

**NILO AMARAL MARTIN**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SUPRIMENTO ENERGÉTICO A  
PARTIR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS, PARA MUNICÍPIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Sorocaba PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em  
2021

ciências  
ambientais

**NILO AMARAL MARTIN**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SUPRIMENTO ENERGÉTICO A  
PARTIR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS, PARA MUNICÍPIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Antonio César Germano Martins

Sorocaba

2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências  
ambientais



M382a Martin, Nilo Amaral  
Avaliação do potencial de suprimento energético a partir de energia fotovoltaica e resíduos sólidos urbanos, para municípios do estado de São Paulo / Nilo Amaral Martin. -- Sorocaba, 2021  
96 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba  
Orientador: Antonio Cesar Germano Martins

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia Fontes alternativas. 3. Geração distribuída de energia elétrica. 4. Gestão de resíduos sólidos. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA TESE: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SUPRIMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS, PARA MUNICÍPIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO**

**AUTOR: NILO AMARAL MARTIN**

**ORIENTADOR: ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

Prof. Dr. LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA (Participação Virtual)  
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA (Participação Virtual)  
- / Unesp - Campus de São João da Boa Vista

Prof. Dr. JOÃO LÚCIO DE BARROS (Participação Virtual)  
IFSP - Sorocaba

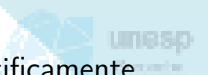
Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO (Participação Virtual)  
Engenharia de Energia / Unesp - Campus Experimental de Rosana

Sorocaba, 05 de agosto de 2021

Nestes tempos em que, no Brasil, acredita-se que fatos e resultados cientificamente fundamentados podem ser refutados com opiniões pessoais, dedico este trabalho a todos os cientistas do nosso país.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em:

ciências ambientais



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte deste processo, de forma direta ou indireta, pois sem eles nada disso teria sido possível: docentes e discentes e servidores técnico-administrativos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, em especial ao Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda e ao Prof. Dr. Henrique Ewbank, cujos conhecimentos transmitidos de forma motivada e cativante foram essenciais na construção deste trabalho, ao meu orientador Prof. Dr. Antonio César Germano Martins e à minha família.

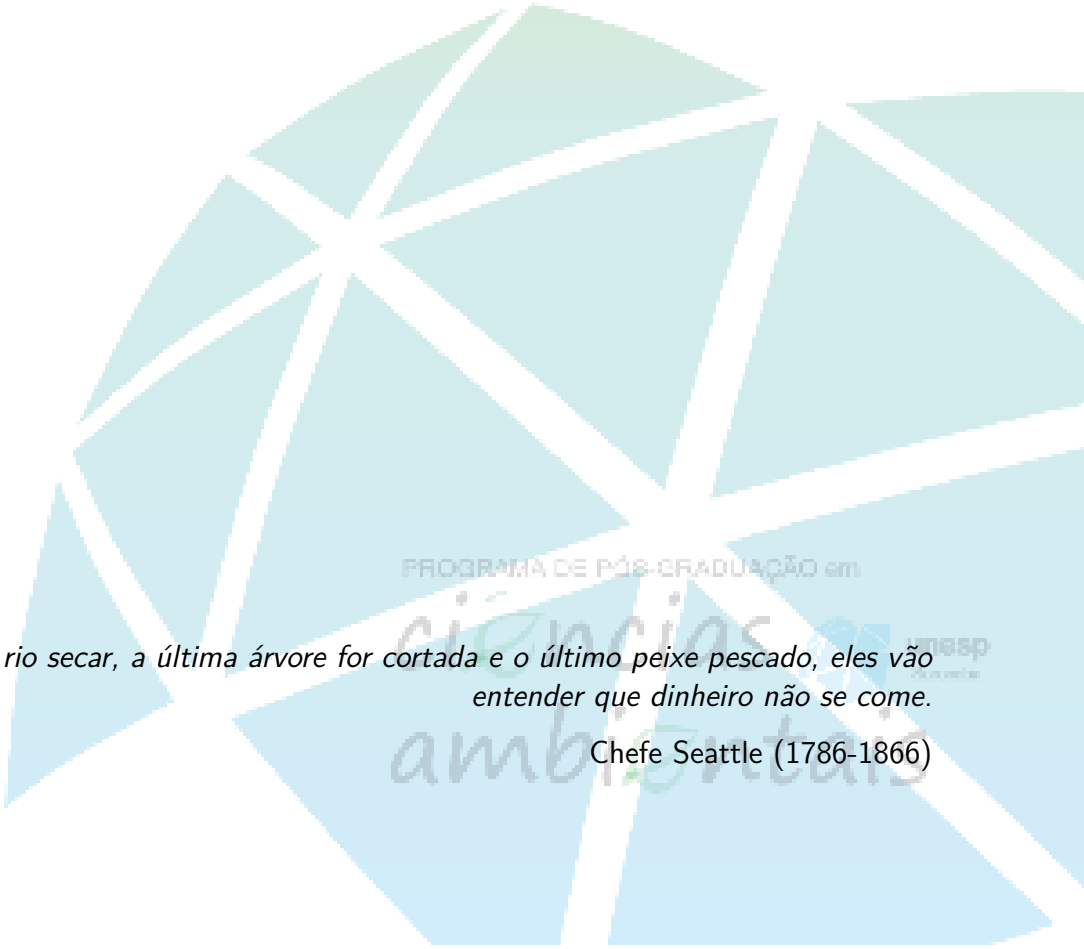
Agradeço ao meu orientador e amigo prof. dr. Antonio César Germano Martins pela confiança, parceria incondicional e por sempre estar disponível e disposto a avaliar e questionar as direções a serem tomadas neste trabalho, tornando-o sem dúvidas mais consistente, coerente e fundamentado. Agradeço também pelos exemplos e pelo conhecimento generosamente compartilhado em diversos momentos, tanto dentro da sala de aula quanto fora dela.

Agradeço à minha família pelo suporte, de valor imensurável principalmente nos últimos tempos de isolamento social: à minha mãe Ana Silvia M. Amaral Generoso e ao meu pai Carlos Roberto A. Martin (em memória) pelos valores ensinados ao longo da minha vida, essenciais para eu chegar até aqui; aos amigos e avós dos meus filhos Francisco C. Generoso (marido da minha mãe) e Silvio J. Morelli (companheiro do meu pai) por se fazerem sempre presentes; à minha companheira Juliana Alves Fernandes por dividir a vida comigo e por ser a incrível mãe dos meus dois filhos João Fernandes Martin e Nina Fernandes Martin, que me motivam e me ensinam a ser uma pessoa melhor a cada dia. Sem eles eu nem sonharia em estar escrevendo estas palavras.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências  
ambientais





*Quando o último rio secar, a última árvore for cortada e o último peixe pescado, eles vão entender que dinheiro não se come.*

Chefe Seattle (1786-1866)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências ambientais

unesp

## RESUMO

O consumo de energia tem aumentado juntamente ao crescimento populacional, e os impactos causados em função da geração de energia vêm sendo amplamente discutidos sob o ponto de vista de suas consequências ambientais. Este trabalho propõe um modelo de geração de energia elétrica em que as cidades passem a ser centros geradores de energia elétrica, diminuindo a dependência externa e conseqüentemente diminuindo as perdas referentes ao transporte, aos custos com transformadores de alta-tensão e às falhas de fornecimento. Para isso, desenvolveu-se uma metodologia capaz de estimar o potencial de geração e suprimento de consumo de energia elétrica a partir de fontes alternativas sustentáveis, sendo elas a energia fotovoltaica e os resíduos sólidos urbanos (RSU). Para tanto foi construída uma base de dados de consumo de energia elétrica, número de habitantes, massa coletada de RSU irradiação solar e potencial de geração e suprimento de energia elétrica para um conjunto definido de municípios do Estado de São Paulo. A partir dessa base de dados foram feitos estudos da relação entre o comportamento do consumo de energia, da massa coletada de RSU e da população das localidades estudadas. Foram também realizados estudos do perfil de irradiação solar observada. Todos os dados utilizados são livres, e disponibilizados por entidades governamentais e/ou de pesquisa públicas, em nível municipal, estadual ou nacional. Para avaliar a viabilidade de implementação do modelo proposto foram utilizados municípios pertencentes a diferentes faixas populacionais do interior do estado de São Paulo. Os resultados indicam que a geração e o suprimento de consumo de energia elétrica pelas fontes consideradas é factível, mostrando uma alternativa sustentável para geração de energia e destinação dos RSU. Com relação à geração fotovoltaica, observou-se que em todos os casos o consumo observado em períodos de Sol poderia ser suprido. Observou-se municípios com potencial de suprimento de até 33,7% de todo o consumo de energia elétrica estimado nos períodos sem incidência de luz solar a partir dos resíduos sólidos urbanos. Esses resultados indicam que há a possibilidade de uma menor dependência da geração centralizada, e podem fomentar argumentos para a implementação de políticas nacionais de energia, contribuindo para a descentralização da geração nos municípios.

**Palavras-chave:** Geração de energia fotovoltaica; energia fontes alternativas; geração distribuída de energia elétrica; gestão de resíduos sólidos; desenvolvimento sustentável.

## ABSTRACT

Energy consumption has been raising together with populational growth, and the energy production consequences have been widely discussed under their environmental outcome aspect. This work proposes a model of electricity generation in which cities become electricity generating centers, reducing external dependence and, consequently, reducing losses related to transport, costs with high voltage transformers and power outages. To do so, a methodology capable of estimating the potential for generating and supplying electricity from sustainable alternative sources, namely photovoltaic energy and municipal solid waste (MSW), was developed. For this purpose, a database of electricity consumption, number of inhabitants, collected mass of MSW, solar irradiation and potential for generating and supplying electricity for a defined set of municipalities in the State of São Paulo was built. From this database, studies were carried out on the relationship between the behavior of energy consumption, the collected mass of MSW and the population of the studied locations. Studies of the observed solar irradiation profile were also carried out. All data used is free and made available by government agencies and/or public research at the municipal, state or national level. To assess the feasibility of the proposed model, municipalities belonging to different population groups São Paulo state were used. The results indicate that the generation and supply of electricity by the considered sources is feasible, showing a sustainable alternative for energy generation and MSW disposal. In relation to photovoltaic generation, it was observed that in all cases the consumption during sunny periods could be supplied. Municipalities with supply potential of up to 33,7 % of all estimated electricity consumption in periods without sunlight were observed from urban solid waste. These results indicate that there is a possibility of dependence reduction on centralized generation, and may encourage arguments for the development of national energy policies, focused on decentralization of generation in municipalities.

**Keywords:** Photovoltaic energy generation; energy alternative sources; distributed electric energy generation; solid waste management; sustainable development.

## LISTA DE FIGURAS

1	Produção elétrica mundial por fonte, por ano, e parcela proveniente de fontes renováveis, no período 2010 – 2020. . . . .	17
2	Contribuição das fontes renováveis e não renováveis na capacidade total instalada no mundo por ano, no período 2010 – 2020. . . . .	18
3	Valor estimado de subsídios <i>per capita</i> , por país, em dólares U\$D, para uso de combustíveis fósseis no ano de 2017. . . . .	19
4	Evolução do parque gerador brasileiro, em nova capacidade instalada por ano, no período de 1975 – 2014. . . . .	22
5	Quantidade de energia gerada por fonte e contribuição da energia hidrelétrica na matriz brasileira. Os círculos brancos representam a porcentagem de contribuição da energia hidrelétrica no total gerado. . . . .	23
6	Evolução da oferta de bioeletricidade, em TWh, e evolução da participação da bioeletricidade na geração total, de 1970 a 2014, no Brasil. . . . .	26
7	Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil, em MW, no período de 2010 a 2020. . . . .	29
8	Evolução da porcentagem do investimento em energia eólica no Brasil, com relação ao total investido em energias renováveis, de 2010 a 2020. . . . .	29
9	DEC – Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora no Brasil. A curva em verde indica o limite máximo dos valores definido pela ANEEL e as barras indicam os valores observados no respectivo ano. . . .	32
10	FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora no Brasil. A curva em verde indica o limite máximo dos valores definido pela ANEEL e as barras indicam os valores observados no respectivo ano. . . .	32
11	Potência instalada de empreendimentos de geração distribuída de energia, no período 2015–2020. . . . .	33
12	Produção elétrica de empreendimentos de geração distribuída de energia, no período 2015–2020. . . . .	34
13	Produção elétrica total e solar de empreendimentos de geração distribuída de energia, no período 2017–2020. . . . .	34

14	Localização de plantas WTE no mundo. . . . .	37
15	Sistema genérico WTE baseado em conversão térmica. . . . .	38
16	Esquema de funcionamento de uma planta WTE. . . . .	38
17	Ângulos $\beta$ e $Z_S$ , de inclinação e azimutal da superfície do painel, respectivamente. . . . .	44
18	Ângulos $\alpha$ e $Z$ , que descrevem a trajetória do Sol. . . . .	45
19	Ilustração dos parâmetros solares $L$ , $\delta$ e $h$ . . . . .	46
20	Exemplo de amostra de imagem para estimar a área de telhados. . . . .	49
21	Resultado, em branco, da segmentação dos pixels de telhados na imagem da Figura 20, tomada como exemplo. . . . .	50
22	Sistema de coordenadas esféricas. . . . .	52
23	Projeção ortogonal do vetor $\vec{v}$ sobre o vetor $\vec{u}$ , indicada por $\vec{v}_1$ . . . . .	54
24	Curva de carga típica de consumidores residenciais na faixa de baixa tensão da CPFL. . . . .	56
25	Trajетória do Sol no dia médio de cada mês do ano, para o município de Sorocaba. . . . .	61
26	Irradiação mensal média em kWh/m <sup>2</sup> para os municípios estudados. . . . .	63
27	Médias diárias das projeções de $\vec{s}$ sobre $\vec{n}$ em função de $Z_S$ para cada mês, no município de Sorocaba. . . . .	65
28	Valores de $H_m^k$ para cada município estudado. . . . .	66
29	Potencial de geração fotovoltaica para cada município, dado em GWh. . . . .	67
30	Potencial de geração fotovoltaica para Águas de São Pedro e Águas de Lindóia, dado em GWh. . . . .	68
31	Gráficos de $H_m^k$ e $I_m^k$ para os municípios de Ribeirão Preto e Guarulhos. . . . .	69
32	Consumo observado nos períodos de Sol por mês, para cada município, dado em GWh. . . . .	70
33	Consumo observado nos períodos de Sol por mês, para os municípios de Águas de São Pedro e Águas de Lindóia, dado em GWh. . . . .	70
34	Potencial de suprimento fotovoltaico mensal para cada município, em porcentagem (%). . . . .	71
35	Diagrama de dispersão para as variáveis Energia Consumida e Número de Habitantes. . . . .	72
36	Diagrama de dispersão para as variáveis Energia Consumida e Área de Telhados. . . . .	73
37	Potencial de suprimento fotovoltaico anual para cada município, em porcentagem (%). . . . .	76

