baixo rendimento em torno de 15-20% (CENBIO/IEE/USP, 2006), a dificuldade de manuseio (alimentação manual) e as cinzas geradas são problemas comuns nesses pequenos gaseificadores descendentes.

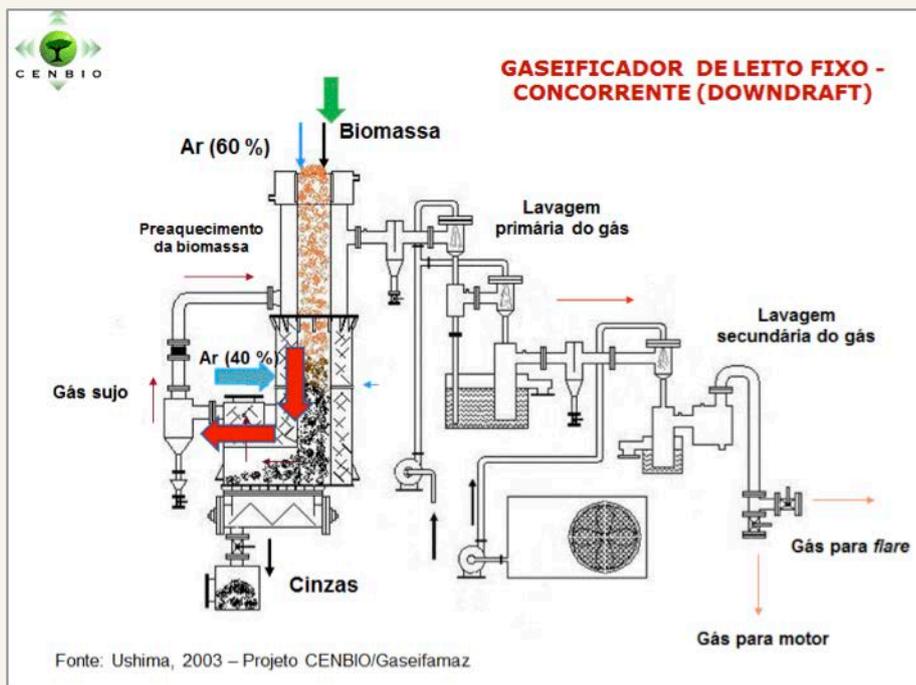


Figura 15 - Gaseificador de leito fixo down. Fonte: projeto GASEIFAMAZ (CENBIO/IEE/USP, 2006).

**Gaseificadores de leito fluidizado:** Nos equipamentos desse tipo, utiliza-se um material mantido suspenso em um leito de partículas inertes (em geral areia), mantidas em movimento pelo fluxo de ar. Nesse movimento, a biomassa é arrastada, de forma semelhante às caldeiras de leito fluidizado. Esses gaseificadores podem ser do tipo borbulhante ou circulante, conforme a velocidade com que o material atravessa o leito. No tipo borbulhante, a velocidade é de até 3 m/s, e no circulante o material atravessa em velocidade mais alta (acima de 3 m/s), permitindo melhor mistura do ar com o combustível a ser gaseificado.

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser pressurizados ou atmosféricos, dependendo da pressão de trabalho, como indicado na tabela anterior. Entretanto, a experiência mostrou que os gaseificadores pressurizados apresentam dificuldades técnicas referentes ao sistema de alimentação da biomassa e ao sistema de limpeza do gás a alta pressão/temperatura.

### 3.3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) NOS ESTADOS DE MT E MS E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Aprovado em agosto de 2010, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é o principal marco regulatório do gerenciamento de resíduos sólidos. Seu objetivo principal é promover formas saudáveis e sustentáveis de gerenciamento de RSU nos 5570 municípios brasileiros (BRASIL, 2010). Entretanto, os indicadores de acesso e qualidade dos serviços de gerenciamento de RSU mostram poucos

avanços nessa primeira década de implementação do PNRS. Entre 2010 e 2016, a parcela da população brasileira com acesso à coleta de resíduos sólidos caiu de 82% para 75%, e a destinação adequada dos resíduos coletados aumentou apenas 0,8%, o que resultou em cerca de 81 mil toneladas de resíduos sem destinação adequada (ABRELPE, 2016; MCIDADES, SNSA, 2018; SNIS, 2016).

Apesar de, na região Centro-Oeste, cerca de 99% da população urbana ser atendida pelo serviço de coleta de RSU (Figura 16), em apenas 13,9% dos municípios os resíduos coletados são adequadamente destinados (aterro sanitário). A destinação adequada considera sistemas de proteção ambiental e de segurança de trabalho que visam reduzir ou eliminar a contaminação de águas subterrâneas e superficiais, do solo e do ar. O uso da tecnologia de gaseificação apresenta importantes sinergias com a expansão do gerenciamento adequado dos resíduos sólidos urbanos por: i) reduzir o volume de resíduos destinados aos aterros; ii) reduzir os riscos de contaminação do solo; iii) diminuir as emissões de GEE; e iv) gerar eletricidade de forma distribuída e mais próxima dos grandes centros de consumo.

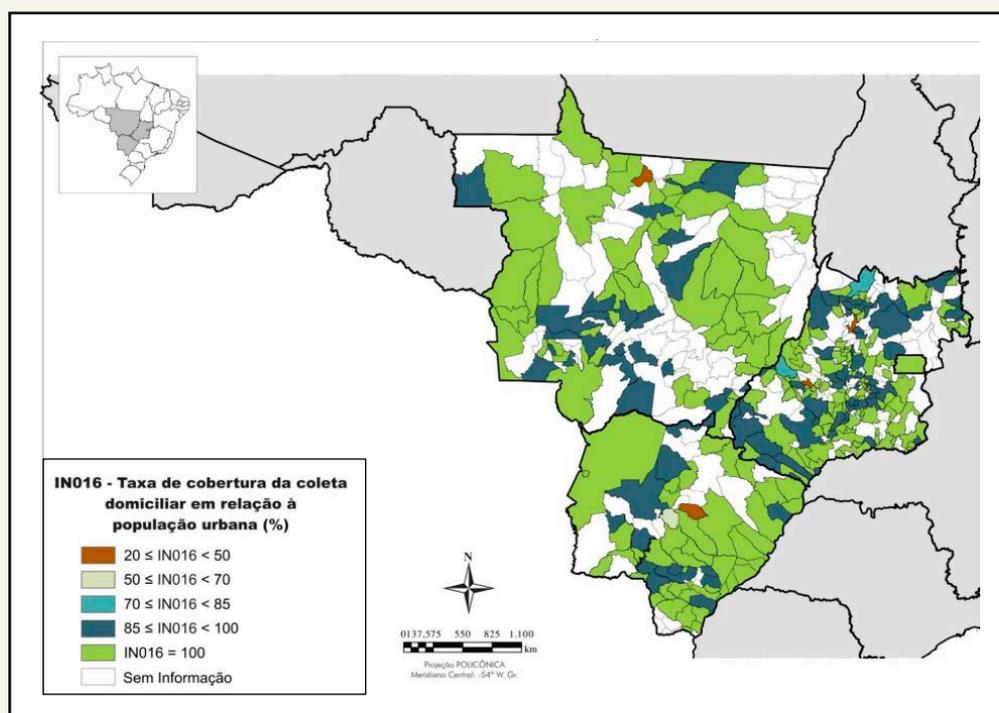


Figura 16 – Taxa de cobertura de coleta domiciliar em relação à população urbana em %, (indicador IN016). Fonte: Brasil (2019).

Para compreender como a gaseificação de resíduos sólidos pode contribuir para a expansão de disponibilidade de energia elétrica nos estados de MS e MT, foram considerados dois principais fatores. O primeiro é o crescimento populacional nos municípios dos dois estados entre os anos de 2019 até 2030, que foi estimado considerando as projeções populacionais calculadas pelo IBGE (2019b). Esse

dado é importante para estimar a quantidade de resíduos gerados por município e, posteriormente, dimensionar as unidades de processamento. O segundo fator é o tamanho mínimo da usina de geração para que o projeto seja economicamente viável. Apesar de os fabricantes indicarem a viabilidade de projetos que atendam no mínimo a 20 mil habitantes (CARBOGÁS, 2019), no presente estudo foi adotado o tamanho mínimo de 45 mil habitantes de modo a manter as estimativas conservadoras e próximas da escala de atração de investidores.

No período de 2017 a 2030, a população do estado de MS está projetada para crescer cerca de 12%, passando de 3,5 para 3,9 milhões de habitantes. Por sua vez, a população do estado do MT vai crescer menos (11%), passando de 2,8 para 3,07 milhões de habitantes. Utilizando essas mesmas taxas de crescimento para os municípios, projetou-se que o número de municípios com mais de 45 mil habitantes passará de 23 para 25. Considerando que os padrões de consumo e produção de resíduos serão mantidos nos próximos anos, a produção diária de resíduos nesses Municípios crescerá de 5,9 para 6,5 mil toneladas.

A Figura 17 ilustra a evolução estimada do potencial de capacidade instalada de projetos de geração de eletricidade através da gaseificação de RSU. No final do período analisado, estima-se uma expansão na capacidade instalada de cerca de 64,7 MW, com o potencial de gerar 567 GWh por ano, atender cerca de 295 mil residências e somar investimentos na ordem de R\$1,3 bilhões. Vale notar, pelo gráfico, um crescimento na capacidade instalada no ano de 2028 que pode ser explicado pelos dois municípios que passam ao tamanho mínimo para instalação de uma usina de gaseificação.

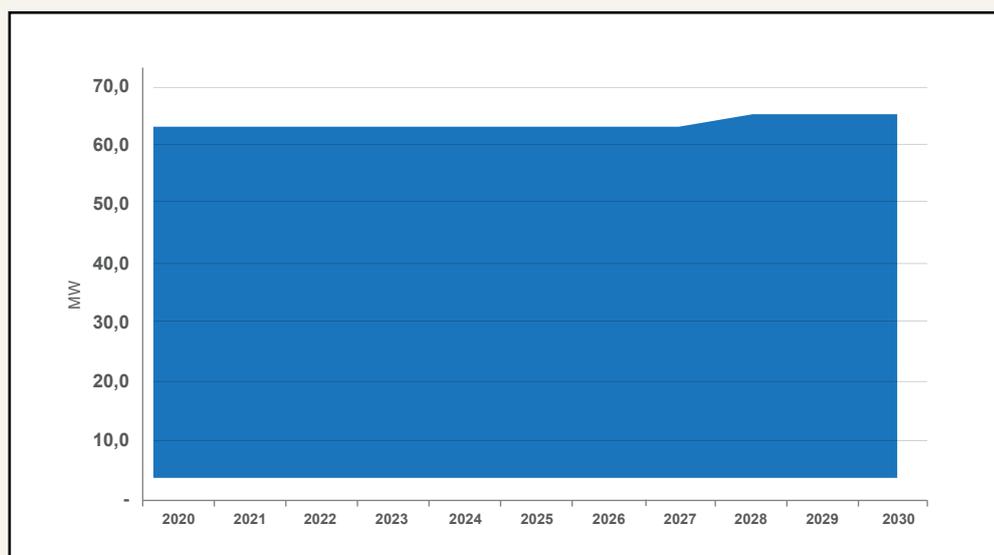


Figura 17 - Projeção de capacidade instalada do aproveitamento energético dos RSU. Fonte: elaborado pelos autores baseado em Carbogás (2018) e IBGE (2019b).