38	Reta obtida pela regressão linear a partir dos dados de massa coletada e consumo de energia, para o ano de 2019. . . . .	83
39	Relação entre o número de habitantes com a massa coletada e com o consumo de energia, para o ano de 2019. . . . .	85
40	Reta obtida pela regressão linear a partir dos dados obtidos de energia gerada em potencial, a partir dos RSU, e número de habitantes, para 2019.	86
41	Relação entre o número de habitantes, energia produzida em potencial e o consumo de energia no período sem Sol, para o ano de 2019. . . . .	87
42	Potencial de suprimento energético a partir de RSU para os municípios estudados, no ano de 2019. . . . .	89

## LISTA DE TABELAS

1	Fontes para geração de bioeletricidade, potência gerada, porcentagem de contribuição e número de instalações por fonte no Brasil em 2021. . . . .	25
2	Geração elétrica no Brasil no período 2017-2020, considerando as fontes abordadas. . . . .	30
3	Total de empreendimentos instalados em geração distribuída por fonte, por ano, e porcentagem da fonte em relação ao total. . . . .	35
4	Potência instalada em geração distribuída, em cada fonte, por ano, e porcentagem da fonte em relação ao total. . . . .	35
5	Municípios avaliados no estudo. . . . .	43
6	Data e dia médio recomendado para cada mês. . . . .	46
7	Base de dados utilizada para a realização das estimativas de geração e suprimento fotovoltaicos. . . . .	60
8	Data, dia médio recomendado para cada mês e respectiva declinação. . . .	61
9	Valores de área, área urbanizada, proporção média de telhados e área estimada de telhados para os municípios estudados. . . . .	62
10	Valores irradiação mensal média, em kWh/m <sup>2</sup> para os municípios estudados.	64
11	Áreas de telhado estimadas para cada município, em ordem decrescente. . .	68
12	Parâmetros estatísticos obtidos da análise das variáveis Energia Consumida e Número de Habitantes. . . . .	72
13	Parâmetros estatísticos obtidos da análise das variáveis Energia Consumida e e Área de Telhados. . . . .	73
14	Valores de área de telhados, consumo de energia elétrica e número de habitantes, ordenados de forma decrescente por área de telhados. . . . .	74
15	Potencial de geração fotovoltaica e consumo anuais nos períodos de Sol, em kWh, e ordenados de forma decrescente por potencial de geração, para cada município estudado. . . . .	75

16	Potencial anual de suprimento energético, em porcentagem (%), para os municípios estudados. . . . .	75
17	TPBE em anos e EGE em toneladas de CO <sub>2</sub> . . . . .	77
18	Municípios estudados, número de habitantes, consumo anual de energia e massa de RSU coletada para o ano de 2019. . . . .	82
19	Parâmetros estatísticos obtidos da análise da regressão das variáveis massa coletada e energia consumida. . . . .	84
20	Parâmetros estatísticos obtidos da análise das variáveis energia gerada em potencial e número de habitantes. . . . .	86
21	Potencial de suprimento energético a partir de RSU para os municípios estudados, para 2019. . . . .	88
22	Estimativas de custos de instalação e de manutenção e funcionamento de plantas WTE, em milhões de dólares. . . . .	89

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
2.1	GERAÇÃO HIDRELÉTRICA . . . . .	21
2.2	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA . . . . .	23
2.3	BIOELETRICIDADE . . . . .	24
2.4	ENERGIA EÓLICA . . . . .	27
2.5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, SMART GRIDS E GERAÇÃO VIA RSU . . . . .	29
<b>3</b>	<b>VISÃO GERAL E OBJETIVOS</b>	<b>40</b>
3.1	VISÃO GERAL . . . . .	40
3.2	OBJETIVO GERAL . . . . .	41
3.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	41
<b>4</b>	<b>GERAÇÃO FOTOVOLTAICA</b>	<b>42</b>
4.1	INTRODUÇÃO . . . . .	42
4.2	METODOLOGIA . . . . .	43
4.2.1	ORIENTAÇÃO DOS PAINÉIS . . . . .	43
4.2.2	POSIÇÃO DO SOL . . . . .	44
4.2.3	ÁREA DISPONÍVEL EM TELHADOS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO . . . . .	48
4.2.4	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E POTENCIAL DE SUPRIMENTO . . . . .	51
4.2.5	TEMPO DE PAYBACK ENERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES ESTUFA . . . . .	58

4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	60
4.3.1	POSIÇÃO DO SOL . . . . .	60
4.3.2	ÁREA DISPONÍVEL PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS . . . . .	62
4.3.3	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E POTENCIAL DE SUPRIMENTO . . . . .	63
4.3.4	TEMPO DE PAYBACK ENERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES ESTUFA . . . . .	74
4.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO . . . . .	77
<b>5</b>	<b>GERAÇÃO A PARTIR DE RSU</b>	<b>79</b>
5.1	INTRODUÇÃO . . . . .	79
5.2	METODOLOGIA . . . . .	79
5.2.1	POTENCIAL DE GERAÇÃO . . . . .	79
5.2.2	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO . . . . .	81
5.3	RESULTADOS . . . . .	82
5.3.1	POTENCIAL DE GERAÇÃO . . . . .	82
5.3.2	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO . . . . .	88
5.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO . . . . .	88
<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES E CONCLUSÕES</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>94</b>

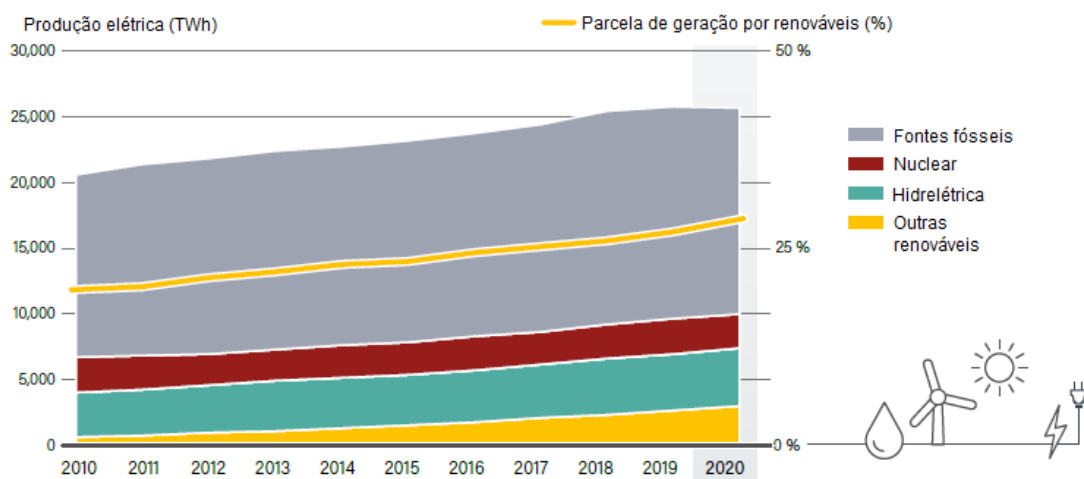
## 1. INTRODUÇÃO

No ano de 2021, em que começam a surgir indícios do início do fim da pandemia de COVID-19 principalmente devido à vacinação em massa, alguns dados mundiais associados ao crescimento econômico, demanda de energia e emissões de gases estufa voltam a mostrar uma tendência de crescimento. De fato, neste ano, a previsão é de que o PIB mundial cresça 6%, comparado a uma queda de 3,5% em 2020 e a um crescimento de pouco menos de 3% em 2019. A demanda de energia no mundo deve crescer 4,6% – 0,5% acima do crescimento observado em 2019 –, enquanto que em 2020 observou-se uma queda de 4%. Com relação às emissões, espera-se um aumento de 4,8% – o segundo maior já observado de um ano para outro – seguindo uma queda de quase 5,8% em 2020 e de crescimento praticamente nulo em 2019<sup>1</sup>. (IEA, 2021).

Com o objetivo de reduzir os aspectos resultantes da geração de energia por combustíveis fósseis, dentre eles a emissão de gases poluentes, estes vem sendo amplamente discutidos à luz de suas consequências ambientais. Uma resposta que emerge daí é a geração por fontes renováveis menos poluentes.

Estas fontes representaram 29% de toda a energia elétrica gerada no mundo ao final de 2020 (REN21, 2021). Além disso, durante o mesmo ano, os aumentos na capacidade instalada para energia renovável foram maiores do que nas capacidades instaladas para geração por combustíveis fósseis e nucleares combinadas, fato ocorrido desde 2015 (REN21, 2021). Importante destacar que tal situação vem se consolidando devido a políticas de incentivo à utilização de energias renováveis, aliadas aos avanços científicos e tecnológicos neste sentido. Tais avanços, por sua vez, resultam também em menores custos do ponto de vista financeiro. A Figura 1 mostra a evolução da produção elétrica mundial por fonte e a parcela de contribuição das renováveis, no período 2010 – 2020.

**Figura 1:** Produção elétrica mundial por fonte, por ano, e parcela proveniente de fontes renováveis, no período 2010 – 2020.



Fonte: Adaptado de REN21 (2021).

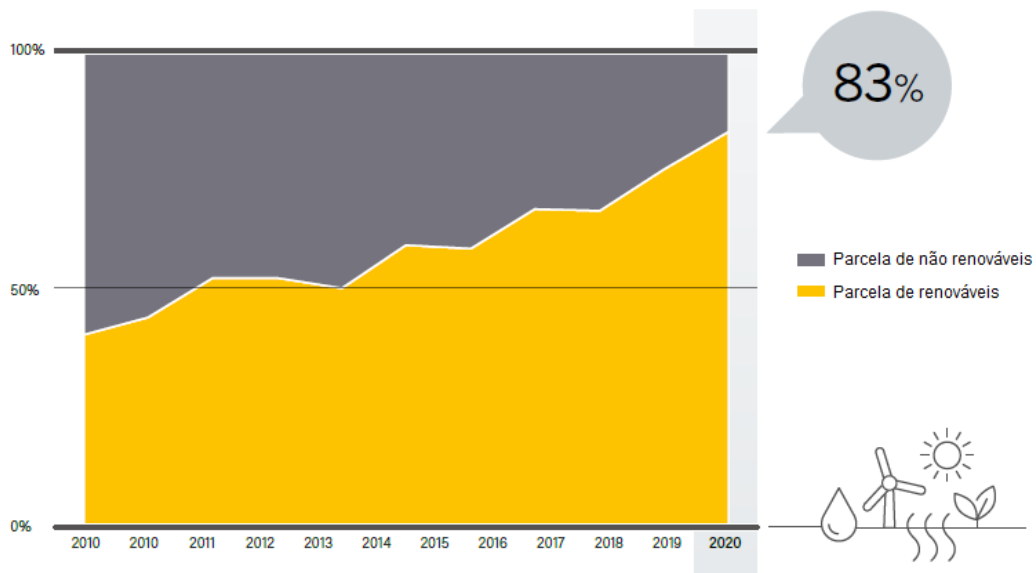
Estima-se que o investimento total em energia renovável tenha sido de 303,5 bilhões

<sup>1</sup>As emissões aumentaram 1,8% de 2018 para 2019.

de dólares em 2020, implicando em um valor mais de duas vezes maior que o investimento na geração termelétrica via carvão, gás e nuclear. Para se ter uma ideia, do investimento total em energia renovável em 2018, 53% foram oriundos de economias emergentes em desenvolvimento (REN21, 2019, 2021).

Ainda do ponto de vista mundial, tem-se que atualmente em torno de um terço da capacidade total instalada para geração de energia utiliza de fontes renováveis e, além disso, 83% das instalações realizadas no ano de 2020 são voltadas também para a utilização de tal tipo de fonte, implicando numa proporção superior a 50% desde 2011. O crescimento da capacidade instalada para geração por fontes renováveis durante o primeiro ano da pandemia de COVID-19 (10%) foi o maior já observado (REN21, 2021). A Figura 2 ilustra a evolução da parcela de contribuição das fontes renováveis na capacidade total instalada no mundo, no período entre os anos de 2010 e 2020.

**Figura 2:** Contribuição das fontes renováveis e não renováveis na capacidade total instalada no mundo por ano, no período 2010 – 2020.



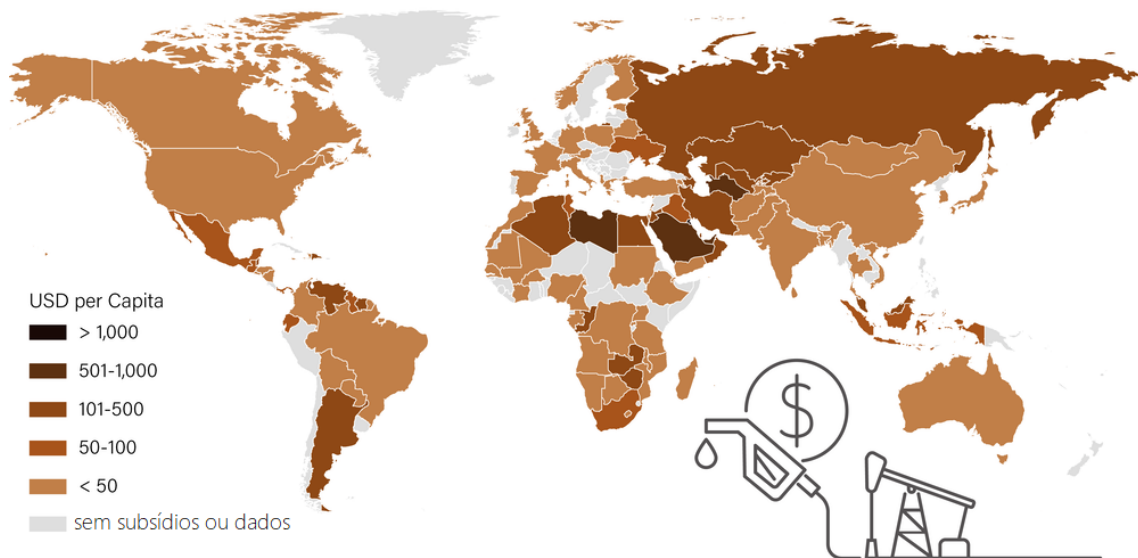
Fonte: Adaptado de REN21 (2021).

Por outro lado, além do evidente cenário de crescimento da utilização e de aumento nos investimentos associados às fontes renováveis, é importante também levar em conta o cenário que abrange as fontes fósseis de geração de energia. Os subsídios<sup>2</sup>, em nível mundial, para consumo de combustíveis fósseis foram estimados na faixa dos 500 bilhões de dólares nos anos de 2019 e 2020 – perto do dobro do valor dos subsídios para geração de energia por fontes renováveis –, tendo sido estimados em 300 bilhões de dólares em 2017 e em 270 bilhões de dólares em 2016 e, mesmo levando em conta a adesão de diferentes países a mudanças nas políticas de subsídios para uso de combustíveis fósseis, ainda não se observa reduções significativas em tais valores (REN21, 2021; MERRILL; GERASIMCHUK; SANCHEZ, 2017). No Brasil, observou-se menos de 50 U\$D per capita em subsídios no período.

<sup>2</sup>Subsídios podem ser definidos como políticas voltadas à redução de custos de produção ou de consumo de determinado bem. Neste contexto, as estimativas associam-se a subsídios para o consumo de combustíveis fósseis.

A Figura 3 mostra o valor de subsídios *per capita*, por países e em dólares, para uso de combustíveis fósseis no ano de 2017. Nota-se que tais subsídios existiam, em escala significativa, em grande parte deles. Este cenário ainda se mantém atualmente. Além do mais, os preços baixos dos combustíveis ainda os mantêm competitivos no mercado, independentemente de subsídios, implicando em um obstáculo significativo para a expansão da utilização das fontes renováveis (REN21, 2019, 2021).

**Figura 3:** Valor estimado de subsídios *per capita*, por país, em dólares U\$D, para uso de combustíveis fósseis no ano de 2017.



Fonte: Adaptado de REN21 (2019).

Tendo em vista este cenário, fica evidente a existência de um espaço para crescimento e consolidação do uso de fontes renováveis na geração de energia em nível mundial. Para que isso ocorra são necessários investimentos consistentes e contínuos em pesquisa e desenvolvimento, principalmente no que diz respeito a tecnologias associadas à geração a partir dessas fontes e a aplicações práticas dessas tecnologias, criando-se assim um contexto cada vez mais favorável de uso, e investimento, da energia renovável.

Além do mais, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu os chamados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que consistem em 17 objetivos a serem alcançados até 2030 que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo, numa ação global conjunta para “acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade” (ONU, 2021).

Especificamente, o ODS número 7 trata da energia acessível e limpa, definindo metas a serem atingidas de forma a garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos (ONU, 2021):

1. assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos;
  - (a) assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia;

- (b) aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global;
- (c) dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética:
  - i. facilitar o acesso a pesquisa e a tecnologias de energia limpa e renovável, de eficiência energética, e de combustíveis fósseis;
  - ii. promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa;
  - iii. expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento.

Das diferentes formas de uso da energia na sociedade atual será aqui abordado o uso da energia elétrica no Brasil. No país, tem-se que em 2020 a matriz de energia elétrica tinha composição de 65,2% por hidrelétrica, 24,3% por termelétrica – incluindo a energia obtida pela combustão de combustível fóssil, biomassa e nuclear –, 8,8% por eólica, 1,7% por fonte solar (BRASIL, 2021b). Nota-se, também no contexto nacional, um potencial considerável para exploração das fontes renováveis, com exceção da hidrelétrica que já é consolidada e vem apresentando ritmo de exploração decrescente.

Neste sentido, tem sido observado um aumento gradual na diversificação da matriz elétrica nacional, com diminuição na proporção de utilização da hidrelétrica e da gerada por combustíveis fósseis, por meio de uma maior utilização de outras formas, renováveis, sustentáveis e limpas.

Deste modo o presente trabalho propõe uma metodologia que possibilita a análise do potencial de geração e suprimento de energia elétrica, em nível municipal, a partir de fontes alternativas sustentáveis e renováveis, sendo elas a irradiação solar e os resíduos sólidos urbanos (RSU). Tais aspectos serão avaliados sob o ponto de vista de uma menor dependência dos municípios com relação à geração centralizada, de modo que haja uma maior segurança no suprimento da demanda de energia elétrica dos mesmos, além de apresentar uma alternativa ao gerenciamento dos RSU. Será também levada em conta a hierarquia abordada na gestão e no tratamento dos RSU, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

A utilização da energia hidrelétrica no Brasil iniciou-se no fim do século XIX, em localizações próximas a regiões urbanas e com geração local. Já na década de 1950, na qual predominava um pensamento progressista no país, deu-se início a um processo de mais intensa exploração do potencial hidrelétrico brasileiro com a implementação de projetos do governo federal (TOLMASQUIM, 2016). Nas duas décadas seguintes a utilização desta forma de energia continuou aumentando até que, na década de 1980, observou-se um aumento significativo devido às importantes alterações no preço do petróleo ocorridas na década anterior, impactando diretamente no custo dos combustíveis fósseis originários do óleo (BRASIL, 2007).

A partir da consolidação do processo de exploração da energia hidrelétrica, ocorrido em meados da década de 1970, emergiu um contexto no qual a capacidade instalada para geração de energia elétrica mostrava-se sempre superior à demanda. Tal cenário perdurou até a metade da década seguinte, momento no qual as expansões na capacidade de geração de energia elétrica, até então em sua maioria hidrelétricas, passaram a ser menos intensas. Por outro lado a demanda continuou crescendo e, em conjunto com fatores climáticos não favoráveis, surgia no horizonte um cenário de crise energética nacional (TOLMASQUIM, 2016; BRASIL, 2007).

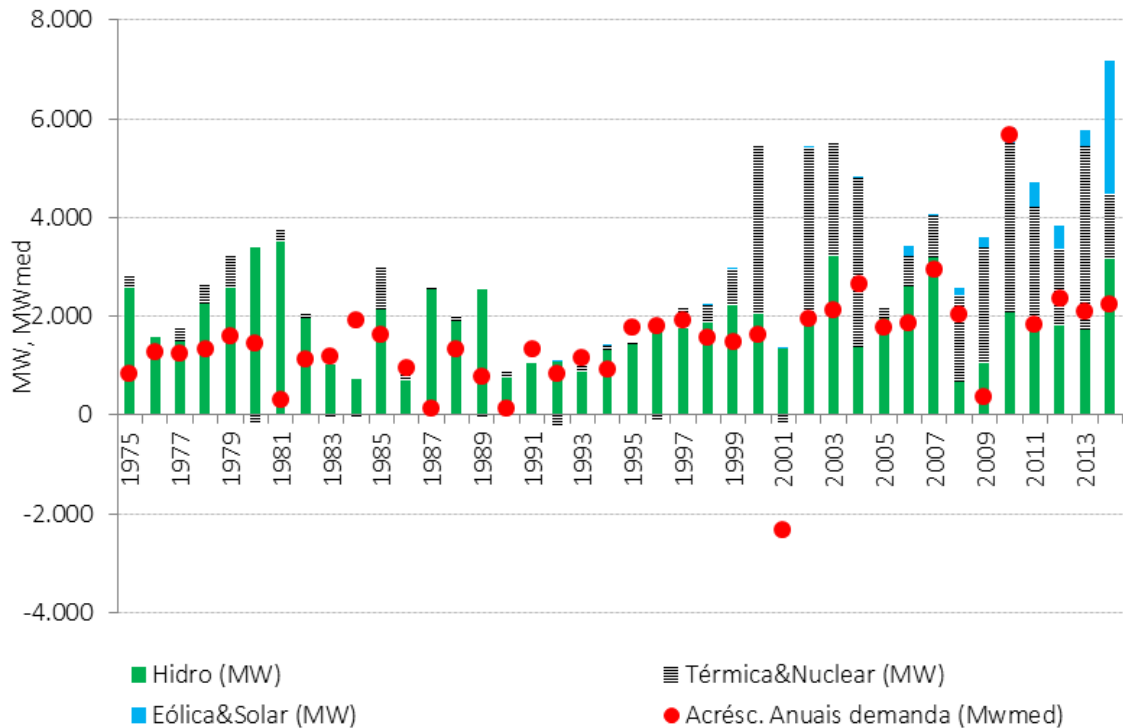
Na década de 1990 o governo federal passa a concentrar esforços na construção de usinas termelétricas, movidas tanto a gás natural quanto a óleo combustível, tendo como objetivo garantir um meio emergencial de geração elétrica (TOLMASQUIM, 2016). Os dados associados a este cenário são ilustrados na Figura 4, onde pode-se notar que a partir do final da década de 1990 a contribuição de fontes de energia diferentes da hidrelétrica começou a se tornar mais significativa a cada ano, num sentido inverso ao da própria energia hidrelétrica.

Com isso fica clara uma tendência de se desvincular a maioria da capacidade de geração instalada no Brasil da geração hidrelétrica e assim no ano de 2004 é implantado um novo modelo para o setor energético através das leis número 10.847 e número 10.848, que autorizam a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e dispõem sobre a comercialização de energia elétrica no país (BRASIL, 2004a, 2004b).

No final da década de 2000 nota-se uma queda na contribuição da energia hidrelétrica na geração de energia nacional. Um dos pontos associados a tal queda é o fato de que, na região Sudeste do país, ocorre um esgotamento quase completo do potencial hidrelétrico, sendo que as expansões nos empreendimentos de exploração deste tipo de fonte passaram a se dar predominantemente na região Norte (GOLDEMBERG, 2015). Além disso, tais empreendimentos passam a ser construídos, em sua maioria, de modo que não utilizem de grandes reservatórios de água, com o objetivo de reduzir os impactos tanto ambientais quanto sociais causados pelo alagamento de grandes áreas na construção de grandes reservatórios (TOLMASQUIM, 2016; PEREIRA et al., 2017; GOLDEMBERG, 2015).

Deste modo outras fontes de energia passaram a ganhar espaço na matriz elétrica nacional como pode ser observado na Figura 5, de onde é possível se destacar que, entre

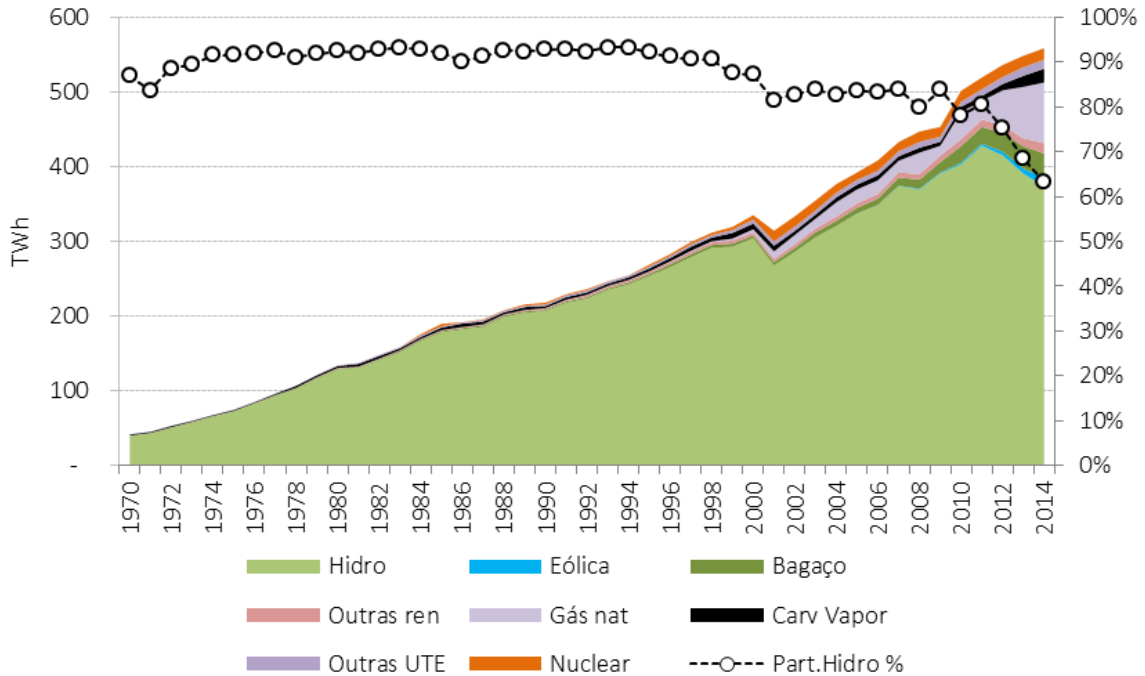
**Figura 4:** Evolução do parque gerador brasileiro, em nova capacidade instalada por ano, no período de 1975 – 2014.



Fonte: Retirado de Tolmasquim (2016).

os anos de 1973 e 1999, a contribuição da energia hidrelétrica na matriz energética nacional girava em torno de 90% enquanto que, no período entre os anos 2000 e 2009, tal parcela esteve mais próxima de 80%. A partir de 2009 esta proporção começa a diminuir a cada ano, atingindo pouco mais de 63% no ano de 2014. Vale lembrar que, atualmente, tem-se que pouco mais de 61% da matriz elétrica brasileira é composta por energia hidrelétrica (SIGA, 2021).

**Figura 5:** Quantidade de energia gerada por fonte e contribuição da energia hidrelétrica na matriz brasileira. Os círculos brancos representam a porcentagem de contribuição da energia hidrelétrica no total gerado.



Fonte: Retirado de Tolmasquim (2016).

## 2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

De maneira similar ao caso dos recursos hídricos para geração de energia, o Brasil apresenta grande disponibilidade de fonte primária para geração de energia a partir do Sol, levando em conta especificamente a energia fotovoltaica. O interesse na exploração deste tipo de energia no Brasil tem início na década de 1950, especificamente a partir da busca pelo desenvolvimento tecnológico de módulos fotovoltaicos, os componentes responsáveis por converter a energia do Sol em energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

Tendo tido início em instituições como Instituto Nacional de Tecnologia (INT), Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e Universidade de São Paulo (USP), o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos seguiu durante as décadas de 60 e 70, também com a colaboração do Instituto Militar de Engenharia (IME) e, já na década de 80, havia no Brasil duas fábricas que produziam o componente. Entretanto, com a falta de incentivos as fábricas reduziram suas atividades e grupos de pesquisa voltaram seus interesses para outras áreas (TOLMASQUIM, 2016; PINHO; GALDINO, 2014).

Devido a problemas de abastecimento de energia elétrica comuns em regiões afastadas das principais redes de distribuição, a geração fotovoltaica passa a se mostrar como uma solução viável a partir dos anos 90. Neste período ocorre a criação pelo Ministério de Minas e Energia (MME) do Governo Federal do Programa de Desenvolvimento energético de Estados e Municípios (PRODEEM), com objetivo de viabilizar o acesso à energia elétrica a tais regiões, predominantemente a partir da geração fotovoltaica (TOLMASQUIM, 2016; PINHO; GALDINO, 2014). Mais adiante, no ano de 2003, através do Decreto número

4.873, é instituído o Programa Luz Para Todos cujo objetivo principal é o de possibilitar o acesso à energia elétrica a domicílios rurais, a partir de fontes intermitentes de energia<sup>1</sup> (TOLMASQUIM, 2016). Em 2018 foi publicado o Decreto número 9.357, que prorrogou o Programa até o ano de 2022.

No Brasil, destaca-se que em 2015 foram constatadas 1.675 novas conexões à rede elétrica, provenientes somente de geração distribuída de energia fotovoltaica, equivalentes a uma potência instalada de 13,3 MW. No ano de 2014, o número total de conexões à rede elétrica provenientes da geração distribuída e considerando todas as fontes de energia foi de 424, o que representa aproximadamente 25% do número de conexões provenientes apenas de energia fotovoltaica em 2015 (BRASIL, 2016). Em nível mundial, entre 2010 e 2016, a capacidade instalada proveniente de sistemas fotovoltaicos aumentou em 40% (REN21, 2019; PEREIRA et al., 2017).