O USO DA TECNOLOGIA DE GASEIFICAÇÃO APRESENTA IMPORTANTES SINERGIAS COM A EXPANSÃO DO GERENCIAMENTO ADEQUADO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

## 3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES

### 3.4.1 PRODUÇÃO ANIMAL

O Brasil é tradicionalmente um dos maiores produtores de proteína animal do mundo. No ano de 2017, foi o maior produtor de bovinos, com cerca de 215 milhões de cabeças; o quarto maior produtor de frangos, com cerca de 1,4 bilhão de aves; e o terceiro maior produtor de suínos no mundo, com cerca de 41 milhões de cabeças (FAO, 2019). Apesar dos impactos econômicos positivos, a produção animal está associada a dois importantes problemas ambientais: as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e a geração de grandes quantidades de dejetos.

No ano de 2016, a agropecuária foi a segunda maior fonte de emissões no Brasil, com quase 500 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, sendo compostas principalmente pela fermentação entérica na pecuária, pelo manejo dos dejetos animais e pelo óxido nitroso gerado do uso de fertilizantes nitrogenados (OC - OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018). Esses resíduos da produção animal são ricos em matéria orgânica que libera carbono na atmosfera durante o processo de decomposição. Essa alta concentração de carga orgânica acarreta no segundo grande impacto ambiental, pois, quando não tratados, podem contaminar os recursos hídricos locais (COELHO et al., 2018).

A presente seção discute a utilização de biodigestores como tecnologia alternativa tanto para produzir biogás e gerar energia elétrica quanto para diminuir os impactos negativos do manejo de resíduos da produção animal.

#### 3.4.1.1 DESCRITIVO DA TECNOLOGIA

O biogás é um dos subprodutos produzidos pela digestão anaeróbica dos componentes orgânicos dos efluentes líquidos e, devido à sua composição, pode ser utilizado para geração de energia renovável. Tipicamente, esse gás é composto de 60% de metano (CH<sub>4</sub>), 35% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e 5% de outros gases como nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono e oxigênio, entre outros (COELHO et al., 2018). Sua vocação para o uso energético se dá por essa alta concentração de metano que pode ser utilizado tanto para fins térmicos com a substituição de combustíveis fósseis em veículos quanto para geração de eletricidade.

O biodigestor é um sistema fechado que propicia o processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica dos dejetos pelo consórcio de microrganismos. Como ilustrado na Figura 18, na primeira etapa do processo os dejetos são captados e acumulados; em seguida, entram no biodigestor, onde o insumo passa por várias etapas de degradação. No final do processo, existem dois principais subprodutos: i) o lodo, que pode ser utilizado como biofertilizante; e ii) o biogás, que pode ser convertido em energia térmica e/ou elétrica.



FORAM CONSIDERADAS AS FONTES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, ENERGIA DA BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR, ENERGIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS, PARTICULARMENTE DAS DUAS PRINCIPAIS CIDADES DA REGIÃO (CUIABÁ E CAMPO GRANDE), ALÉM DA ENERGIA DOS EFLUENTES LÍQUIDOS (ESGOTO) E DEJETOS ANIMAIS.

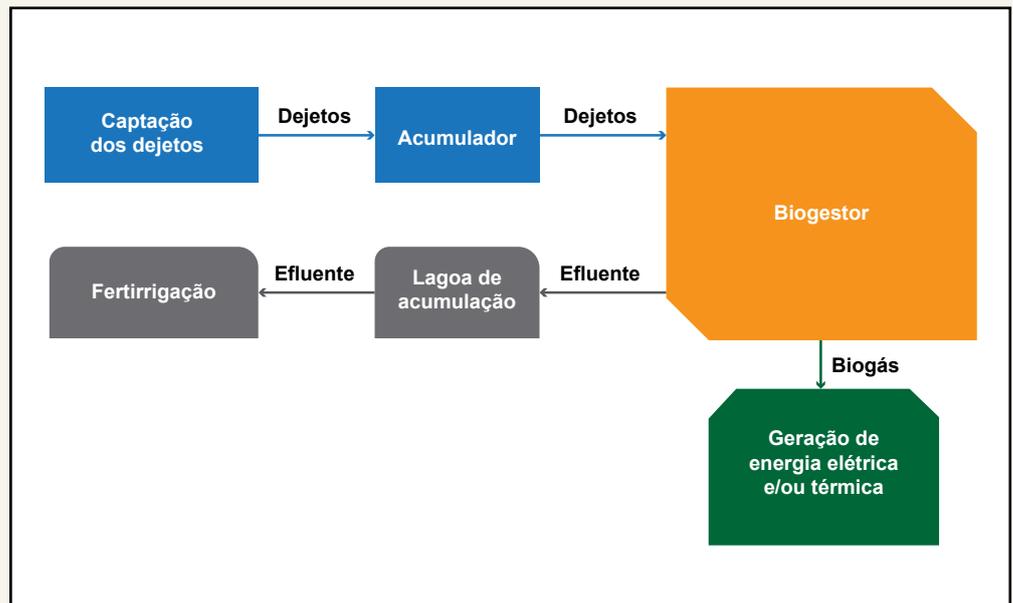


Figura 18 – Processo de biodigestão de dejetos animais. Fonte: Elaborado pelos autores baseado em Coelho et al. (2018).

No Brasil, a tecnologia de biodigestão das lagoas cobertas de fluxo ascendente (Figura 19) é a mais utilizada por sua simples construção, pela disponibilidade dos equipamentos no mercado interno e pela possibilidade de usar os efluentes como fertilizante sem necessidade de higienização. Porém a falta de serviço especializado dificulta e encarece a manutenção dos sistemas.

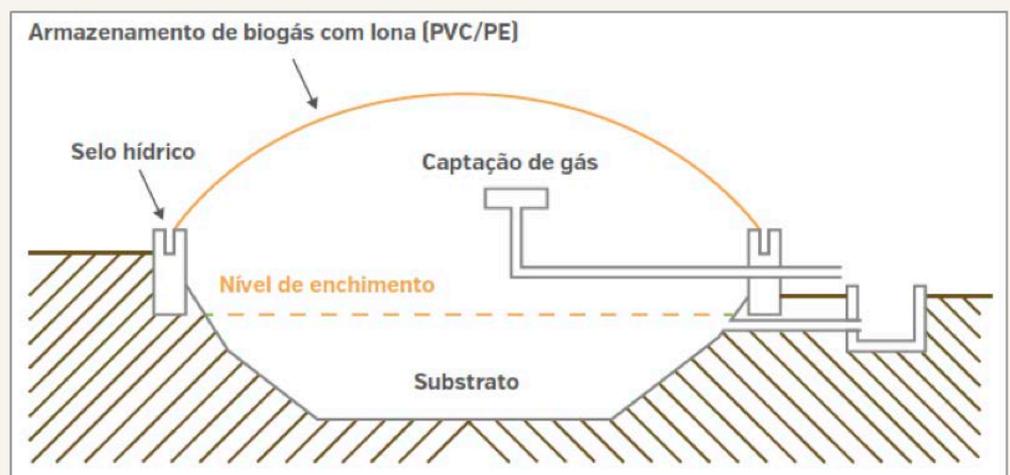


Figura 19 – Esquema de lagoa anaeróbica coberta. Fonte: Brasil (2015a).

O uso de biogás na geração de energia elétrica consiste na transformação da energia química contida no gás em energia mecânica que é posteriormente conver-

tida em energia elétrica. Ao contrário de outras fontes renováveis, a geração de eletricidade através do biogás é constante e pode ser utilizada para amenizar a intermitência do sistema de geração. Entre as tecnologias de utilização energéticas do biogás, destacam-se os motores a gás de ciclo Otto e Diesel, bem como as microturbinas a gás (BRASIL, 2015b).

Os motores ciclo Otto são uma das tecnologias mais utilizadas no aproveitamento energético do biogás e podem ser utilizados em pequenos, médios e grandes plantas de tratamento. Esses motores exigem pouca manutenção, apresentam a versatilidade de utilizar propano ou gás natural na indisponibilidade de biogás e maior vida útil (cerca de 60.000 horas). Porém demandam maior valor de investimento inicial quando comparados com motores de ciclo Diesel (BRASIL, 2015b).

Os motores ciclo Diesel, por sua vez, geralmente são utilizados em grandes plantas de tratamento. Eles apresentam as características de necessitar cerca de 5% de óleo na ignição, ter menor vida útil (cerca de 35.000 horas de operação) e eficiência menor que os motores ciclo Otto. Contudo, essa tecnologia usa motores comuns que diminuem o investimento inicial do projeto (BRASIL, 2015b).

Nas microturbinas, o ar é previamente comprimido e injetado na câmara de combustão sob alta pressão. A combustão dessa mistura realiza o trabalho mecânico que é transformado em eletricidade. No Brasil, esses equipamentos ainda são pouco utilizados, dados os altos custos decorrentes do processo de importação (BRASIL, 2015b; COELHO et al., 2018).

### **3.4.1.2. PRODUÇÃO DE PROTEÍNA ANIMAL NOS ESTADOS DE MT E MS E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE**

Nas últimas duas décadas, o setor de produção de proteína animal passou por importantes transformações nos estados de MT e MS. Analisando-se por tipo de rebanho no período entre os anos de 2000 e 2017, a produção pecuária foi a que acumulou menor variação, com crescimento de 57% no número do efetivo de rebanho em MT e uma queda de 3% no estado de MS. O rebanho de suínos cresceu cerca de 200% no estado de MT e 110% em MS, enquanto o número de cabeças de galináceos aumentou 158% em MT e 49% em MS (Figura 20). Essa expansão do rebanho é naturalmente acompanhada do aumento do volume de dejetos, com produção estimada de 191,1 milhões de toneladas de dejetos no ano de 2017.

---

**NO ANO DE 2016, A AGROPECUÁRIA FOI A SEGUNDA MAIOR FONTE DE EMISSÕES NO BRASIL, COM QUASE 500 MILHÕES DE TONELADAS DE CO<sub>2</sub>,**

---

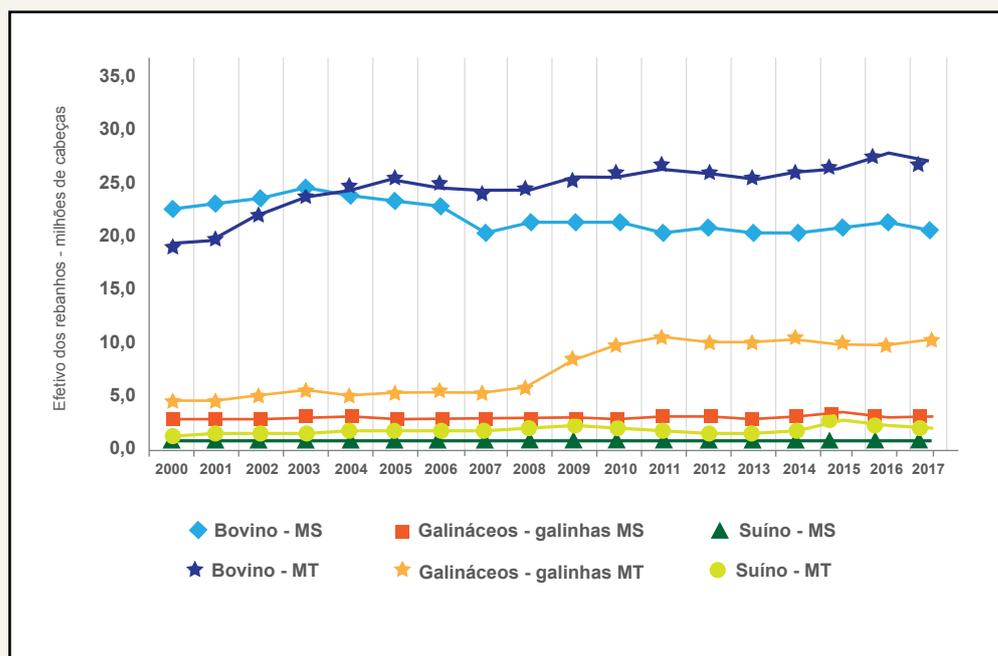


Figura 20 – Evolução histórica do efetivo dos rebanhos nos estados de MT e MS. Fonte: Elaborado pelos autores com os dados (IBGE, 2018).