No ano de 2018, no Brasil, a quantidade de energia fotovoltaica gerada foi de 298 mil tep, enquanto que em 2017 a geração foi de 72 mil tep. Ou seja, de 2017 para 2018 houve um aumento de 316,2% na quantidade de energia fotovoltaica gerada (BRASIL, 2019b).

É importante destacar também que na geração distribuída de energia elétrica tem-se estruturas de pequeno e médio portes, inclusive podendo ser instaladas em edificações residenciais e comerciais, cuja energia produzida tem como finalidade principal o consumo próprio. Em contextos mais específicos, ainda há a possibilidade de se injetar na rede do sistema elétrico a energia produzida que não é utilizada. A geração de energia elétrica é considerada distribuída quando o empreendimento gerador apresenta potência instalada menor ou igual a 5 MW (ANEEL, 2012).

Segundo Pereira et al. (2017), “a geração distribuída pode contribuir para a redução de perdas no Sistema Interligado Nacional<sup>2</sup> (SIN) em razão da distância entre as plantas de geração e os centros consumidores”. Deste modo verifica-se o potencial da energia fotovoltaica distribuída como uma alternativa à energia hidrelétrica, predominantemente proveniente da geração centralizada, no sentido de contribuir para a redução de perdas no processo de distribuição e de, conseqüentemente, tornar a matriz elétrica nacional mais diversificada.

Por essas razões é que um dos pontos a serem abordados neste estudo será o potencial de geração de energia fotovoltaica na forma distribuída em nível municipal, com o objetivo de estimar o potencial de produção e suprimento do consumo de energia elétrica a partir desta forma de geração.

## 2.3 BIOELETRICIDADE

Outra forma de energia elétrica gerada por fontes alternativas é a bioeletricidade, que consiste na geração, de forma direta ou indireta, de energia elétrica tendo como fonte

<sup>1</sup>Fontes intermitentes de energia são as que apresentam variabilidade temporal elevada devido a condições meteorológicas (PEREIRA et al., 2017).

<sup>2</sup>Sistema Interligado Nacional (SIN) é o conjunto de instalações e de equipamentos que possibilitam o suprimento de energia elétrica nas regiões do país interligadas eletricamente, definido pela Resolução Normativa da ANEEL número 622 de 2014.

primária qualquer tipo de biomassa<sup>3</sup>. A bioeletricidade enquadra-se na geração termelétrica, pois esta é produzida a partir da queima da biomassa. Atualmente o Brasil é o terceiro maior produtor de bioeletricidade no mundo, sendo o maior na América do Sul, apresentando uma capacidade instalada de 15,6 GW para geração deste tipo de energia (REN21, 2021; SIGA, 2021).

Em termos de bioeletricidade existem no Brasil diferentes tipos de fontes, sendo que no ano de 2016 havia 517 empreendimentos com potência instalada de 13,9 GW, tendo como fonte primária bagaço de cana (78,6%), lixo (15,9%), resíduos florestais (3%), biogás (1,4%), capim elefante (0,5%), carvão vegetal (0,4%), casca de arroz (0,17%) e óleos vegetais (0,03%) (TOLMASQUIM, 2016).

Atualmente existem 584 instalações com potência instalada de 15,7 GW, cujas fontes e suas respectivas contribuições com relação à potência instalada total podem ser observadas na Tabela 1. Nota-se ainda que a potência relativa à biomassa da cana-de-açúcar tem a parcela mais significativa de participação, representando 76,18% da potência total instalada. Ademais, no ano de 2020 observou-se uma contribuição de 3,5%, no total de energia elétrica gerado no Brasil, provenientes da bioeletricidade a partir da biomassa de cana, enquanto que no ano de 2019 esta contribuição foi de 3,8%. (BRASIL, 2020, 2021a). Para efeitos de análise do perfil da utilização deste tipo de energia elétrica no Brasil, a Figura 6 mostra a evolução temporal na participação da bioeletricidade na geração total nacional no período 1970-2014.

**Tabela 1:** Fontes para geração de bioeletricidade, potência gerada, porcentagem de contribuição e número de instalações por fonte no Brasil em 2021.

Fonte de energia	Potência (kW)	Porcentagem	Número de empreendimentos
Bagaço de cana	11.965.814	76,18	411
Lixívia	2.538.634	16,16	18
Resíduos florestais	603.010	3,84	63
Biogás*	365.637	2,33	56
Lenha	104.575	0,67	8
Casca de arroz	53.333	0,34	13
Carvão vegetal	38.197	0,24	7
Capim elefante	31.700	0,20	2
Carvão - RU	8.250	0,05	3
Óleos vegetais	4.350	0,03	2
Etanol	320	0,00	1
Total	15.713.820	100,00	584

\* Incluem biogás AGR, florestal, de RSU, RA e gás de alto-forno.

Fonte: (SIGA, 2021).

O processo de utilização da biomassa da cana-de-açúcar na geração de energia, chamado cogeração, tem como resultado a produção de energia térmica e de energia elétrica. Este tipo de geração ocorre predominantemente em instalações do setor sucroalcooleiro, nas quais o plantio e a colheita da cana-de-açúcar são processos básicos, e tem como ob-

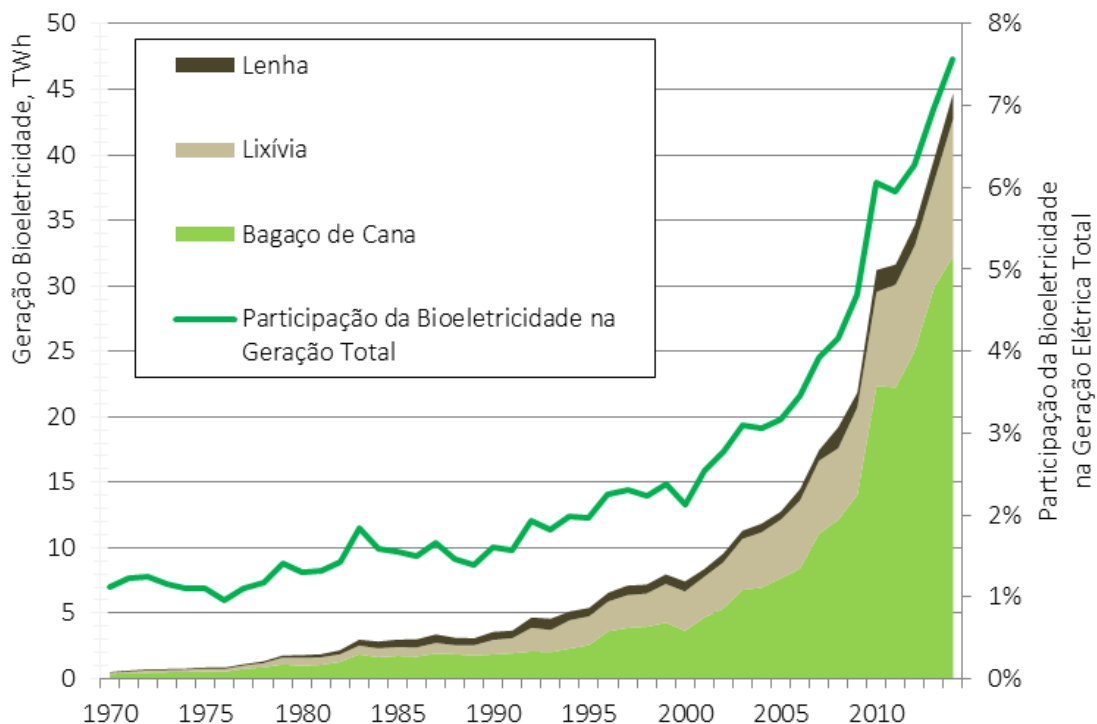
<sup>3</sup>Neste contexto, biomassa consiste em qualquer tipo de matéria orgânica que é utilizada para produção de energia.

jetivo o consumo da própria unidade industrial sendo que, quando há excedentes, estes podem ser exportados para o Sistema Elétrico Nacional (SIN) (BRASIL, 2017b).

Nas instalações que praticam a cogeração, ocorre que há iniciativas por parte do governo que tem por objetivo renová-las e modernizá-las, desde a colheita até o aproveitamento da biomassa. Com isso, vislumbra-se um aumento na eficiência do processo de cogeração e conseqüentemente na quantidade de energia elétrica exportada, culminando numa maior consistência desta fonte no país (BRASIL, 2017b). Atualmente tem-se uma contribuição de 11,97 GW através da biomassa de cana – ver Tabela 1.

A proporção da bioeletricidade a partir da biomassa de cana, com relação ao total de energia elétrica gerado no Brasil, segue sendo a maior quando se considera todas as formas de geração de bioeletricidade principalmente devido ao fato de que, no cenário nacional, este tipo de energia tenha surgido já tendo como principal fonte a biomassa de cana, em virtude da importância da indústria do etanol e do açúcar no país (TOLMASQUIM, 2016; BRASIL, 2019a). Isso se dá devido à consolidação do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil que se inicia na década de 70 com o Programa Nacional de Álcool, tendo como meta principal desenvolver um combustível alternativo no país para amenizar os impactos das crises do petróleo ocorridas na mesma década (TOLMASQUIM, 2016).

**Figura 6:** Evolução da oferta de bioeletricidade, em TWh, e evolução da participação da bioeletricidade na geração total, de 1970 a 2014, no Brasil.



Fonte: Retirado de Tolmasquim (2016).

Considerando a contribuição da bioeletricidade gerada pelas fontes exceto a biomassa de cana, tem-se 0,8% do total gerado no Brasil em 2020. Este panorama se desenhou com o uso da lixívia, contribuindo com 63%, do biogás com 21%, dos resíduos florestais com 10%, e do capim elefante, do carvão vegetal, da casca de arroz e da lenha, juntos

representando os 10% restantes. Outro ponto que evidencia a evolução na utilização destas biomassas para a geração de energia elétrica é o fato de que tais fontes contribuíram com 17%, em 2013, e, já em 2018, com 18% do total de energia, proveniente da biomassa, exportada para o SIN (TOLMASQUIM, 2016; BRASIL, 2021a).

Do ponto de vista de preservação ambiental, todas as fontes de bioenergia tem relevante papel pois contribuem, direta ou indiretamente, para que a geração de energia elétrica seja um processo mais eficiente. Inclusive há incentivos, por parte do Governo Federal, que tem por objetivo intensificar a contribuição da bioeletricidade no total brasileiro de energia elétrica produzida (TOLMASQUIM, 2016). No contexto deste trabalho pode-se destacar a bioenergia gerada a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU). Este tipo de energia tem como fonte o biogás oriundo dos RSU, que consiste no produto final do processo de digestão anaeróbia<sup>4</sup> de matéria orgânica.

De acordo com a origem da matéria orgânica em questão caracteriza-se o biogás produzido. Tem-se como principais fontes primárias utilizadas no Brasil o biogás originário de resíduos agroindustriais (AGR), o biogás originário de resíduos animais (RA) e o biogás originário de resíduos sólidos urbanos (RSU) (SIGA, 2021).

Levando em conta a geração de RSU atualmente, em quantidade, e o gerenciamento deste tipo de resíduo, fica evidente o potencial de geração do biogás RSU e de geração de bioenergia a partir dele. Ainda segundo SIGA (2021), atualmente existem 24 usinas no Brasil que geram bioenergia a partir do biogás RSU, representando uma capacidade instalada de 196,3 MW correspondentes a aproximadamente 0,11% da capacidade total de geração elétrica instalada nacional.

Devido aos impactos da geração de resíduos na sociedade atual, a destinação dos RSU tem sido um ponto bastante relevante e, das possíveis abordagens, aquelas que se apresentam em conjunto com a geração de energia mostram-se de grande valia. Assim sendo, neste trabalho considerar-se-á a geração de energia elétrica a partir dos RSU, em um contexto em que é possível o aproveitamento destes através da incineração, que será abordado mais adiante.

## 2.4 ENERGIA EÓLICA

Seguindo na análise das fontes alternativas renováveis de energia, destaca-se também a energia eólica. Este tipo de energia consiste na energia elétrica gerada a partir do movimento do ar, em que a eletricidade é obtida através da conversão da energia cinética do ar em movimento em energia elétrica (ANEEL, 2005).

O aproveitamento da geração de energia elétrica a partir do vento se inicia no final do século XIX, na Dinamarca e nos Estados Unidos da América (EUA) e, novamente devido às crises do petróleo ocorridas na década de 70, passa a ser considerada uma real alternativa para geração principalmente nos EUA, a partir de um maior foco em pesquisa e desenvolvimento na área. Ainda nos EUA, já na década de 80 e devido principalmente a incentivos governamentais, observa-se um aumento significativo no número de instalações

---

<sup>4</sup>Digestão anaeróbia consiste no processo de decomposição do material pela ação de bactérias anaeróbias. Trata-se de um processo simples, que ocorre naturalmente com quase todos os compostos orgânicos (ANEEL, 2005).

eólicas – representando em torno de 1,8 GW – bem como na Europa, implicando inclusive em atividades comerciais na área (TOLMASQUIM, 2016; ANEEL, 2005; KALDELLIS; ZAFIRAKIS, 2011).

A partir de então, nos anos 90, ocorre uma intensificação do uso da energia eólica na Europa e, nos anos 2000, tal expansão se difunde pelo mundo, principalmente na Ásia – sendo mais notável na Índia e na China – e de forma menos intensa na América Latina e na África.

O monitoramento de parâmetros associados ao vento no Brasil, para geração de energia eólica, iniciou-se no começo da década de 1990 na região Nordeste (nos estados do Ceará e de Pernambuco), possibilitando as primeiras estimativas do potencial de geração local e motivando a instalação de turbinas (ANEEL, 2005).

No início da década de 2010 o cenário mostrava a energia eólica como uma alternativa competitiva aos combustíveis fósseis, tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista financeiro, já que neste período ocorre também uma redução significativa nos custos dos equipamentos (TOLMASQUIM, 2016; ANEEL, 2005). Segundo ABEEólica (2019) foram instalados 51,3 GW de capacidade eólica no mundo em 2018, o que elevou a capacidade total instalada para 591 GW.

No Brasil, no período entre 2010 e 2020, observou-se um aumento de aproximadamente 16,81 GW em capacidade instalada, resultado de um investimento de mais de 37 bilhões de dólares no período, implicando em uma capacidade total instalada de 17,75 GW no final de 2020, o que representou um aumento de 23% com relação ao ano de 2019 (ABEEOLICA, 2021). Atualmente estima-se uma capacidade instalada para geração de energia eólica de pouco mais de 18,6 GW, representando em torno de 10,5% do total gerado no país (SIGA, 2021). A Figura 7 ilustra a evolução da capacidade eólica instalada no Brasil de 2010 a 2020.