Para entender como a biodigestão dos resíduos da produção de resíduos animais pode contribuir para a expansão e a diversificação da matriz elétrica da região, foi estimado o potencial de geração para cada resíduo. Na estimativa (detalhada no Anexo A: Metodologia), foi considerado o número total de cabeças de frangos e suínos produzidos no ano de 2017 e levantados pela Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2018). A maior parte da criação de bovinos no Brasil é feita de forma extensiva, o que inviabiliza a coleta e a biodigestão dos dejetos. Por esse motivo, foi considerado que 2%<sup>9</sup> do rebanho é confinado e tem potencial para biodigestão.

Conforme ilustra a Figura 21, o uso dessa tecnologia apresenta o potencial de adicionar cerca de 211 MW à matriz elétrica da região com a produção animal de 2017. O estado de Mato Grosso é o que apresenta maior potencial de geração – 134 MW. A geração de biogás e eletricidade na suinocultura se beneficia da elevada taxa de matéria orgânica dos rejeitos e do confinamento do rebanho, fazendo este apresentar no cenário atual o maior potencial de geração, com 110 MW. Apesar do potencial de geração de eletricidade advindo da pecuária ser o segundo maior, com 72 MW, esse setor poderá dobrar sua produção em 13 anos caso a taxa de crescimento de confinamento continue no ritmo atual.

9 Média nacional de confinamento de bovinos (MOLIN, 2018).

**EM 2030, A POTÊNCIA INSTALADA TOTAL A PARTIR DE BIOGÁS PODE CHEGAR 410 MW E GERAR CERCA DE 3 TWH POR ANO, POSSIBILITANDO O FORNECIMENTO DE ELETRICIDADE PARA CERCA DE 1,5 MILHÃO DE RESIDÊNCIAS E COM UM CUSTO DE INVESTIMENTO APROXIMADO DE R\$1,57 BILHÃO.**

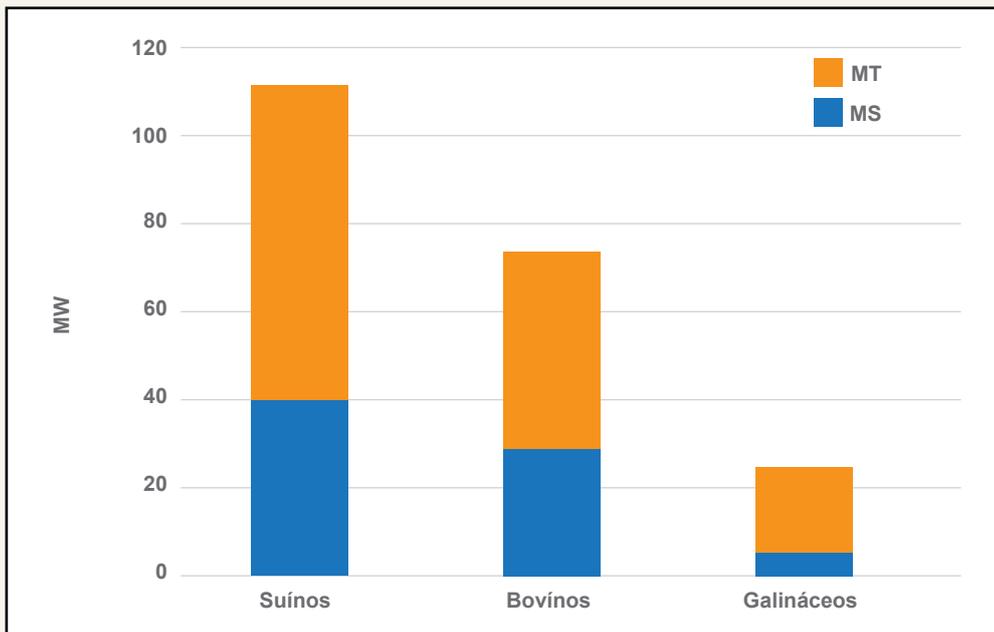


Figura 21 – Estimativa do potencial de geração de eletricidade a partir da biodigestão de resíduos animais. Fonte: Elaborado pelos autores com dados do IBGE (2018) e metodologia desenvolvida em Coelho et al. (2012).

A Figura 22 mostra a projeção estimada da capacidade instalada de projetos de biodigestão de dejetos animais para a produção de eletricidade mantendo constantes as taxas de crescimento dos três tipos de rebanho: suíno, bovino e de aves. Em 2030, a potência instalada total pode chegar aos 410 MW e gerar cerca de 3 TWh por ano, possibilitando o fornecimento de eletricidade para cerca de 1,5 milhão de residências e com um custo de investimento aproximado de R\$1,57 bilhão. A produção de suínos tem a maior participação nessa eletricidade gerada, representando 63% da potência instalada, seguida de bovinos, com 23%, e aves, com 14%.



© Cacallus Garrastazu

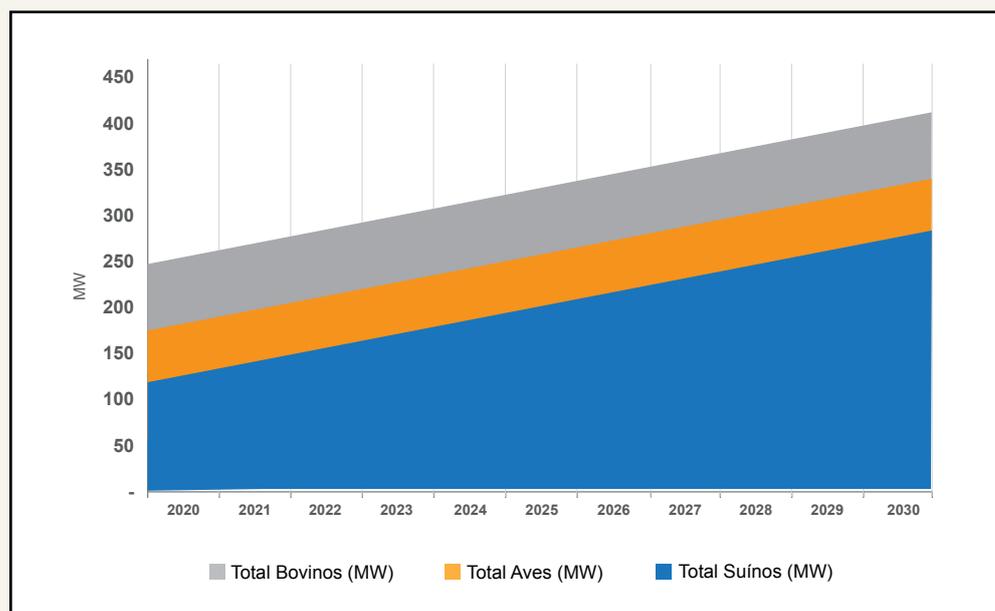


Figura 22- Projeção de potência instalada por tipo de produção animal. Fonte: elaborado pelos autores com base em Coelho et al. (2012) e IBGE (2018).

### 3.4.2 EFLUENTES LÍQUIDOS URBANOS (ESGOTO SANITÁRIO)

A expansão do uso de tecnologias de produção de energia através da biodigestão de esgoto sanitário contribui para a mitigação de dois importantes problemas: o déficit de saneamento básico nacional e a necessidade de geração de energia. O último diagnóstico da situação do saneamento no Brasil apontou que quase 40% da população urbana no país não conta com rede coletora de esgotos e apenas 46% do esgoto produzido em áreas urbanas é tratado (SNIS, 2019a). O uso de tecnologias de recuperação energética dos efluentes oferece a oportunidade de combinar a maximização da eficiência operacional das plantas de tratamento, a minimização de impactos ambientais e a geração de energia renovável e constante.

No Brasil, a implementação dessa tecnologia ainda não é muito difundida, existindo poucas plantas instaladas. Dois grandes exemplos de projetos instalados são o da ETE Arrudas, em Belo Horizonte (MG), e o da ETE Ribeirão Preto (SP). O primeiro projeto atende a cerca de 1,7 milhão de habitantes e tem a capacidade instalada de 2,4 MW utilizando 12 microturbinas para geração de eletricidade. O segundo converte o biogás em eletricidade, utilizando dois conjuntos de motor-gerador ciclo Otto com capacidade instalada de 1,5 MW e atendendo a cerca de 600 mil habitantes (BRASIL, 2016).

Nesta seção, são discutidas as principais linhas tecnológicas para conversão de efluentes urbanos em energia e é analisado o potencial de geração nos estados de MT e MS.

### 3.4.2.1. DESCRITIVO DA TECNOLOGIA

A digestão anaeróbica dos efluentes é realizada utilizando-se biodigestores, nos quais um ecossistema de microrganismos quebra a matéria orgânica complexa em moléculas mais simples, como  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , formando o biogás. No Brasil, o Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA) é o modelo mais utilizado no tratamento de matéria orgânica proveniente dos resíduos líquidos urbanos e rurais. Essa tecnologia ilustrada na Figura 23 apresenta, entre suas vantagens: demanda de baixa energia para a operação; tolerância de elevadas cargas orgânicas; e baixa produção de lodo (BRASIL, 2015b; COELHO et al., 2018).

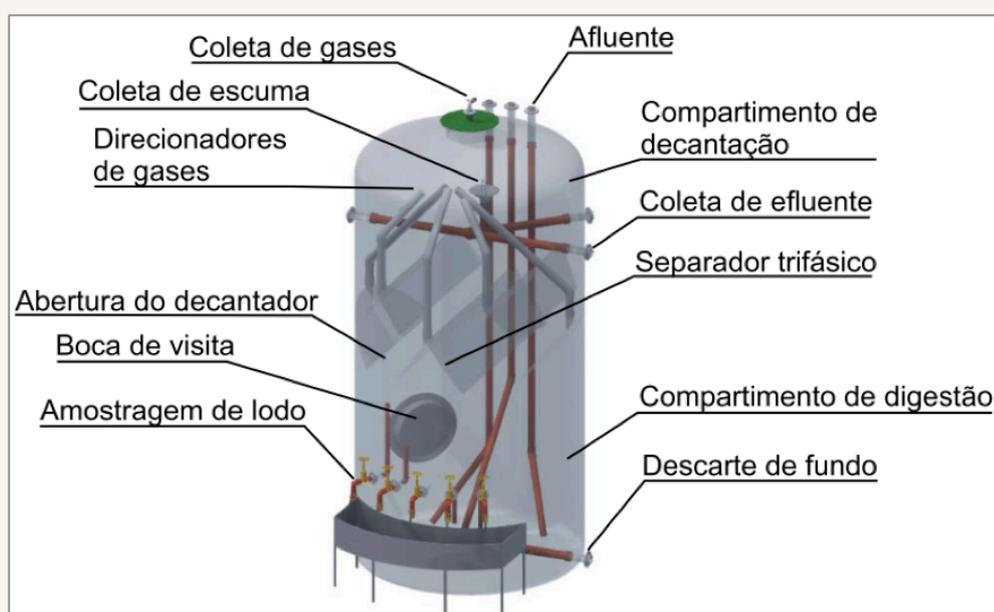


Figura 23 – Esquema biodigestor tipo RAFA (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente), Fonte: Coelho et al. (2018) apud Nova Era Ambiental (2018).

### 3.4.2.2. ESGOTO SANITÁRIO NOS ESTADOS DE MT E MS E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

No Brasil, apesar de importantes avanços na expansão do saneamento básico na última década, ainda existe uma brutal diferença de acesso aos seus principais componentes: abastecimento de água e esgotamento sanitário. No ano de 2017, enquanto cerca de 93% da população urbana tinha acesso à rede de abastecimento de água no Brasil, apenas 60% contava com rede coletora de esgotos (SNIS, 2019a). Nos estados de MT e MS, existe um padrão semelhante: enquanto o acesso à rede de abastecimento de água varia entre 97% (MT) e 99% (MS) da população urbana, a rede coletora de esgoto sanitário beneficia apenas cerca de 49% (MT) e 59% (MS). A ausência de coleta e de tratamento de esgoto sanitário resulta em

**O ÚLTIMO DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO DO SANEAMENTO NO BRASIL APONTOU QUE QUASE 40% DA POPULAÇÃO URBANA NO PAÍS NÃO CONTA COM REDE COLETORA DE ESGOTOS**

severos impactos no ambiente – contaminando águas e solo – e na qualidade de vida da população, sendo o esgoto não coletado um importante fator de disseminação de doenças (SANTOS et al., 2016).

A Figura 24 ilustra a evolução histórica do volume tratado de esgoto sanitário urbano nas últimas duas décadas. Notam-se dois momentos de grande expansão: o primeiro no início dos anos 2000, com um crescimento de cerca de seis vezes no volume tratado; e outra tendência de forte crescimento do início do ano de 2010 até 2017, quando o volume de esgoto tratado em MT passou de 16,7 milhões m<sup>3</sup> para 38,4 milhões m<sup>3</sup>, e de 31,1 milhões m<sup>3</sup> para 56,1 milhões m<sup>3</sup> no estado de MS. Essa tendência de crescimento na coleta e no tratamento do esgoto sanitário cria um ambiente mais propício ao investimento no aproveitamento energético ao aumentar a escala e o tamanho das plantas de tratamento.

**NO BRASIL, APESAR DE IMPORTANTES AVANÇOS NA EXPANSÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NA ÚLTIMA DÉCADA, AINDA EXISTE UMA BRUTAL DIFERENÇA DE ACESSO AOS SEUS PRINCIPAIS COMPONENTES: ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO.**

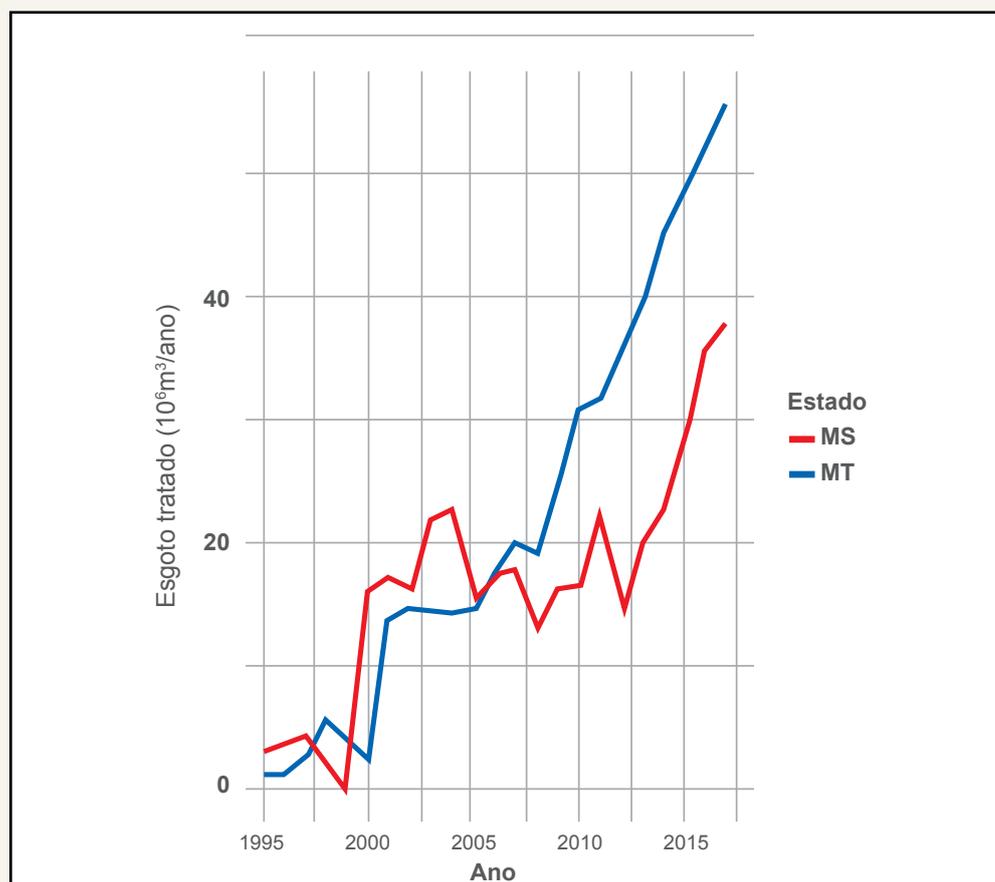


Figura 24 – Volume de esgoto tratado nos estados de MT e MS. Fonte: Elaborado pelos autores com os dados do SNIS (2019b).

Com o objetivo de compreender como a geração de eletricidade a partir de estações de tratamento de efluentes (ETE) pode contribuir para a expansão e diversificação da matriz elétrica, foi realizada a estimativa do potencial teórico de geração sob dois cenários. No primeiro, identificado como “Atual”, são conside-

rados os níveis atuais de abrangência de tratamento de esgoto: 40% da população urbana no estado de MT e 59% em MS. No segundo cenário, identificado como 100%, toda a população urbana dos dois estados seria beneficiada com coleta e tratamento de esgoto. Os dois cenários assumem que todo esgoto tratado é biodigerido e que o biogás gerado é convertido em eletricidade, utilizando-se motores ciclo Otto<sup>10</sup>.

Como ilustrado na Figura 25, no cenário “Atual” se estima um potencial de geração de cerca de 1,8 MW no estado de MS e 1,2 MW no estado de MT, totalizando 3 MW. Quando considerado o cenário “100%”, existe o potencial total de geração de cerca de 12 MW – cerca de 5,6 MW no estado do MS e 6,4MW no estado de MT –, suficiente para abastecer cerca de 34 mil pessoas.

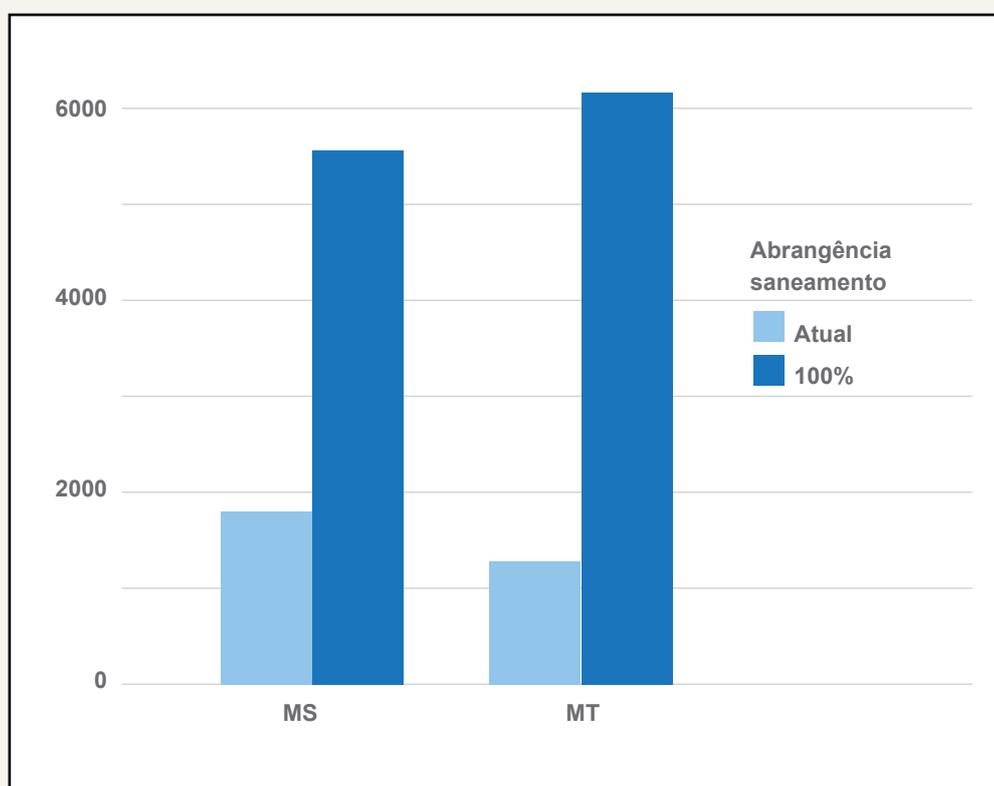


Figura 25 – Comparação do potencial de geração de eletricidade considerando dois cenários de abrangência do saneamento: o Atual e com 100% da população atendida. Fonte: Elaborado pelos autores com dados do SNIS (2019b).

A expansão projetada da capacidade de geração é ilustrada na Figura 26. Esse cenário de geração considera as projeções oficiais de crescimento populacional por estado calculadas pelo IBGE (2019b), a manutenção da taxa de urbanização de 85,6% no MS e 81,9% no MT, bem como a coleta e o tratamento de 100% dos efluentes produzidos pela população urbana. De acordo com as projeções para o

<sup>10</sup> Metodologia detalhada no capítulo de metodologias (Anexo A: Metodologia).

ano 2030, os projetos de geração de eletricidade através da biodigestão de efluentes urbanos podem adicionar cerca de 14 MW de potência, gerar 101 GWh por ano e somar investimentos de cerca de R\$ 522 milhões.

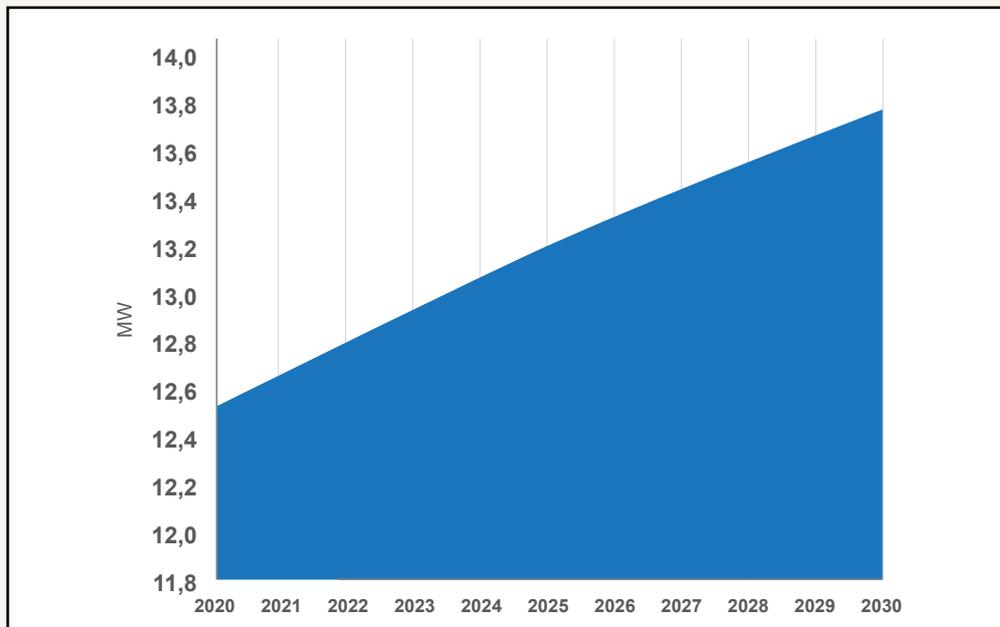


Figura 26 - Expansão projetada da capacidade de geração de eletricidade com esgoto urbano. Fonte: elaborado pelos autores com base em Coelho et al. (2012) e SNIS (2019a).