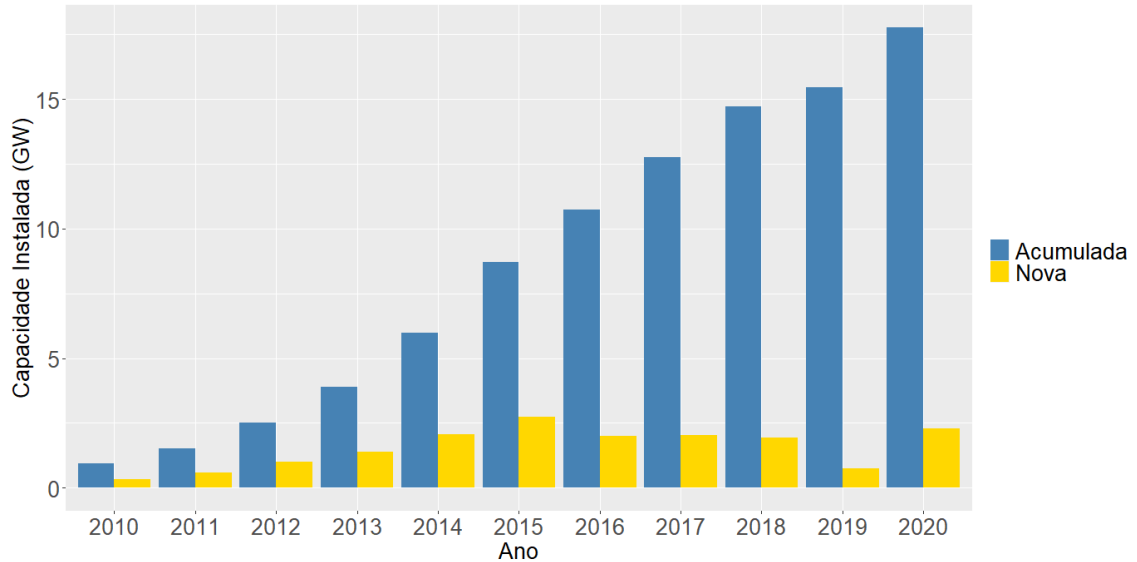
Em termos de capacidade eólica instalada a China lidera o ranking mundial, com 278.324 MW, seguida dos EUA com 122.275 MW. O Brasil ocupa a sétima posição, com 17.750 MW, à frente do Reino Unido e de países como Canadá e Itália. Por outro lado, o Brasil ocupa a terceira posição do ranking de capacidade eólica nova acrescida no ano de 2020, com 2.297 MW instalados no período. A China também lidera este ranking com 48.940 MW instalados em 2020, seguida dos EUA (16.913 MW) (ABEEOLICA, 2021).

Outro ponto interessante de se destacar é a porcentagem do investimento na energia eólica, com relação ao investimento total em fontes renováveis de energia. Em 2020 esta parcela foi de 45%, enquanto que em 2018 foi de 36% e em 2019 de 55% (ABEEOLICA, 2021). A Figura 8 mostra a parcela do investimento correspondente à energia eólica com relação ao total investido em energias renováveis no Brasil, de 2010 a 2020.

Apesar do cenário favorável à utilização deste tipo de energia, os fatores técnicos para aproveitamento do vento como fonte de energia mostram-se um obstáculo, principalmente no que diz respeito à geração distribuída. Segundo ANEEL (2005), para que seja possível aproveitar a energia eólica sua densidade deve ser de pelo menos  $500 \text{ W/m}^2$ , com o vento numa velocidade mínima entre 7 e 8 m/s a uma altura de 50 m, embora já existam estudos e tecnologias para 100 m. Tais características são bastante específicas, de modo que seja estimado que em torno de 13% da superfície da Terra as apresente. Ainda assim, dados indicam que o potencial eólico mundial aproveitável é bastante significativo (ANEEL,

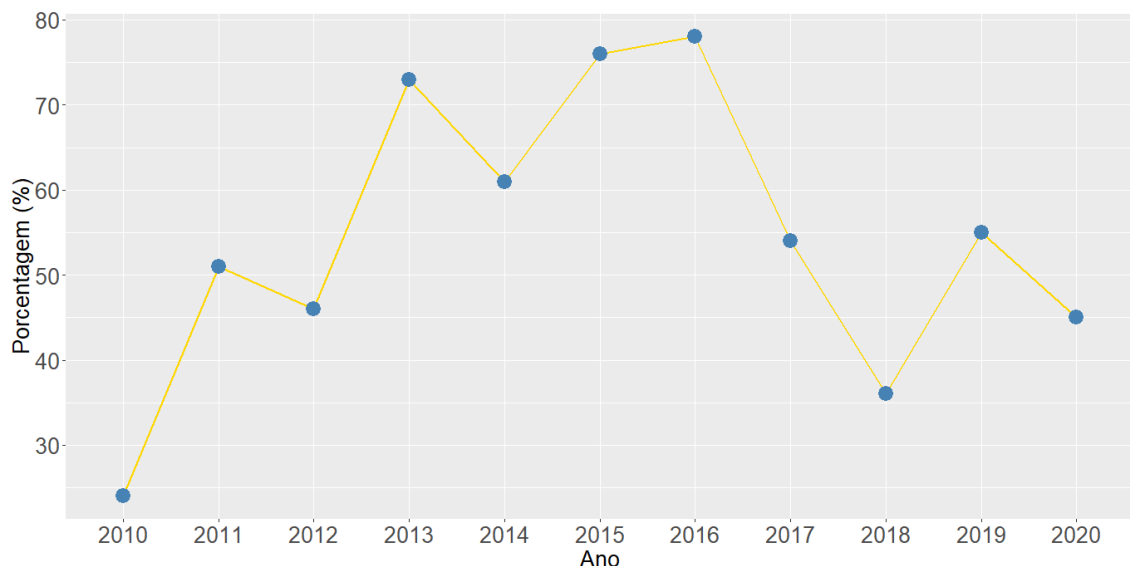
2005).

**Figura 7:** Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil, em MW, no período de 2010 a 2020.



Fonte: O autor. Dados de ABEEólica (2021).

**Figura 8:** Evolução da porcentagem do investimento em energia eólica no Brasil, com relação ao total investido em energias renováveis, de 2010 a 2020.



Fonte: O autor. Dados de ABEEólica (2021).

## 2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, SMART GRIDS E GERAÇÃO VIA RSU

Avaliando como um todo o panorama de energia elétrica no Brasil constata-se que a oferta se dá principalmente pela energia hidrelétrica, a qual em 2018 representou 64,7% do

total de energia elétrica gerado no país (BRASIL, 2019b). Tal contexto implica em uma dependência de condições climáticas favoráveis para que a demanda de energia elétrica nacional seja atendida de maneira segura (PEREIRA et al., 2017).

É fato que a energia hidrelétrica não é a única fonte renovável diretamente dependente de condições climáticas favoráveis, porém fontes renováveis diferentes da hidrelétrica dependem de condições climáticas também distintas. Citando a bioeletricidade, a energia fotovoltaica e a energia eólica tem-se que todas dependem de condições climáticas favoráveis, porém diferentes entre si. Ou seja, a demanda de energia elétrica pode ser atendida a partir de uma matriz elétrica na qual suas componentes se complementam de forma a garantir uma segurança energética no sistema nacional, de maneira menos dependente das variações nas condições climáticas.

De acordo com dados recentes, tem-se evidências de que o Brasil está avançando na busca de uma menor dependência da energia hidrelétrica. A Tabela 2 mostra a evolução da quantidade de energia elétrica gerada nas formas hidrelétrica, bioeletricidade, eólica e fotovoltaica entre os anos de 2017 e 2020. Observa-se que em todos os casos a quantidade gerada para cada forma de geração aumenta a cada ano, exceto no caso da hidrelétrica que no período 2019-2020 apresentou queda de 0,4%.

**Tabela 2:** Geração elétrica no Brasil no período 2017-2020, considerando as fontes abordadas.

Geração Elétrica (GWh)					
Ano	Hidrelétrica	Bioeletricidade	Eólica	Fotovoltaica	Geração Total*
2017	370.906	51.023	42.373	832	589.327
2018	388.971	52.267	48.475	3.461	601.396
2019	397.877	52.543	55.986	6.655	626.328
2020	396.327	56.167	57.051	10.750	621.198

\* Geração de energia elétrica total considerando todas as fontes, não apenas as indicadas.

Fonte: Brasil (2021b) e Brasil (2019b).

As variações mais significativas nos valores da Tabela 2 são os referentes às fontes eólica e solar. Nota-se, para a energia eólica, variações percentuais de 14,4% (2017-2018), 15,5% (2018-2019) e 1,9% (2019-2020). Para a energia fotovoltaica as variações são ainda mais intensas, sendo elas de 316,1% (2017-2018), 92,2% (2018-2019) e 61,5% (2019-2020) e, no caso da bioeletricidade, as variações não são tão intensas mas ainda assim são positivas.

Deste modo evidencia-se um cenário no qual as fontes renováveis de energia elétrica se mostram cada vez mais consistentes no Brasil. Excluindo a energia hidrelétrica, é importante levar em consideração o fato de que, para que tais fontes se consolidem no país, são necessários investimentos do ponto de vista financeiro e, principalmente, do ponto de vista científico e tecnológico. Sendo assim uma das motivações deste trabalho consiste no desenvolvimento de material científico proveniente do estudo da viabilidade da geração e suprimento de energia elétrica a partir de fontes alternativas renováveis em contextos específicos, que serão descritos no decorrer do texto.

Devido à disponibilidade de dados e a uma análise que dará ênfase à forma distribuída de geração, o estudo será desenvolvido em nível municipal. Serão tomados como objetos

de estudo diferentes municípios, pertencentes a classes populacionais distintas, cujos potenciais de geração e suprimento de energia elétrica a partir de fontes alternativas será avaliado. A análise em nível municipal traz consigo a possibilidade de ser inserida num contexto de fornecimento não centralizado de energia.

Na geração distribuída é importante se levantar alguns fatores relevantes relacionados à descentralização. Um deles diz respeito à disponibilidade local de fontes primárias. Como será discutido posteriormente, as formas de energia aqui levadas em conta serão a fotovoltaica – cuja fonte primária é a luz solar – e a energia elétrica gerada a partir dos RSU. Em ambos os casos tem-se uma disponibilidade significativa de fontes primárias.

Outro fator relevante que corrobora a favor da geração distribuída é a potencial diminuição na descontinuidade do fornecimento, já que esta se dá de forma que a central geradora esteja próxima aos agentes consumidores se comparada à geração centralizada. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) possui indicadores associados à qualidade do fornecimento de energia elétrica no país, os chamados indicadores coletivos de continuidade (DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora e FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora).

Nas Figuras 9 e 10 observa-se o comportamento de tais indicadores, no Brasil, entre os anos de 2011 e 2020. A curva em verde indica o limite máximo dos valores de DEC e FEC, definidos pela ANEEL, enquanto que as barras indicam os valores observados dos indicadores em cada ano.

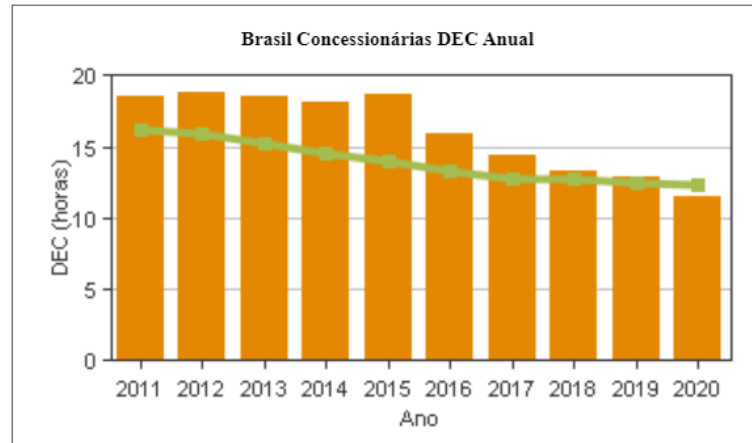
Mais um ponto importante, neste contexto, diz respeito às localidades situadas a grandes distâncias das centrais de fornecimento de energia elétrica, visto que eventuais problemas na estrutura de transmissão podem acarretar em longos períodos de descontinuidade no fornecimento.

Vale lembrar o episódio ocorrido no início de 2020, em que quase 90% da população do estado do Amapá ficou sem energia elétrica por mais de 20 dias devido a um incêndio que danificou o transformador, responsável pelo ajuste da alta tensão da rede de fornecimento de energia do estado. A rede possui alta tensão devido à distância que esta deve percorrer da central geradora até chegar ao estado, e com isso o transformador torna-se essencial para o ajuste da tensão para o fornecimento da energia elétrica. Inclusive as perdas de transmissão e distribuição de energia elétrica apresentaram 27,6% das perdas totais, que correspondem às perdas em centros de transformação, de transmissão e distribuição de eletricidade e outras perdas de distribuição e armazenagem (BRASIL, 2021b).

A partir deste cenário, destaca-se a necessidade de se buscar alternativas que possibilitem também um aumento na qualidade de fornecimento de energia elétrica. Neste sentido as smart grids (ou redes inteligentes) mostram-se alternativas interessantes, que atuam de forma conjunta com empreendimentos de geração distribuída. Segundo Oliveira (2012), “smart grid não é um sistema, e sim um conceito de rede dotada de tecnologias digitais que oferece mais eficiência e confiabilidade”. Tanto a eficiência quanto a confiabilidade citadas podem ser associadas diretamente ao fornecimento de energia elétrica.

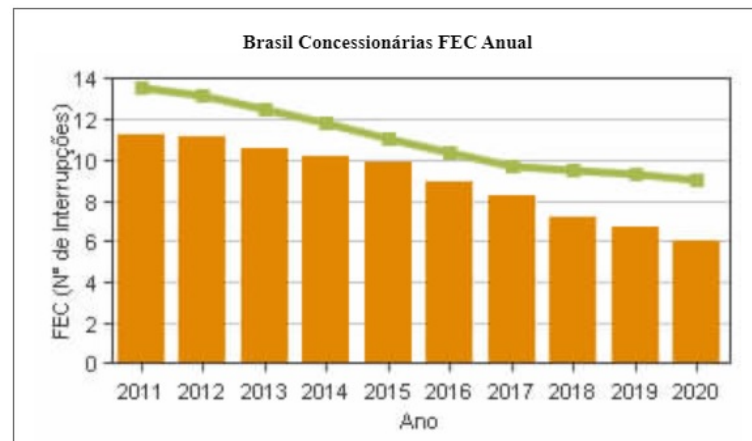
As smart grids tratam os dados de consumo e geração de energia de forma digital, através de medidores eletrônicos, permitindo que se crie um sistema de gestão energética mais eficiente e sustentável, capaz de otimizar tanto o consumo e a geração de energia elétrica quanto o aspecto econômico associado (OLIVEIRA, 2012; NASCIMENTO,

**Figura 9:** DEC – Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora no Brasil. A curva em verde indica o limite máximo dos valores definido pela ANEEL e as barras indicam os valores observados no respectivo ano.