Patrick Oening Rodrigues - Concurso Áreas que Protegem a Vida - Pantanal/MWF-Brasil

### 3.5. GERAÇÃO DE EMPREGOS

No mundo, o setor de energia renovável emprega mais de 11 milhões de pessoas (dados de 2018). Em termos absolutos, as cadeias produtivas com maior impacto na geração de emprego são a fotovoltaica (3,6 milhões), biocombustíveis (2,1 milhões) e hidroeletricidade (2,5 milhões). Porém, quando se analisa a quantidade de empregos gerados por capacidade instalada, a produção de biogás, biocombustíveis e solar assumem posições importantes, gerando, respectivamente, 20 empregos/MW, 9,9 empregos/MW e 9,0 empregos/MW (IRENA, 2019).

Considerando a média global de geração de empregos por fonte, foi estimado o impacto – no mercado de trabalho local – da implementação dos projetos de geração por outras fontes renováveis propostos neste estudo. A Figura 27 ilustra os resultados dessa estimativa, na qual se nota que os três maiores geradores de empregos são, respectivamente, bioeletricidade de cana-de-açúcar, fotovoltaica e biodigestão de dejetos animais. Em 2030, o total de pessoas empregadas nesses projetos de geração seria de cerca de 29 mil, com o potencial de aumentar a massa salarial dos estados em cerca de R\$ 486 milhões<sup>11</sup> por ano.

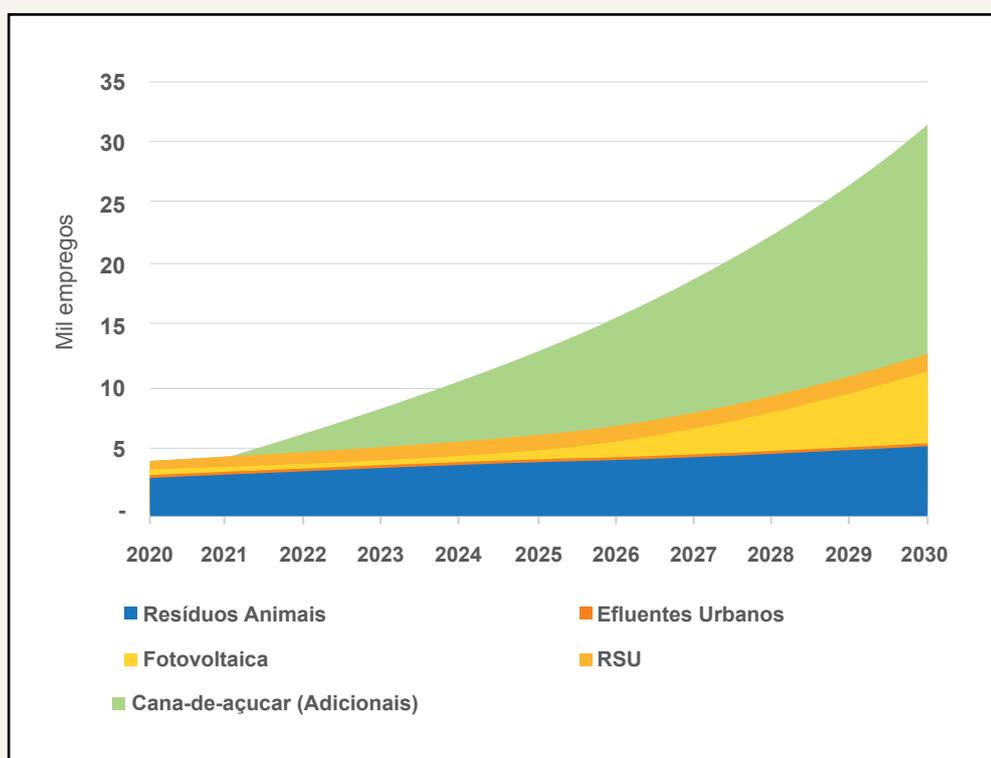
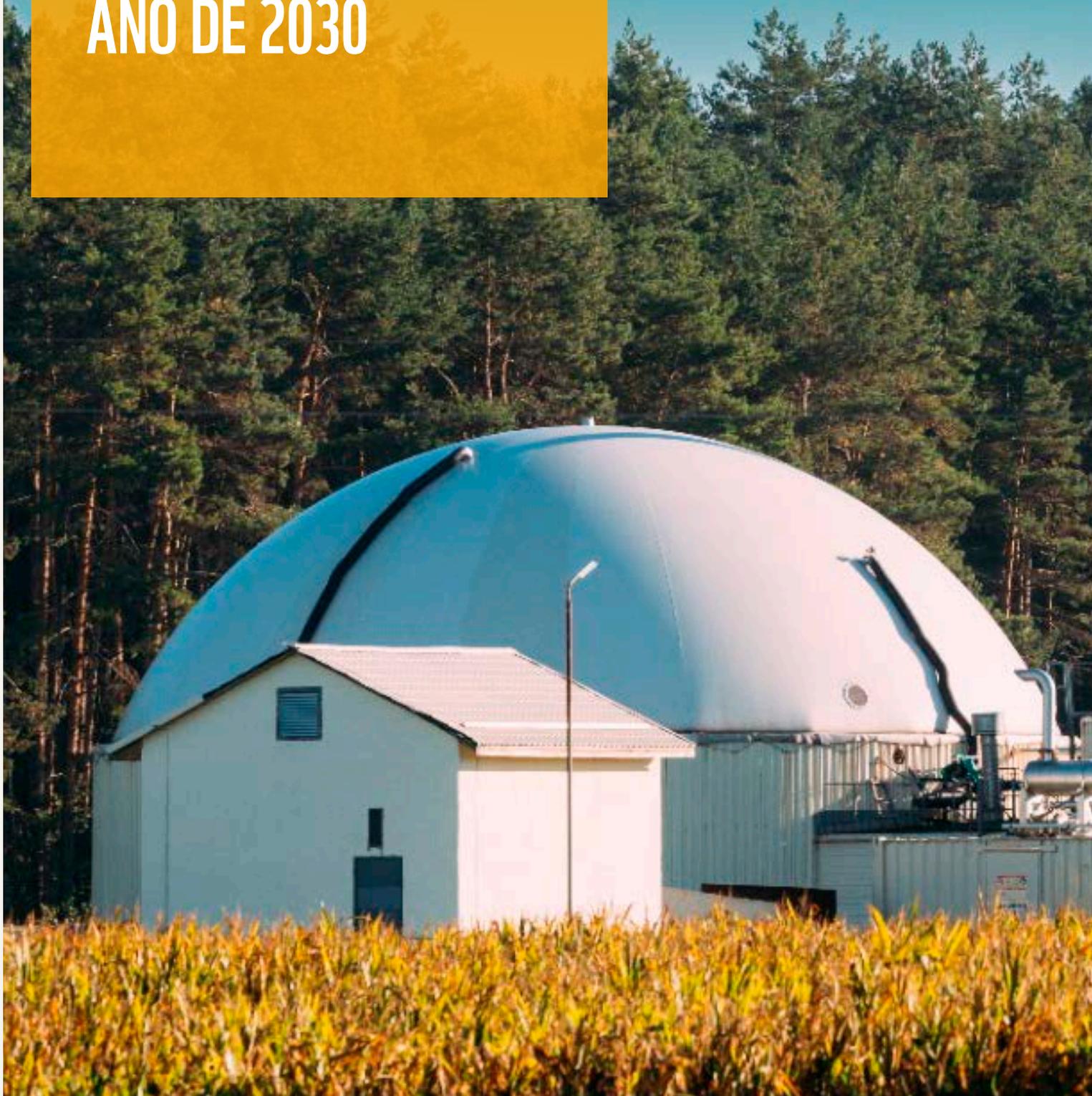


Figura 27 – Projeções de número de trabalhadores envolvidos nas atividades de geração de eletricidade por fonte. Fonte: elaborado pelos autores baseado em IRENA (2018)

<sup>11</sup> Foi considerada a média de rendimentos dos estados de MS e MT no ano de 2018: R\$ 1.412,50 (IBGE, 2019c).

# 4. COMBINAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE ANO DE 2030





A Figura 29 agrega os resultados das projeções de todas as alternativas de geração de eletricidade consideradas neste estudo. Nota-se que as três principais fontes geradoras são a cogeração nas usinas de cana-de-açúcar, solar fotovoltaica e biodigestão de dejetos animais, representando respectivamente 55%, 21% e 20% da energia potencialmente gerada no ano de 2030.

Ao final do período considerado nos cenários, os projetos totalizariam aproximadamente 3.655 MW de potência instalada, o que significa cerca de três vezes a potência nominal das 125 novas PCHs planejadas para serem construídas na Região Hidrográfica do Paraguai. A Figura 28 representa a projeção acumulada da potência instalada (em MW) das fontes renováveis de energia não hídricas no CO do Brasil.

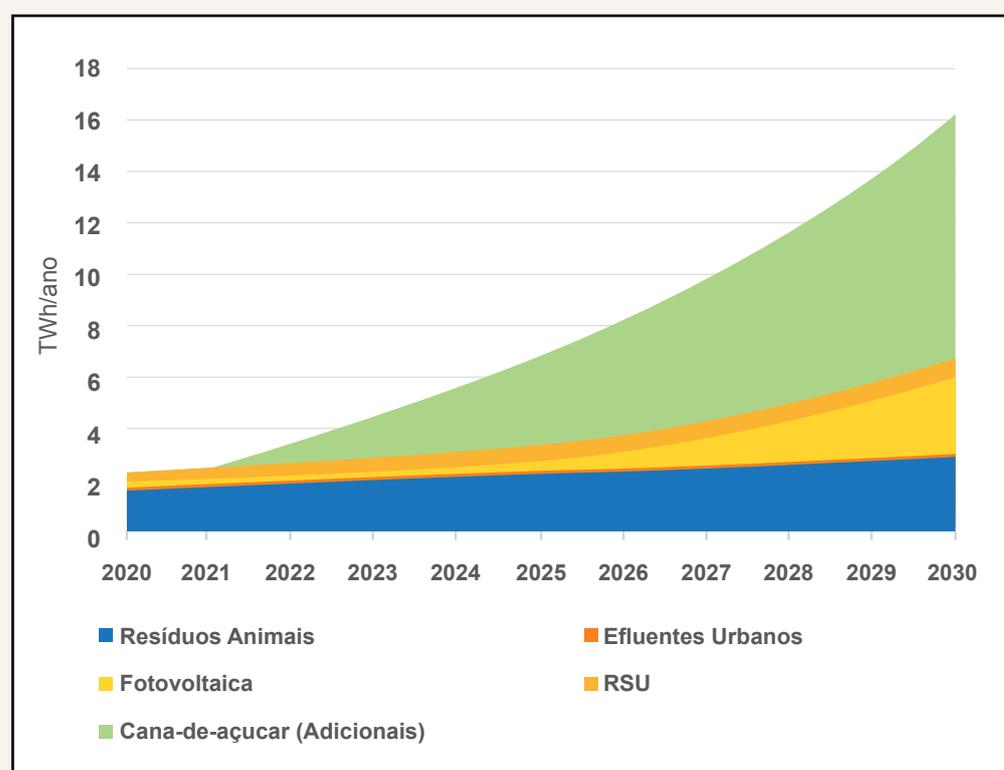


Figura 28 - Projeções de potência instalada nos estados de MT e MS. Fonte: elaborado pelos autores com bases em Coelho et al. (2012), IBGE (2019) e Aneel (2019).

No total, no ano de 2030, seriam gerados, com a introdução de fontes renováveis alternativas não hídricas na região, 15,3 TWh/ano de eletricidade, aproximadamente, equivalente ao consumo anual de 7,9 milhões de residências.

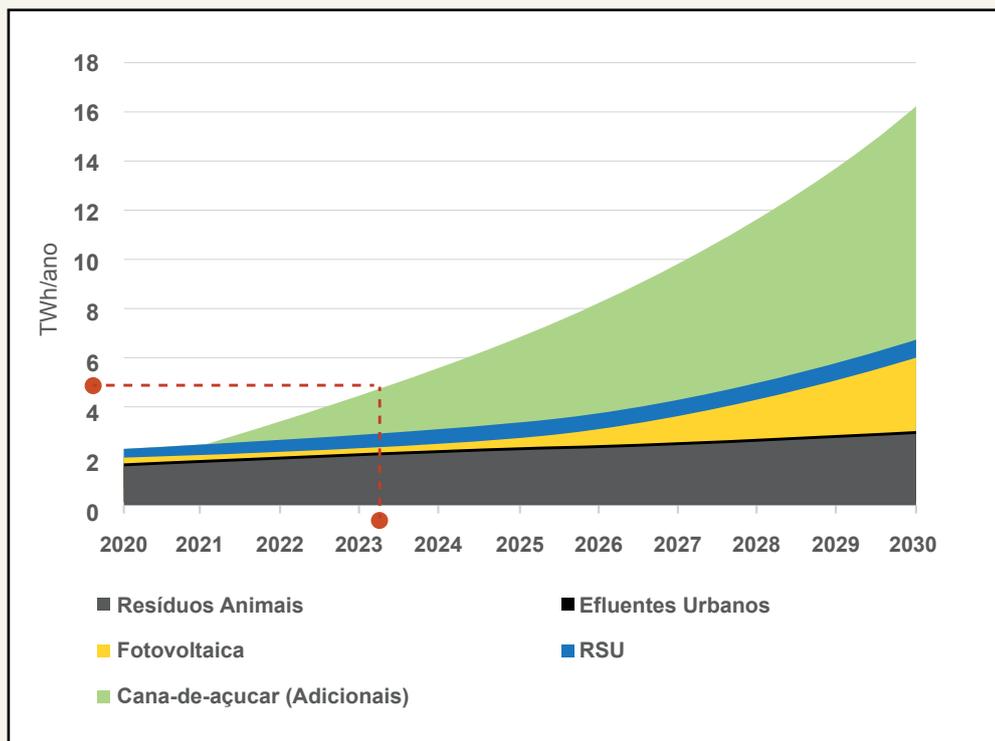


Figura 29 – Projeções de geração de eletricidade nos estados de MT e MS. Fonte: elaborado pelos autores com bases em Coelho et al. (2012), IBGE (2019) e Aneel (2019).

Considerando a entrada em operação de 100% das novas PCHs em estudo (adição de 1,172 GW na matriz energética da região CO no ano de 2023) e considerando um fator de capacidade médio de 50% para cada PCH, o potencial de geração de energia elétrica seria da ordem de 5 TWh por ano (5.000 GWh/ano), conforme visto na Figura 29, indicado pela linha tracejada em vermelho. Ou seja, a mesma quantidade de energia que seria produzida pelas novas PCHs poderia ser gerada com investimentos em fontes alternativas de energia não hídrica (solar fotovoltaica, biomassa, RSU, efluentes urbanos e resíduos animais), sem a necessidade de construir qualquer uma das PCHs planejadas. Nesse sentido, os benefícios socioambientais seriam sentidos na forma de preservação dos ecossistemas existentes sem alterar o regime hídrico da região.

O custo total médio de investimento para a implementação desses projetos alternativos de geração está estimado em R\$ 20,3 bilhões, ou seja, valor médio de cerca de R\$ 5,5 milhões por MW instalado (Tabela 5). Dados do setor de Associação Brasileira de PCHs e CGHs indicam a viabilidade econômica de projetos de PCHs com custo de investimento médio de R\$ 5,5 milhões por MW instalado (ABRAPCH, 2017). Portanto, em média, os custos de se optar por outras fontes sem represas são bastante similares aos estimados pelo setor hidrelétrico.

**NO TOTAL, NO ANO DE 2030, SERIAM GERADOS, COM A INTRODUÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS ALTERNATIVAS NÃO HÍDRICAS NA REGIÃO, 15,3 TWH/ANO DE ELETRICIDADE**

**Tabela 5 – Custos de Investimento e Investimento por MW instalado por fonte alternativa de geração. Fonte: autores**

Fontes de Geração	CAPEX (R\$ Bilhões)	MM R\$/MW
Resíduos Animais	1,6	3,8
Efluentes Urbanos	0,5	37,9
Fotovoltaica	7,6	3,7
RSU	1,3	20,3
Cana-de-açúcar (Bioeletricidade)	9,3	8,2
<b>Total</b>	<b>20,3</b>	<b>5,5</b>

**A MESMA QUANTIDADE DE ENERGIA QUE SERIA PRODUZIDA PELAS NOVAS PCHS NA REGIÃO PODERIA SER GERADA COM FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA NÃO HÍDRICA (SOLAR FOTOVOLTAICA, BIOMASSA, RSU, EFLUENTES URBANOS E RESÍDUOS ANIMAIS).**

Três importantes características desse sistema gerador alternativo devem ser destacadas. A primeira é a renovabilidade dos insumos utilizados na geração, que aproveita tanto a energia solar disponível quanto os resíduos de atividades econômicas. A segunda é a combinação da cogeração de resíduos de cana-de-açúcar e a biodigestão de dejetos animais, que compensam a intermitência horária na geração fotovoltaica, aumentando a robustez do sistema elétrico. Adicionalmente, o uso do resíduo com fins de recuperação energética permite sua destinação correta, atendendo ao marco regulatório vigente. A terceira característica importante é que essa geração se daria de forma distribuída, aumentando o nível de segurança do sistema e, potencialmente, diminuindo os custos e as perdas com a transmissão de eletricidade a longas distâncias.

Conclui-se, pelo exposto, que é possível gerar energia no Centro-Oeste de forma distribuída, atendendo a demanda de crescimento populacional e econômico da região, com bastante folga, utilizando fontes de energia renováveis e as conciliando com a vocação produtiva da região. Esse modelo de desenvolvimento energético descentralizado e adotando múltiplas fontes de energia colocaria o CO na vanguarda da geração distribuída no Brasil.

O principal destaque vai para a fonte de energia da biomassa de cana-de-açúcar, seguida pelos resíduos animais (bovino, suíno e aves), largamente disponíveis na região. Em terceiro lugar, pode-se utilizar a fonte de energia solar em usinas fotovoltaicas (geração centralizada e distribuída), que poderá suprir, no ano de 2030, toda geração de energia equivalente com as novas PCHs em estudo, só que utilizando uma área consideravelmente menor que as áreas formadas pelos lagos dos futuros reservatórios.



TRÊS IMPORTANTES CARACTERÍSTICAS DESSE SISTEMA GERADOR ALTERNATIVO DEVEM SER DESTACADAS. A PRIMEIRA É A RENOVABILIDADE DOS INSUMOS UTILIZADOS NA GERAÇÃO, QUE APROVEITA TANTO A ENERGIA SOLAR DISPONÍVEL QUANTO OS RESÍDUOS DE ATIVIDADES ECONÔMICAS.