Fonte: ANEEL.

**Figura 10:** FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora no Brasil. A curva em verde indica o limite máximo dos valores definido pela ANEEL e as barras indicam os valores observados no respectivo ano.



Fonte: ANEEL.

2019). Outro ponto interessante a se destacar é o fato de que, num sistema smart grid, o consumidor também pode atuar como fornecedor de energia.

Levando em conta as possibilidades de geração distribuída, os consumidores residenciais podem exportar para a rede elétrica a energia gerada não consumida, quando for o caso. Os medidores eletrônicos são capazes de monitorar diversas informações das residências em que são instalados, possibilitando assim que o fluxo de energia ocorra tanto no sentido de entrada quanto de saída do domicílio (OLIVEIRA, 2012).

Sobre a caracterização da geração distribuída, tem-se que a microgeração consiste nas centrais geradoras com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilizem fontes renováveis de energia elétrica, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Já a minigeração consiste nas centrais geradoras de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilizem

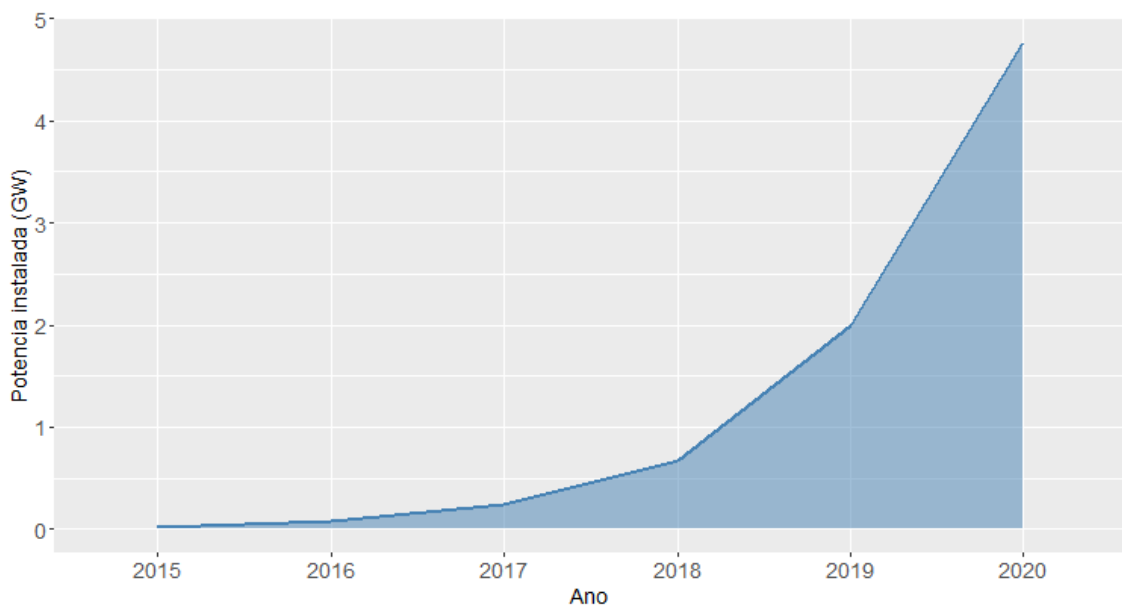
de fontes renováveis de energia elétrica, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

Assim sendo, como consequência da geração distribuída no contexto das smart grids, pode-se vislumbrar uma descentralização ainda maior na geração e no fornecimento de energia, aliviando o sistema de geração e distribuição como um todo, além de estimular a utilização das fontes renováveis, principalmente a fotovoltaica (NASCIMENTO, 2019). Tal cenário tornaria possível que as concessionárias controlassem de forma mais eficaz o fornecimento de energia elétrica, evitando perdas consideráveis tanto do ponto de vista energético quanto monetário (OLIVEIRA, 2012).

Neste sentido é interessante observar o cenário de crescente participação de empreendimentos de geração distribuída na matriz elétrica do país. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) referentes ao período entre 2007 e 2018, associados especificamente a tais tipos de empreendimentos, é possível notar que de fato vem ocorrendo um aumento no número de empreendimentos e também na potência instalada para geração distribuída de energia elétrica nos últimos 8 anos (BRASIL, 2021b, 2019b; ANEEL, 2021).

Nota-se, a partir das Figuras 11 e 12 um aumento significativo na utilização de geração distribuída, a partir da capacidade instalada e da quantidade de energia produzida. Tais números englobam a geração distribuída de energia pelas fontes solar, hidrelétrica, eólica, gás natural e outras renováveis <sup>5</sup>, sendo as de geração solar responsáveis pela maior parcela de contribuição na quantidade de energia gerada. A Figura 13 ilustra as quantidades de energia gerada de forma distribuída por todas as fontes e pela geração solar no período 2017 – 2020.

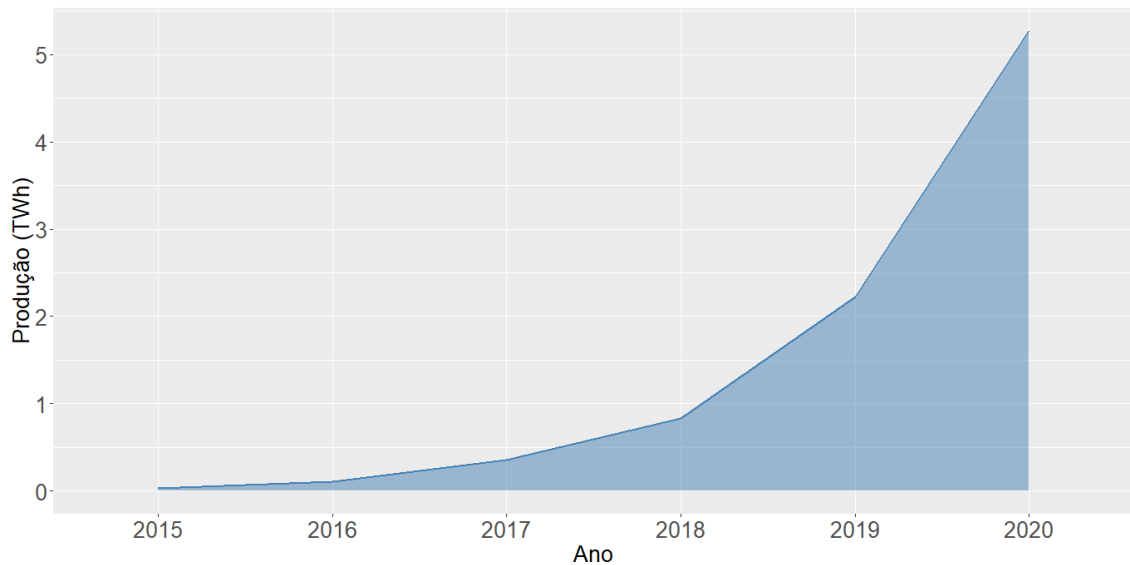
**Figura 11:** Potência instalada de empreendimentos de geração distribuída de energia, no período 2015–2020.



Fonte: O autor. Dados de Brasil (2017a), Brasil (2019b) e Brasil (2021b).

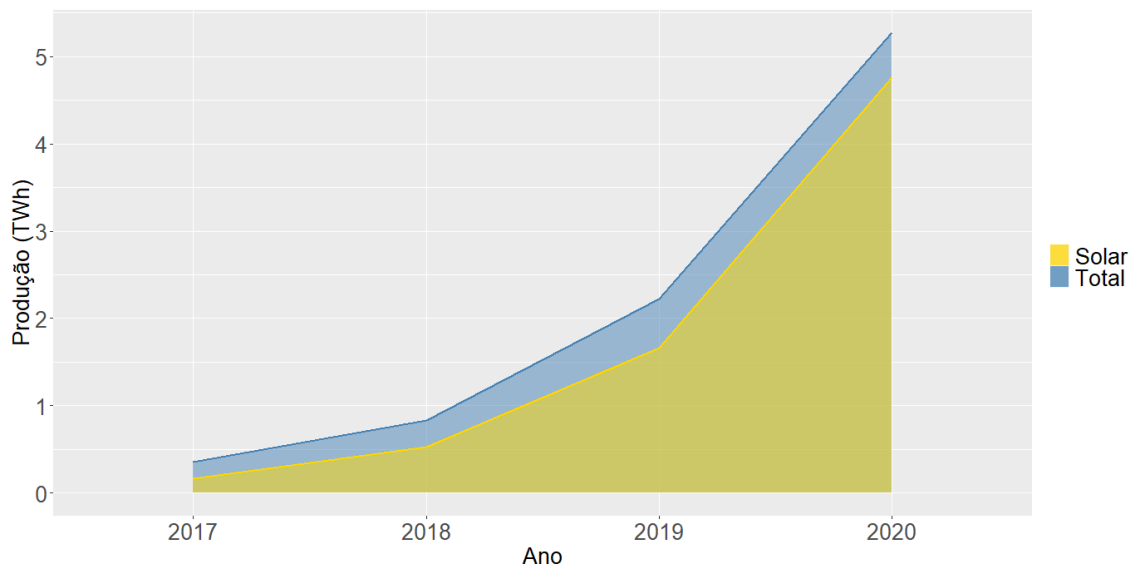
<sup>5</sup>Inclui biogás proveniente de resíduos agrícolas e urbanos, casca de arroz, gás de alto-forno (biomassa) e resíduos florestais.

**Figura 12:** Produção elétrica de empreendimentos de geração distribuída de energia, no período 2015–2020.



Fonte: O autor. Dados de Brasil (2021b).

**Figura 13:** Produção elétrica total e solar de empreendimentos de geração distribuída de energia, no período 2017–2020.



Fonte: O autor. Dados de Brasil (2021b) e Brasil (2019b).

De fato, de 2007 a 2012, todos os empreendimentos de geração distribuída foram provenientes das unidades geradoras fotovoltaicas (UFV), como pode ser observado nas Tabelas 3 e 4. Tais números englobam a geração distribuída de energia através de centrais geradoras hidrelétricas (CGH), centrais geradoras eolielétricas (EOL), UFV e usinas termelétricas de energia (UTE), sendo as UFV responsáveis pela maior parcela de contribuição, tanto no número de empreendimentos quanto na potência instalada. A partir de 2013 nota-se o aparecimento das outras formas de geração distribuída, mas ainda com a geração a partir das UFV correspondendo à maioria da contribuição.

**Tabela 3:** Total de empreendimentos instalados em geração distribuída por fonte, por ano, e porcentagem da fonte em relação ao total.

Número de Empreendimentos				
Ano	UFV	CGH	EOL	UTE
2007	1 (100%)	0	0	0
2008	1 (100%)	0	0	0
2009	-	-	-	-
2010	1 (100%)	0	0	0
2011	1 (100%)	0	0	0
2012	1 (100%)	0	0	0
2013	53 (88,33%)	0	7 (11,67%)	0
2014	295 (95,78%)	1 (3,25%)	1 (0,32%)	2 (0,65%)
2015	1447 (97,97%)	1 (1,42%)	1 (0,07%)	8 (0,54%)
2016	6753 (99,31%)	10 (0,15%)	8 (0,12%)	29 (0,43%)
2017	13953 (99,42%)	31 (0,22%)	7 (0,05%)	43 (0,31%)
2018	35139 (99,72%)	27 (0,08%)	4 (0,01%)	68 (0,19%)
2019*	32917 (99,88%)	22 (0,07%)	0	19 (0,06%)

\* Dados disponíveis até o primeiro semestre de 2019.

Fonte: ANEEL (2021).

**Tabela 4:** Potência instalada em geração distribuída, em cada fonte, por ano, e porcentagem da fonte em relação ao total.

Potência Instalada				
Ano	UFV	CGH	EOL	UTE
2007	0,5 (100%)	0	0	0
2008	25 (100%)	0	0	0
2009	-	-	-	-
2010	30 (100%)	0	0	0
2011	14,9 (100%)	0	0	0
2012	423,94 (100%)	0	0	0
2013	1396,76 (98,56%)	0	20,4 (1,44%)	0
2014	2500,48 (71,77%)	825 (23,68%)	48,7 (1,4%)	110 (3,15%)
2015	9670,34 (81,44%)	9 (0,08%)	61,6 (0,52%)	2133,66 (17,97%)
2016	54173,24 (72,91%)	4646,5 (6,25%)	5037,4 (6,78%)	10448,82 (14,06%)
2017	126784,09 (69,74%)	37753,2 (20,77%)	5117,5 (2,82%)	12131 (6,67%)
2018	393339,22 (91,52%)	20563,38 (4,78%)	28,8 (0,01%)	15854,5 (3,69%)
2019*	378997,78 (92,62%)	23945,52 (5,85%)	0	6271,56 (1,53%)

\* Dados disponíveis até o primeiro semestre de 2019.

Fonte: ANEEL (2021).

O fato das UFV representarem grande parte da geração distribuída total no país também indica uma tendência de consolidação na utilização deste tipo de fonte para o futuro – ver Figura 13. Levando em conta tanto a matéria-prima quanto as tecnologias disponíveis para esta forma de geração, constata-se um cenário favorável no sentido da continuidade da utilização deste recurso.

O Brasil se encontra em uma posição geográfica propícia em termos de incidência de luz solar, o que implica em uma disponibilidade considerável de fonte primária para geração de energia fotovoltaica e, aliando-se a isso os incentivos governamentais já citados anteriormente e a disponibilidade de tecnologia para o aproveitamento desses recursos, tem-se uma situação bastante favorável para a continuidade no desenvolvimento e na utilização de geração de energia fotovoltaica no país.

Ainda considerando a geração distribuída de energia elétrica nas modalidades já citadas, será aqui evidenciada a geração termelétrica (UTE), especificamente a partir dos RSU. Deste ponto de vista, de maneira geral, existem duas possibilidades. A primeira delas tem como fonte o biogás proveniente da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos RSU, já abordada anteriormente. A segunda utiliza da queima direta de RSU para a geração de energia de maneira de legal e ambientalmente adequadas, a chamada Waste-to-Energy (WTE).

Em ambos os casos é possível caracterizar novamente um cenário bastante favorável para geração de energia elétrica, principalmente devido à ampla disponibilidade de fonte primária, quando se leva em conta regiões urbanas. Por outro lado, do ponto de vista tecnológico, o cenário nacional não é dos mais promissores.

Segundo SIGA (2021), atualmente existem 22 empreendimentos de geração termelétrica de energia, tendo como fonte primária o biogás proveniente dos RSU, em que o biogás é oriundo do processo natural de biodigestão da fração orgânica dos RSU, que se dá em aterros sanitários adequados para este tipo de processo (TOLMASQUIM, 2016).

Entretanto, os RSU descartados em aterros podem apresentar um problema de geração de resíduos, pois ainda permanecem armazenados por muito tempo. Outro ponto a se levar em conta é o fato de que o processo natural de geração do biogás a partir da fração orgânica dos RSU é um processo lento e que se dá sob condições bastante específicas (CREMONEZ et al., 2013).