# REFERÊNCIAS

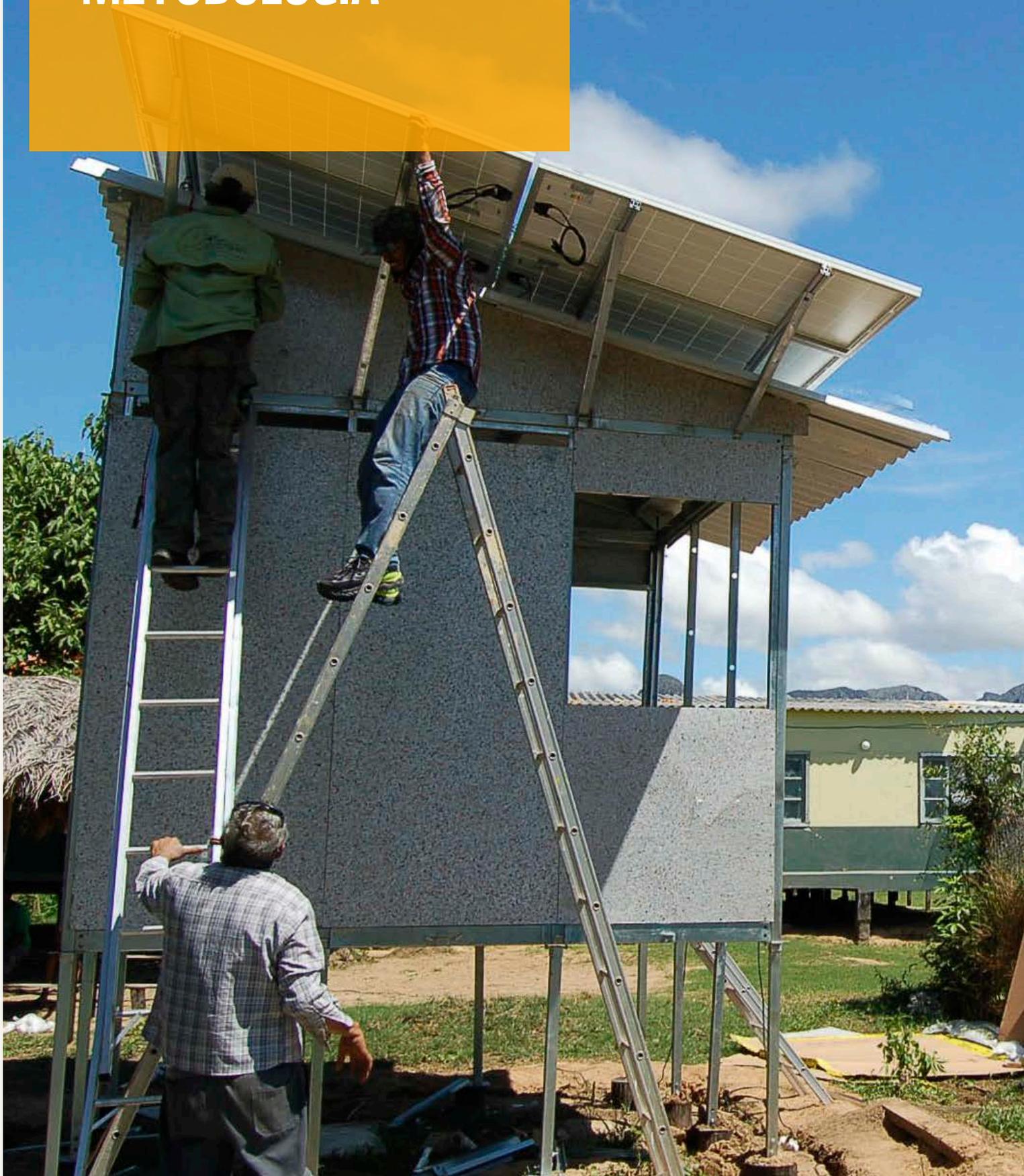




- AAGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de recursos hídricos da RH-Paraguai**. Brasília: ANA, 2018a. \_\_\_\_\_ . **Plano de recursos hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai**: Resumo Executivo. Brasília: ANA, 2018b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008. \_\_\_\_\_ . **Banco de Informações de Geração**. Brasília: ANEEL, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. Disponível em: <[http://www.mpdft.mp.br/portal/pdf/comunicacao/junho\\_2018/panoramaanexos2016.pdf](http://www.mpdft.mp.br/portal/pdf/comunicacao/junho_2018/panoramaanexos2016.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. Notícias Custo médio de PCHs e CGHs ficou em R\$ 225/MWh desde 2010, aponta estudo. **ABRAPCH**, Curitiba, 3 ago. 2017. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/2017/08/03/custo-medio-de-pchs-e-cghs-ficou-em-r-225mwh-desde-2010-aponta-estudo/>>. Acesso em: 15 out. 2019.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: Ministério das Cidades, 2015. \_\_\_\_\_ . Ministério das Cidades. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Brasília: Ministério das Cidades, 2016. \_\_\_\_\_ . Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016**. Brasília: Ministério das Cidades, 2018. \_\_\_\_\_ . Ministério das Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Brasília: MME/EPE, 2018. \_\_\_\_\_ . Ministério das Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Brasília: MME/EPE, 2018. \_\_\_\_\_ . Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil**: substratos, digestores e uso de biogás. Brasília: Ministério das Cidades, 2015. \_\_\_\_\_ . **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, [2010]. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 23 out. 2019.
- CARBOGÁS. **Dados técnicos gaseificadores**. Mauá: Carbogás, 2018. \_\_\_\_\_ . **Gaseificadores**. Mauá: Carbogás, 2019.
- CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Projeto Gaseifamaz**. São Paulo: Cenbio/IEE/USP, 2006.
- COELHO, S. T. et al. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018.
- COELHO, S.T.; MONTEIRO, M. B.; KARNIOL, M. R.; GHILARDI, A. **Atlas de Bioenergia do Brasil**. São Paulo: Cenbio, 2012.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil**. Brasília: Conab, 2011.
- DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica**: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 4<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2018. **EPE**, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 10 set. 2019.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAOSTAT. Live animals. **FAO**, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA/visualize>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

- FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE. Sugar: World Markets and Trade. **FAS/USDA**, 2019. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/sugar-world-markets-and-trade>>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- GUSSING RENEWABLE ENERGY. **Thermal Gasification**. Bangkok: GRE, 2014.
- INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE. **Biomass Gasification**. Bangalore: IISc, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Brasil em Síntese. **IBGE**, 2019c. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt.html>>. Acesso em: 24 set. 2019.
- \_\_\_\_\_. Pesquisa da Pecuária Municipal. **IBGE**, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>>. Acesso em: 5 nov. 2019.
- \_\_\_\_\_. **Produção Agrícola Municipal**. Brasília: IBGE, 2019a.
- \_\_\_\_\_. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. **IBGE**, Brasília, 2019b Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 22 out. 2019.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2018**. Masdar City: Irena, 2018.
- \_\_\_\_\_. **Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019**. Masdar City: Irena, 2019.
- MIRANDA, L. H. T. G. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: estudo de caso no município de Itanhaém-SP. São Paulo: USP, 2014.
- MOLIN, G. D., 2018. Se quiser atender demanda, Brasil terá que criar mais bois confinados. **Gazeta do Povo**. 5 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/pecuaria/bovinos/se-quiser-atender-demanda-brasil-tera-que-criar-mais-bois-confinados-czxd7r2gc9gfph453lulzhlr/>>. Acesso em: 13 set. 2019.
- MOTTA, F. S. **Produza sua energia**: biodigestores anaeróbios. Recife: Editora AS, 1986.
- NOVA CANA. Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira. **Nova Cana**, 2019. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica>>. Acesso em: 29 out. 2019.
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Emissões de GEE no Brasil de 1970 a 2016. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/08/Relatorios-SEEG-2018-Sintese-FINAL-v1.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **OECD Agriculture statistics (database)**. OECD, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/agr-data-en>>. Acesso em: 15 set. 2019.
- SANTOS, I.F.S. Dos, BARROS, R.M., TIAGO FILHO, G.L., 2016. **Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil**: An assessment of feasibility and potential. *J. Clean. Prod.* 126, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.072>
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnósticos da Situação do Saneamento no Brasil**. Brasília: SNIS, 2019.
- \_\_\_\_\_. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos** – 2017. Brasília: SNIS, 2019.
- \_\_\_\_\_. SNIS: Série Histórica. **SNIS**, 2019. Disponível em <<http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- TOMAZ, W. L., GORDONO, F. S., DA SILVA, F. P., DE CASTRO, M. D. G., ESPERIDIÃO, M., 2017. Cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar: estudo de caso múltiplo no setor sucroalcooleiro. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 19., São Paulo. Anais [...]. São Paulo, 2017.
- UNICA. Frota brasileira de autoveículos leves (ciclo Otto). **Unica**, 2019. Disponível em: <[http://www.unicadata.com.br/download\\_media.php?idM=40381136](http://www.unicadata.com.br/download_media.php?idM=40381136)>. Acesso em: 5 out. 2019.
- ZILLES, Roberto et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. (coleção aplicações da energia solar fotovoltaica).

# ANEXO: METODOLOGIA





# 1. CÁLCULO DOS POTENCIAIS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE PARA OS ESTADOS DE MT E MS

## 1.1. FOTOVOLTAICA

O cálculo do potencial de geração de eletricidade utilizando energia solar se baseou na ferramenta “Atlas Solar Global”, utilizada pelo Banco Mundial e gerida pela Solargis. A informação específica do local fornecida pelo Atlas envolve três metodologias diferentes: modelo de radiação solar, modelo de temperatura do ar e modelo de simulação de potência fotovoltaica.

A modelagem de radiação solar e temperatura do ar resulta em uma série de camadas de dados pré-calculadas que podem ser recuperadas para qualquer local no mapa global. Informações adicionais sobre o tipo de sistema FV desejado e sua configuração básica são introduzidas para a simulação da produção de energia solar, que é calculada para cada caso usando algoritmos e bancos de dados internos da Solargis e Banco Mundial.

De acordo com a metodologia adotada, os termos “recurso solar” ou “radiação solar” são substituídos por dois termos: (i) “irradiância solar”, denotando fluxo radiante (potência) por unidade de superfície, com unidade típica kW/m<sup>2</sup>; e (ii) “irradiação solar”, denotando energia ou integral de irradiação solar ao longo do tempo, com unidade típica kWh/m<sup>2</sup>.

O quadro abaixo fornece uma visão geral das informações sobre a metodologia de cálculo.

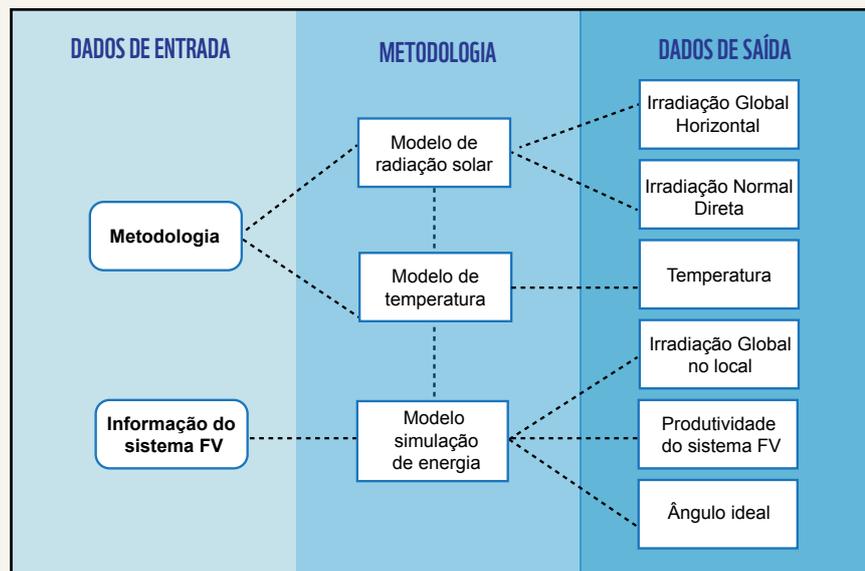


Figura 30 - Quadro com informações da metodologia de cálculo da produção de energia solar. Fonte: Solargis e Banco Mundial (2018).

**Tabela 6 - Parâmetros e características para cálculo de produção de energia solar. Fonte: Solargis e Banco Mundial (2018).**

Parâmetros	Unidades	Dados Teóricos	Sistema Pequeno	Sistema Médio	Sistema Grande
Capacidade do sistema FV	[kWp]	1	Definido pelo usuário		
Reflexão de Superfície do Módulo	-	0.16	0.16	0.16	0.16
Temperatura Nominal da Célula	[°C]	46	52	48	44
Coefficiente de temperatura da célula	[°C/W]	0.0325	0.04	0.035	0.03
Perdas do módulo por temperatura	[%/°C]	-0.45	-0.44	-0.44	-0.44
Eficiência do inversor	[%]	97.5	97.5	97.5	97.5
Perdas DC: Poluição / Neve	[%]	4.5	4.5	4	3.5
Perdas DC: Cabos	[%]	2.5	1	1.5	2
Perdas DC: Incompatibilidade	[%]	0.5	0.5	0.5	0.5
Perdas AC: Transformador	[%]	1.0	0	0	0.9
Perdas AC: Cabos	[%]	0.5	0.2	0.3	0.5
Disponibilidade	[%]	100	97	98	99

**ALÉM DA RADIAÇÃO SOLAR, A TEMPERATURA DO AR E, CONSEQUENTEMENTE, A TEMPERATURA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS, TÊM A MAIOR RELEVÂNCIA PARA A SIMULAÇÃO DE ELETRICIDADE SOLAR.**

Os métodos usados no modelo de radiação solar levam em conta os fatores de redução da radiação solar ao passar pela atmosfera até atingir a superfície do solo. Para calcular os parâmetros dos recursos solares, o modelo Solargis utiliza dados de satélites geostacionários e modelos meteorológicos.

Além da radiação solar, a temperatura do ar e, conseqüentemente, a temperatura dos módulos fotovoltaicos, têm a maior relevância para a simulação de eletricidade solar. O Atlas Solar Global trabalha com dados baseados em séries temporais de dados de temperatura do ar locais.

Os dados meteorológicos para modelos globais têm menor resolução espacial e temporal em relação aos dados modelados por recursos solares. Os dados dos modelos meteorológicos globais devem ser pós-processados para fornecer parâmetros com representação local.

Um modelo de simulação de produção de energia elétrica por um sistema fotovoltaico (FV) depende de vários fatores externos. O principal deles é a quantidade de radiação solar que cai sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos, que por sua vez depende das condições climáticas locais, bem como da montagem dos módulos etc.

#### Notas:

Se a radiação solar fosse o único parâmetro a influenciar a potência do módulo fotovoltaico, a tarefa de estimar o desempenho energético de um sistema FV a longo prazo seria reduzida a encontrar a irradiação média global no plano. No entanto, a temperatura é um componente secundário crucial.

Contudo, como a produção de energia fotovoltaica pelo Atlas Solar Global é simulada usando séries temporais de vários anos e sub-horários de radiação solar e temperatura do ar, foi considerado que o resultado é suficientemente preciso para efeito de cenário.

A produção fotovoltaica baseia-se na fase de implantação de um projeto fotovoltaico, pelo que a degradação do desempenho a longo prazo dos módulos fotovoltaicos não é considerada. Essa degradação representa em média uma perda anual de 0,4% da produção de energia, chegando a 15% em 25 anos.

OS DADOS  
METEOROLÓGICOS  
PARA MODELOS  
GLOBAIS TÊM MENOR  
RESOLUÇÃO ESPACIAL  
E TEMPORAL EM  
RELAÇÃO AOS DADOS  
MODELADOS POR  
RECURSOS SOLARES.