Como contraponto a este cenário tem-se a abordagem WTE. Ainda não há no Brasil empreendimentos do tipo WTE em funcionamento, o que indica uma possibilidade de exploração desta forma de geração. Esta abordagem destaca-se por utilizar a maioria da massa disponível de RSU na geração de energia, através da queima direta desta sem que seja necessária a geração do biogás. Na Figura 14 pode-se observar as localidades no mundo em que existem plantas WTE.

Diferentemente dos incineradores de lixo comuns difundidos nas décadas de 1950 e 1960, as instalações WTE tratam todos os resíduos da queima, desde os sólidos aos gasosos, de forma que estes sejam liberados de maneira adequada no meio ambiente, limitando consideravelmente qualquer tipo de consequência ambiental (BRUNNER; RECHBERGER, 2015; MARTIN; MARTIN; KORALEWSKA, 2019). A incineração direta dos RSU, desde que legal e ambientalmente adequada, mostra-se uma interessante alternativa também no que diz respeito ao gerenciamento deste tipo de resíduo.

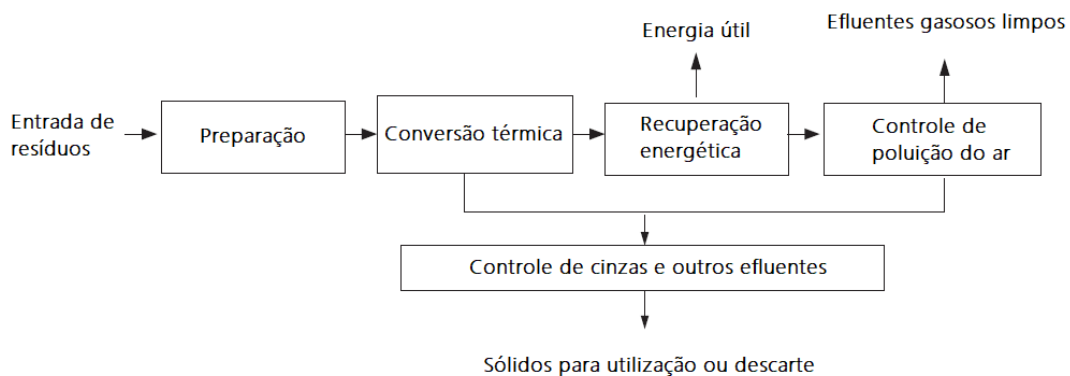
No início do século XVIII, quando surgiram os primeiros incineradores de RSU, estes se mostravam eficazes tanto na eliminação dos RSU quanto de qualquer tipo de material orgânico potencialmente contagioso. Isso representava uma medida importante de higiene e saúde pública, ainda que como resultado secundário, contribuindo inclusive na proteção da população contra doenças como cólera e febre tifoide, que predominavam na



Segundo Muller, Arruda e Filho (2018), na Europa as usinas WTE tratam em torno de 81 milhões de toneladas de RSU por ano, implicando em uma geração elétrica de 32 TWh. Isto implica em uma diminuição de aproximadamente 30 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas.

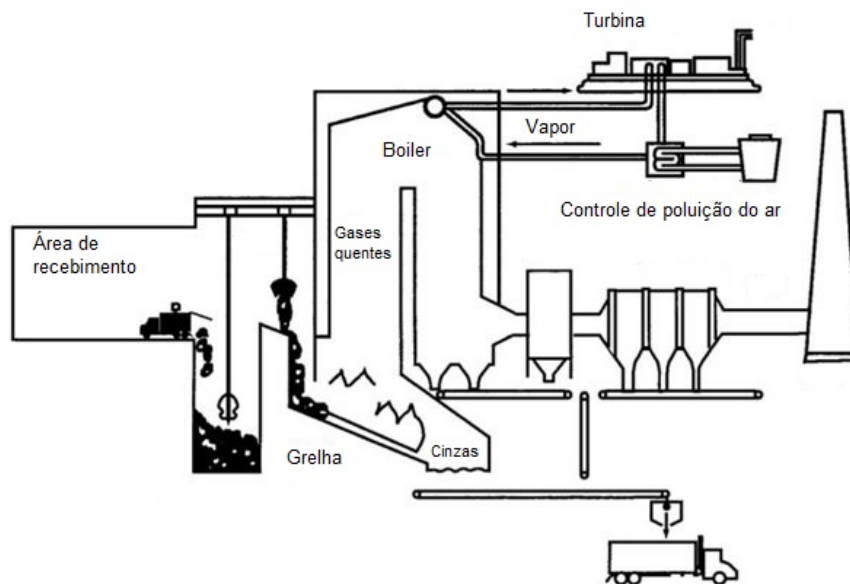
Na Figura 15 está ilustrado um esquema básico de funcionamento de uma estrutura WTE, enquanto que na Figura 16 está ilustrado o funcionamento de uma planta WTE, indicando os processos pelos quais a energia é aproveitada e os resíduos são coletados e tratados. Pode haver variações nas taxas de conversão dos RSU em energia, dependendo da caracterização destes resíduos e da forma como a tecnologia é implementada.

**Figura 15:** Sistema genérico WTE baseado em conversão térmica.



Fonte: Adaptado de Leckner (2015).

**Figura 16:** Esquema de funcionamento de uma planta WTE.



Fonte: Adaptado de Siddiqui, Naseer e Wahab (2019).

Enquanto no mundo, principalmente no hemisfério norte, as instalações WTE vem se difundindo cada vez mais, no Brasil ainda não há qualquer instalação deste tipo implantada – ver Figura 14. Segundo a ABREN (Associação Brasileira de Recuperação

Energética de Resíduos), existem projetos para a implementação deste tipo de instalação no país num futuro próximo, com recursos da iniciativa privada.

Com isso, outro ponto a ser abordado neste estudo será o potencial de geração e suprimento de energia elétrica a partir dos RSU, em nível municipal, através da abordagem WTE, que se mostra também viável no sentido legal de gestão e de tratamento dos RSU. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), Art. 9º, deve ser observada a seguinte hierarquia na geração, no gerenciamento e no tratamento dos RSU:

1. não geração;
2. redução;
3. reutilização;
4. reciclagem;
5. tratamento dos resíduos sólidos;
6. disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Tendo isto em vista, pode-se dizer que o aproveitamento energético a partir da abordagem WTE, enquadraria-se no tratamento dos RSU, contando ainda com a possibilidade de aproveitamento energético. Por outro lado o fato de a PNRS não incluir explicitamente o aproveitamento energético na hierarquia do gerenciamento dos RSU poderá ser um obstáculo na difusão deste tipo de tecnologia no país, considerando que, do ponto de vista legal, existem outras opções menos expensivas – porém menos adequadas e sustentáveis – para a destinação dos RSU.

A PNRS ainda, no Art. 9º – § 1º, afirma que tecnologias visando a recuperação energética dos RSU poderão ser usadas, desde que a viabilidade técnica e a viabilidade ambiental sejam comprovadas, sendo também necessária a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado por órgão ambiental competente.

A seguir, no próximo capítulo, é descrita uma visão geral e são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho. No Capítulo 4 são abordados os conceitos, a metodologia, os resultados e as discussões referentes às estimativas de geração e suprimento fotovoltaico, enquanto que no Capítulo 5 os mesmos pontos são abordados, porém referentes às estimativas de geração e suprimento via RSU. Além disso, quando cabível, serão trazidas revisões da bibliografia referentes aos temas abordados. Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as discussões e conclusões gerais sobre o trabalho.

### 3. VISÃO GERAL E OBJETIVOS

#### 3.1 VISÃO GERAL

Considerando todos os aspectos até aqui levantados, foi possível destacar alguns pontos que permitiram uma visão geral do que foi abordado. São eles:

- existe um aumento crescente na demanda de energia elétrica no mundo;
- a geração de energia deve levar em conta os aspectos ambientais;
- a implantação de grandes empreendimentos de geração de energia podem levar a grandes impactos ambientais;
- a concentração na geração de energia pode levar a descontinuidades e queda na qualidade do fornecimento para grandes populações;
- a concentração na geração de energia acarreta uma perda significativa durante o transporte, além de necessitar de equipamentos de difícil locomoção e alto custo;
- o sistema de distribuição de energia tende a caminhar para a implementação de smart grids;
- o Brasil possui grande potencial de geração de energia fotovoltaica;
- existem tecnologias que possibilitam um aproveitamento energético eficiente com consequente destinação ambientalmente adequada dos RSU.

A partir destes pontos, percebe-se a relevância de se trabalhar a geração de energia de forma sustentável e distribuída. Neste sentido, este trabalho busca fomentar esta abordagem ao propor a definição de um modelo de geração local de energia em cidades para deixá-las menos dependentes da geração remota, de forma a contribuir para a eficiência e segurança do sistema integrado, além de propor uma forma de lidar com os RSU de maneira sustentável e eficaz. Para isto, será considerada a geração fotovoltaica, tendo como complemento a geração a partir dos RSU.

O foco do estudo na energia a partir dos RSU e na energia fotovoltaica se dá principalmente pela ampla disponibilidade das fontes primárias para geração e, no caso da fotovoltaica, também pela viabilidade técnica de utilização. Além disso, dentre os inúmeros impactos ambientais gerados, aqueles associados à geração e ao descarte de RSU são hoje um desafio bastante considerável para a sociedade.

No que diz respeito à energia fotovoltaica, além da disponibilidade da fonte primária para geração – a luz solar – a significativa crescente em sua utilização, observada nos últimos anos, também evidencia esta forma de geração. O cenário descrito neste Capítulo, o contexto ilustrado pelas figuras 12 e 11 e os dados mostrados nas tabelas 3 e 4 fundamentam a realização das análises sob o ponto de vista da geração distribuída de energia.

Outro fator relevante que foi levado em conta na escolha das fontes de energia aqui citadas é a complementaridade existente entre elas. Obviamente a energia fotovoltaica

depende diretamente da luz solar, o que implica que este tipo de energia não pode ser gerado diretamente em períodos noturnos. Vale esclarecer que, neste trabalho, não estão sendo considerados quaisquer possibilidades de armazenamento de energia elétrica.

Por outro lado, a energia resultante da abordagem WTE pode ser gerada em qualquer momento – desde que se tenha estrutura adequada – pois a disponibilidade de fonte primária é praticamente constante. Tem-se então uma complementaridade entre as duas formas de geração consideradas: em períodos nos quais não há luz solar disponível, a geração a partir dos RSU pode ser capaz de complementar a geração fotovoltaica.

## **3.2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo do trabalho consiste em propor a criação e avaliar a viabilidade de implementação de um modelo de geração local de energia em cidades para deixá-las menos dependentes da geração remota, contribuindo para a eficiência e segurança do sistema integrado, além de uma forma de lidar com os RSU de maneira sustentável e eficaz. Para isto, será considerada a geração fotovoltaica, tendo como complemento a geração a partir dos RSU.

## **3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

De acordo com o objetivo geral, foram definidos alguns objetivos específicos como parte integrante do processo desenvolvido no trabalho:

- desenvolver uma metodologia que permita estimar o potencial de geração local e suprimento de energia elétrica de municípios pela geração fotovoltaica e pela geração via RSU, a partir de dados livres, oriundos de entidades governamentais e/ou instituições públicas de pesquisa;
- mensurar a capacidade de autossuficiência de energia elétrica em nível municipal;
- estimar áreas em telhados de um município para a instalação de painéis fotovoltaicos;
- estimar a produção fotovoltaica em função do período do ano;
- estimar a geração de energia elétrica em função da massa coletada de RSU;
- estudar o comportamento do consumo de energia com relação à massa coletada de RSU e ao número de habitantes dos municípios estudados;
- gerar conteúdo científico para fomentar argumentos a favor da utilização das formas de geração aqui abordadas.

## 4. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

### 4.1 INTRODUÇÃO

A capacidade de geração de energia fotovoltaica depende diretamente da irradiação solar, que é a quantidade de energia por unidade de área incidente em determinada superfície (KALOGIROU, 2014). A irradiação solar é dada em unidades como o  $\text{kJ}/\text{m}^2$  ou o  $\text{kWh}/\text{m}^2$  por exemplo. Com isso, estudos podem ser realizados principalmente, mas não apenas, em função da irradiação solar observada em localidades de interesse.

Dados desta natureza são disponibilizados em portais de instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INMET, 2019), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) (INPE, 2019), o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito (CRECESB) (CRECESB, 2020) e o Atlas Brasileiro de Energia Solar do INPE (PEREIRA et al., 2017). Os portais disponibilizam dados provenientes de estações de medição automática de parâmetros ambientais, como como precipitação, umidade, velocidade do vento e irradiação solar, situadas em diferentes localizações do país, além de dados obtidos em função de modelos desenvolvidos a partir dos dados obtidos das estações meteorológicas.

Em de Pereira et al. (2017) são disponibilizados dados provenientes de análises e modelos estatísticos construídos a partir do estudo temporal da irradiação solar no Brasil obtidos do INMET (2019) e do INPE (2019). Os dados de INMET (2019) são registrados minuto a minuto e disponibilizados integralizados na média por hora. Em INPE (2019) são medidos minuto a minuto, sendo disponibilizados integralizados na média mensal.

Já em CRECESB (2020) são disponibilizadas estimativas da irradiação solar em qualquer ponto do território nacional utilizando informações de Pereira et al. (2017). Este banco de dados, construído a partir de uma série temporal de imagens de satélite obtidas durante 17 anos, tem como principal objetivo o apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e conta com informações de mais de 72.000 pontos no território brasileiro (CRECESB, 2020). A última atualização do sistema, denominado SunData, foi realizada no ano de 2017, de modo que seja possível obter-se estimativas da média mensal da irradiação solar diária. As estimativas são fornecidas em  $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ . Os dados de CRECESB (2020) foram obtidos a partir de análises temporais consistentes.

Além da irradiação solar, pode-se levar em conta outros parâmetros para avaliar o potencial de geração fotovoltaica:

- a orientação dos painéis fotovoltaicos, dependente do ângulo de inclinação do painel em relação ao plano horizontal ( $\beta$ ) e do ângulo entre a projeção no plano horizontal da direção normal à superfície do painel e o Norte geográfico, denominado Ângulo Azimutal da Superfície ( $Z_S$ ) (KALOGIROU, 2014);
- a posição do Sol durante o dia, que depende da localização (latitude e longitude) da região de interesse (KALOGIROU, 2014);
- a área total disponível para instalação de painéis fotovoltaicos e a eficiência de conversão da irradiação solar em energia elétrica.

As definições detalhadas desses parâmetros e a maneira em que foram utilizadas para a estimativa do potencial de geração de energia fotovoltaica serão descritas na próxima seção.

## 4.2 METODOLOGIA

Nesta seção serão definidos os parâmetros utilizados para estimar a geração fotovoltaica, o potencial de suprimento energético e a metodologia utilizada para obter as estimativas. Para aplicação da metodologia e análise da viabilidade de implementação do modelo proposto, foram avaliados 16 municípios, pertencentes a diferentes classes populacionais, do interior do estado de São Paulo que são mostrados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Municípios avaliados no estudo.