## 1.2. CANA-DE-AÇÚCAR

Para projetar os cenários de geração de eletricidade através da cogeração dos resíduos de cana-de-açúcar, são necessários dois componentes principais: i) a taxa de crescimento da quantidade de cana-de-açúcar produzida; e ii) a taxa de conversão de cana-de-açúcar em eletricidade. Para a primeira, utilizaram-se os dados de produção de cana-de-açúcar por estado divulgados por IBGE (2019a) e se adotou o ritmo conservador de expansão<sup>12</sup> de cerca 8% ao ano para estado de MS e cerca de 6% para MT. As projeções de capacidade de geração de eletricidade consideraram três cenários tecnológicos seguindo metodologia desenvolvida em Coelho et al. (2012):

- **Cenário A:** considera o sistema de geração com a capacidade de produzir 60 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, com operação das usinas somente durante a safra (de abril a novembro), totalizando 5.563 horas. O cálculo do potencial de geração de eletricidade seguiu a seguinte fórmula:

$$\text{Potencial (MW /ano)} = \frac{(t \text{ cana} * 60 \text{ kWh/t})}{1000 * 5563} \quad 1.2-1$$

<sup>12</sup> Entre os anos de 2000 e 2017, a quantidade de cana-de-açúcar no estado de MS cresceu em média 14% ao ano (IBGE, 2019a).

- **Cenário B:** considera o sistema de geração com a capacidade de produzir 120 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, com operação das usinas por 95% das horas do ano, totalizando 8.322 horas. Esse cenário assume a utilização de outros resíduos além do bagaço, como palha e pontas. O cálculo do potencial de geração de eletricidade seguiu a seguinte fórmula:

$$\text{Potencial (MW /ano)} = \frac{(t \text{ cana} * 120kWh/t)}{1000 * 8322} \quad 1.2-1$$

O cálculo do investimento necessário utilizou os levantamentos em MME/EPE (2018) e apresentados abaixo:

**Tabela 7 – Investimento médio para a construção de novas unidades e expansão das usinas existentes. Fonte: EPE com base em CTBE (2018) e Unica (2014).**

CAPEX	R\$ (dez. 2017)/tc
Expansão de unidades existentes ( <i>Brownfield</i> )	256,0
Novas unidades ( <i>Greenfield</i> )	359,8
Industrial (inclui cogeração otimizada)	27,6
Máquinário Agrícola (inclui caminhões)	67,9
Arrendamento (região Centro-Oeste)	4,3
Nota: Para as usinas de cana convencionais, o CAPEX foi dado por tonelada de cana, uma vez que pode haver a destinação de parte da produção para o açúcar (diferentemente do apresentado nas unidades de E2G e Etanol de milho).	
Fonte: EPE com base em CTBE (2018) e UNICA (2014)	

### 1.3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) NOS ESTADOS DE MT E MS E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

O cálculo do potencial de geração de eletricidade a partir do processamento dos resíduos sólidos urbanos considerou o uso de gaseificadores de leito fluidizados.

As projeções das quantidades de resíduos sólidos urbanos por município foram calculadas utilizando-se a seguinte fórmula:

$$QRSU = Pop * Urb * M$$

Onde:

- $QRSU$  = massa de resíduos sólidos urbanos coletados por município em toneladas por dia;

- *Pop* = as projeções populacionais calculadas pelo IBGE (2019);
- *Urb* = taxa de urbanização; foi utilizada a taxa média por estado, 81,9% em MT e 85,6% em MS;
- *M* = massa coletada *per capita* dos municípios; foi utilizada a média dos municípios da região Centro-Oeste, de 1,12 kg/hab/dia reportada por Brasil (2019).

O cálculo do potencial de geração de eletricidade considerou apenas municípios com QRSU superiores ou iguais a 45 toneladas por dia. A quantidade de energia bruta produzida e investimento médio por tamanho de usina são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Potencial de geração de eletricidade e CAPEX de usinas de gaseificação com leito fluidizado por quantidade de resíduo processado por dia.**

Usina ton/dia RSU	Energia Bruta Produzida	CAPEX
	MWh	R\$
50	0,95	28.090.000,00
100	1,89	33.920.000,00
150	2,84	47.000.000,00
200	3,78	56.000.000,00
250	4,73	66.500.000,00
300	5,67	72.000.000,00

## 1.4. TRATAMENTO DE EFLUENTES

### 1.4.1. PRODUÇÃO ANIMAL

O cálculo do potencial de geração de eletricidade utilizando dejetos de animais seguiu a metodologia desenvolvida pelo Grupo de Bioenergia da USP (GBio) na construção do *Atlas de Bioenergia do Brasil* (COELHO et al., 2012), e são apresentados nas equações

$$Q_{CH_4} = \frac{(\text{num.dias/mês} * \text{num.cabeças} * \text{Et} * \text{Pb} * \text{Conc.CH}_4)}{VE} \quad 1.4.1-1$$

e

$$Q_{CH_4} = \frac{(\text{num.cabeças} * 0,2295 * 0,60 * 1,37)}{8760} \quad 1.4.1-2$$

Os dados históricos de rebanho efetivo foram obtidos na Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2018).

A quantidade potencial de metano gerada de esterco animal segue a fórmula e utiliza os dados de referência apresentados na Tabela 9. Por utilizarem majoritariamente pecuária intensiva, foi considerado o número total de cabeças de suínos e aves obtidos (IBGE, 2018). Porém, no cálculo do potencial de bovinos, foi considerado apenas 2% do rebanho total, representando a média nacional de gado confinado.

Onde:

- $Q_{CH_4}$  = Vazão de metano por mês ( $m^3CH_4/mês$ );
- núm. de dias por mês: número de dias de tratamento do efluente (dias/mês);
- núm. de cabeças: quantidade de unidade geradora (unidade geradora);
- Et: Esterco total (kg de esterco/dia/unidade geradora);
- Pb: Produção de biogás ( $Kg_{biogás}/Kg_{esterco}$ );
- $Conc.CH_4$ : concentração de metano no biogás (%);
- VE: Volume específico do metano ( $KgCH_4/m^3CH_4$ ), sendo este igual a  $0,670 kgCH_4/m^3CH_4$ ;
- PCI (biogás – 66% metano) = Poder Calorífico Inferior do biogás com 66% de metano =  $7.260 kcal/Nm^3CH_4$ ;
- PCI (biogás – 60% metano) = Poder Calorífico Inferior do biogás com 60% de metano =  $6.600 kcal/Nm^3CH_4$ ;

No cálculo do potencial de produção de biogás dos rejeitos de aves, deve-se considerar a produção de cama de frango. Para tanto, utiliza-se a seguinte equação:

$$Q_{CH_4} = \frac{(\text{num.cabeças} * 0,2295 * 0,60 * 1,37)}{8760} \quad 1.4.1-2$$

Onde:

- $Q_{CH_4}$  = Vazão de metano por mês  $m^3CH_4/mês$ ;
- 0,2295 = média da geração de metano ( $m^3/kg$ );
- 0,60 = concentração de metano no biogás;
- 1,37 = quantidade de resíduo gerado de cama de frango (kg/ave);
- 8760 = tempo (horas/ano)

**Tabela 9 – Valores de conversão energética para diferentes tipos de dejetos. Fonte: Motta (1986).**

Animal	Estercor Total (kg-dejeto/dia/animal)	Produção de biogás (kg-biogás/kg-dejeto)	Conc. CH <sub>4</sub>	PCI biogás (kcal/Nm <sup>3</sup> )
Suínos	2,25	0,062	66%	7.260
Bovinos	10	0,037	60%	6.600
Aves	0,18	0,055	60%	6.600

O custo do investimento foi calculado de acordo com a média ponderada dos dados levantados por Coelho et al. (2018). Esses valores médios são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10- Custos de investimento nos projetos de aproveitamento energético de dejetos animais**

Item	Valor
Reator RAFA R\$/m <sup>3</sup> tratado por dia	700
Serviços e tecnologias para GD (R\$/kW)	459
Investimentos em R\$ em Grupos Geradores (R\$/kW)	3.189

### 1.4.2. EFLUENTES LÍQUIDOS URBANOS (ESGOTO SANITÁRIO)

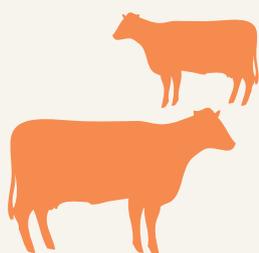
O cálculo do potencial de geração de eletricidade utilizou a metodologia desenvolvida pelo Grupo de Bioenergia da USP (GBio) na construção do *Atlas de Bioenergia do Brasil* (COELHO et al., 2012) e é apresentado nas equações

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{\phi_{\text{efl}} \cdot \text{DBO}_{\text{efl}} \cdot \eta \cdot 0,25}{0,72} \quad 1.4.1-1 \quad \text{e} \quad Q_{\text{CH}_4} = \frac{\phi_{\text{efl}} \cdot \text{DBO}_{\text{efl}} \cdot \eta \cdot 0,25}{0,72} \quad 1.4.1-1$$

Os dados históricos do volume de esgoto tratado por município foram obtidos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019b).

- Potencial de produção de metano (CH<sub>4</sub>):

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{\phi_{\text{efl}} \cdot \text{DBO}_{\text{efl}} \cdot \eta \cdot 0,25}{0,72} \quad 1.4.1-1$$



Onde:

- $Q_{CH_4}$  = metano gerado pelo tratamento anaeróbio ( $m^3/h$ );
  - $\phi_{efl}$  = vazão de efluente ( $m^3_{efl}/h$ );
  - $DBO_{efl}$  = demanda bioquímica de entrada do efluente ( $kg_{DBO}/m^3_{efluente}$ );  
 $efl) = 0,312kg_{DBO}/m^3_{efluente}$ ;
  - $\eta = \eta_{trat}$  = eficiência do tratamento (%) = 95%;
  - 0,25 = potencial de geração de metano ( $kg_{metano}/kg_{DBO}$ removida);
  - 0,72 = densidade do metano ( $kg_{metano}/m^3_{metano}$ );
- Potencial de produção de eletricidade:

$$P = \frac{Q_{Biogás} * PCI_{Biogás} * \eta_{Motor}}{860} \quad 1.4.2-2$$

Onde:

- P = potência disponível (kW);
- = vazão de biogás ( $m^3/h$ );
- PCI (Biogás – 50% metano) = Poder Calorífico Inferior do biogás com 50% de metano = 5.500 kcal/Nm<sup>3</sup> Biogás;
- $\eta_{Motor} = 0,38$  = eficiência de motores;
- 860 = fator de conversão de kcal/h para kW;

Para o cálculo do CAPEX, foi utilizado o valor de referência de R\$8.975.802,00 para cada 100.000 habitantes, estimado por Brasil (2016).









# ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS RENOVÁVEIS NA BACIA DO ALTO PARAGUAI (BAP)

## 15,3 TWH/ANO DE ELETRICIDADE

podem ser gerados no total em 2030 com o uso de fontes alternativas de energia limpa. Isso significa abastecer quase 8 milhões de residências a mais – e sem a criação de novas hidrelétricas.

## 4,3% DO BRASIL

é o espaço ocupado pela região da bacia do Alto Paraguai, que está localizada nos estados de MT e MS

## R\$1,57 BILHÃO

é o investimento estimado para gerar uma capacidade instalada de 410 MW de biogás até 2030, possibilitando gerar cerca de 3 TWh por ano e atender de 1,5 milhão de residências.

## SEGUNDO PRODUTOR MUNDIAL

de cana-de-açúcar, o Brasil produziu na safra 2018/2019 29,5 milhões de toneladas, ficando atrás somente da Índia.



### Por que estamos aqui

Parar a degradação do meio ambiente no Planeta e construir um futuro no qual os seres humanos vivam em harmonia com a natureza  
[www.wwf.org.br](http://www.wwf.org.br)