Id	Município	População
1	Águas de São Pedro	3.380
2	Águas de Lindóia	18.599
3	Ourinhos	112.711
4	Bauru	374.272
5	Piracicaba	400.949
6	Jundiaí	414.810
7	Santos	432.957
8	São José do Rio Preto	456.245
9	Sorocaba	671.186
10	Ribeirão Preto	694.534
11	Osasco	696.850
12	São José dos Campos	713.943
13	Santo André	716.109
14	São Bernardo do Campo	833.240
15	Campinas	1.194.094
16	Guarulhos	1.365.899

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019).

### 4.2.1 ORIENTAÇÃO DOS PAINÉIS

A orientação dos painéis fotovoltaicos foi avaliada segundo o ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal ( $\beta$ ) e o ângulo entre a projeção no plano horizontal da direção normal à superfície do painel e o Norte geográfico, denominado Ângulo Azimutal da Superfície ( $Z_S$ ) (KALOGIROU, 2014).

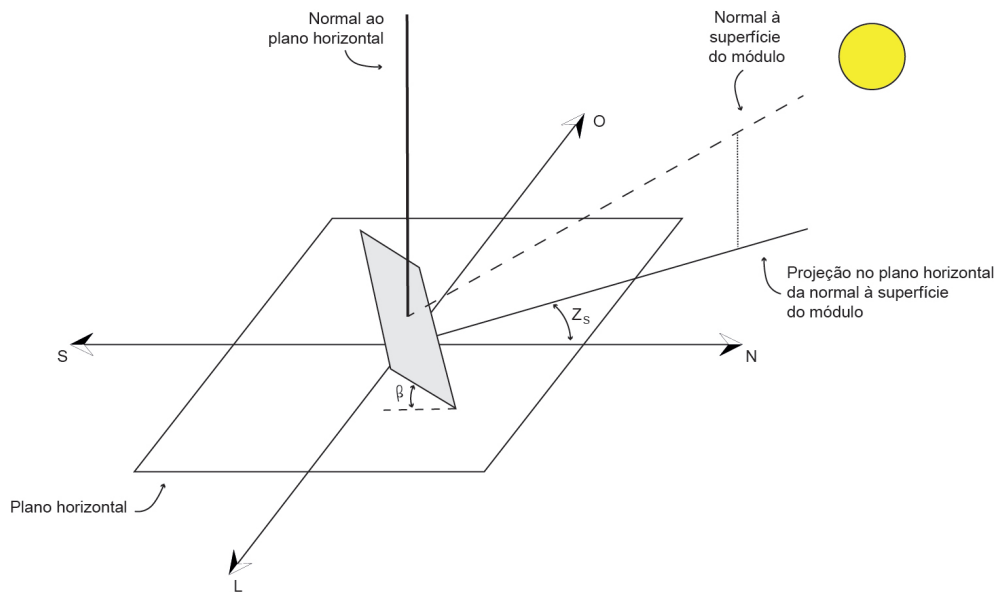
O ângulo de inclinação do painel ( $\beta$ ) é definido tendo como origem o plano horizontal da superfície em que se encontra o painel (KALOGIROU, 2014). A Figura 17 ilustra este parâmetro.

No presente estudo, o parâmetro  $\beta$  será sempre igual ao valor da latitude do município em questão, sabendo que esta inclinação é considerada ótima pois permite que os raios

solares incidam na superfície de forma a se obter a maior média possível ao longo do ano (TOLMASQUIM, 2016).

O ângulo azimutal da superfície ( $Z_S$ ) descreve a rotação do painel em torno do eixo normal ao plano horizontal em que o painel se encontra. Este ângulo é formado pela projeção no plano horizontal da direção normal à superfície do painel e pelo eixo Norte, sendo a origem o Norte geográfico e o sentido Oeste tomado como positivo. A Figura 17 ilustra os parâmetros  $Z_S$  e  $\beta$ .

**Figura 17:** Ângulos  $\beta$  e  $Z_S$ , de inclinação e azimutal da superfície do painel, respectivamente.



Fonte: O autor. Adaptado de Kalogirou (2014).

## 4.2.2 POSIÇÃO DO SOL

A posição do Sol foi modelada segundo parâmetros dados num sistema tridimensional de representação. Estes parâmetros são ângulos –  $\alpha$  e  $Z$  – que aqui foram adaptados para o sistema de coordenadas esféricas (STEWART, 2015). A Figura 18 ilustra os ângulos  $\alpha$  e  $Z$ .

O ângulo  $\alpha$ , definido como ângulo da altitude solar, é dado por (KALOGIROU, 2014)

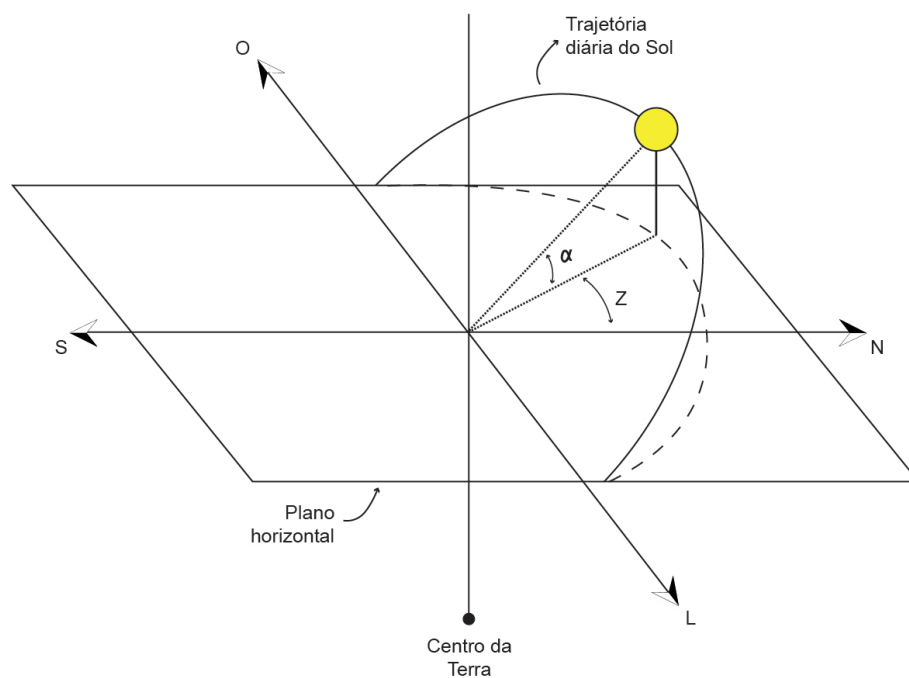
$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (1)$$

em que

- $L$  é a latitude local do município em questão, com valores ao Norte do equador sendo positivos e, ao Sul, negativos;
- $\delta$  é a declinação solar, definida como o ângulo entre os planos equatorial e eclíptico da Terra que é aquele em que a Terra está contida enquanto orbita o Sol;

- $h$  é o ângulo horário, definido como aquele em que a Terra teria de girar de modo que seu centro (ponto  $O$ ), o ponto da localidade de interesse (ponto  $P$ ) e o centro do Sol estivessem contidos num mesmo plano, em determinado horário do dia, conforme ilustrado na Figura 19 que também ilustra os parâmetros  $L$ ,  $\delta$  e  $h$ . Tais parâmetros, por sua vez, são funções de variáveis associadas à localidade de interesse (latitude e longitude) e à época do ano, que depende da declinação solar ( $\delta$ ) (KALOGIROU, 2014).

**Figura 18:** Ângulos  $\alpha$  e  $Z$ , que descrevem a trajetória do Sol.



Fonte: O autor. Adaptado de Kalogirou (2014).

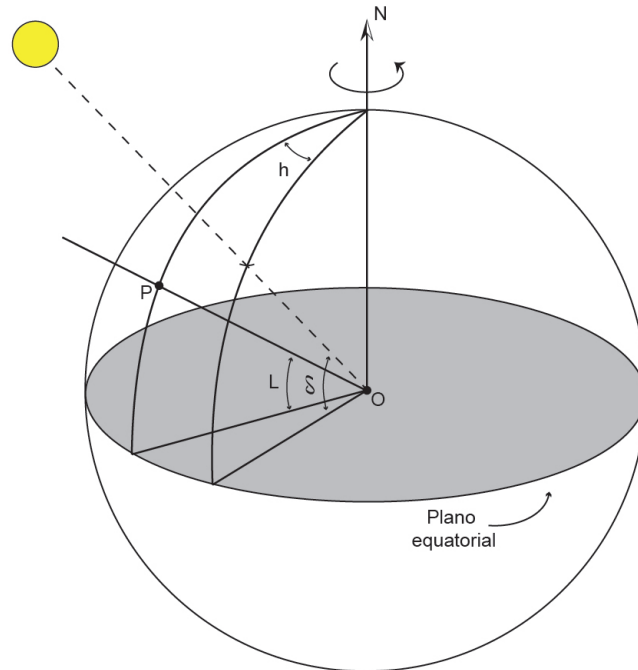
A declinação solar ( $\delta$ ) varia de acordo com a posição da Terra em relação ao Sol, e portanto conforme a época do ano, sendo dada por (KALOGIROU, 2014):

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (2)$$

em que  $N$  representa um dia específico do ano, podendo assumir valores no conjunto  $\{1, 2, \dots, 365\}$ <sup>1</sup>. No presente trabalho, a estimativa do potencial de geração fotovoltaica foi obtida para cada mês do ano, a partir de respectivos dias médios segundo Kalogirou (2014), mostrados na Tabela 6.

O ângulo da altitude solar ( $\alpha$ ) também depende do ângulo horário ( $h$ ) associado à localização de interesse, que varia de acordo com a hora padrão local – aquela observada no relógio. O ângulo  $h$  para um determinado ponto da superfície terrestre é dado por (KALOGIROU, 2014)

<sup>1</sup>No caso de anos bissextos,  $N$  também pode assumir o valor 366.

**Figura 19:** Ilustração dos parâmetros solares  $L$ ,  $\delta$  e  $h$ .

Fonte: O autor. Adaptado de Kalogirou (2014).

**Tabela 6:** Data e dia médio recomendado para cada mês.

Mês	Dia Médio	
	Data	Número ( $N$ )
Janeiro	17	17
Fevereiro	16	47
Março	16	75
Abril	15	105
Maio	15	135
Junho	11	162
Julho	17	198
Agosto	16	228
Setembro	15	258
Outubro	15	288
Novembro	14	318
Dezembro	10	344

Fonte: Kalogirou (2014).

$$h = (HSA - 12) \times 15 \quad (3)$$

em que HSA é a hora solar aparente, baseada no movimento angular do Sol no céu. O momento em que o Sol cruza o meridiano do observador é considerado o meio dia solar aparente. O parâmetro  $h$  assume valores negativos para o período da manhã, positivos para o período da tarde e zero ao meio dia solar, isto é, quando  $HSA=12$ .

A HSA depende de outros fatores, incluindo a hora padrão local, segundo a equação (KALOGIROU, 2014)

$$HSA = HPL + ET \pm 4(LP - LL) \quad (4)$$

em que

- HPL é o horário padrão local, isto é, a hora local observada no relógio;
- ET é a equação do tempo;
- LP é a longitude padrão, isto é, a faixa longitudinal de horário – o fuso horário – em que se encontra o local em questão;
- LL é a longitude local, isto é, a longitude exata do local em questão.

O sinal do terceiro membro da equação (4) é positivo se a localidade de interesse estiver a Leste do meridiano de Greenwich e negativo se estiver a Oeste (KALOGIROU, 2014).

Assim sendo, tem-se que a hora solar aparente (HSA) e, conseqüentemente, o ângulo horário (h) variam em função do horário padrão local (HPL). Os valores de HPL das localidades de interesse foram obtidos a partir do horário de nascer do Sol ( $h_{NS}$ ), da duração do dia (Dd) e do horário de pôr do Sol ( $h_{PS}$ ) segundo as seguintes expressões (KALOGIROU, 2014)

$$\cos(h_{NS}) = \tan(L) \tan(\delta), \quad (5)$$

$$Dd = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan(L) \tan(\delta)] \quad (6)$$

e

$$\cos(h_{PS}) = h_{NS} + Dd. \quad (7)$$

Outro parâmetro que influencia na variação de HSA é a equação do tempo (ET), como pode ser visto na equação (4). Este parâmetro consiste na variação que existe na duração de um dia, que tem em média 24 h ao longo de um ano, devido ao movimento da Terra em torno do Sol (KALOGIROU, 2014). Logo, ET é um fator de correção, dado em minutos, da duração de determinado dia do ano, e é dado por

$$ET = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(2B) - 1,5 \sin(B), \quad (8)$$

em que  $B$  depende do número do dia do ano ( $N$ ) a partir da relação

$$B = (N - 81) \frac{360}{364}. \quad (9)$$

Deste modo a partir do horário de nascer do Sol ( $h_{NS}$ ), da duração do dia (Dd) e do horário de pôr do Sol ( $h_{PS}$ ) foram obtidos valores de horário padrão local (HPL) minuto a minuto. Conseqüentemente os valores para a hora solar aparente (HSA) e ângulo horário (h), para cada localidade de interesse, foram obtidos na mesma frequência.

Com isso foram também obtidos valores do ângulo de altitude solar ( $\alpha$ ) – ver equação (1) – por minuto para o dia típico médio de cada mês, dados na Tabela 6, para os municípios de interesse.

O ângulo azimutal solar ( $Z$ ), o segundo parâmetro que define a posição do Sol e está ilustrado na Figura 18, tem como origem o Norte e o sentido positivo o Oeste, e pode ser obtido a partir da seguinte equação (KALOGIROU, 2014):

$$\sin(Z) = \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (10)$$

desde que

$$\cos(h) > \frac{\tan(\delta)}{\tan(L)}.$$

Caso a condição acima não seja satisfeita, tem-se que o Sol está posicionado do lado Sul do plano perpendicular ao plano horizontal na linha Leste-Oeste e

$$Z = -\pi + |Z|$$

para as horas da manhã ( $h < 0$ ) e

$$Z = \pi - Z$$

para as horas da tarde ( $h > 0$ ).

Desta forma, a posição aparente do Sol no céu pode ser obtida usando-se as equações (1) e (10).

### 4.2.3 ÁREA DISPONÍVEL EM TELHADOS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO

Neste trabalho, a área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos foi considerada como sendo a área de telhados da localidade de interesse.

A estimativa dessa área foi realizada através de processamento digital de imagens (PDI) com o auxílio do *software Matlab*<sup>TM</sup>. As imagens utilizadas foram obtidas do *software* gratuito *Google Earth Pro*. Na Figura 20, tem-se um exemplo de uma das imagens coletadas.

A aquisição das imagens via *Google Earth Pro* foi realizada de forma homogênea, com

**Figura 20:** Exemplo de amostra de imagem para estimar a área de telhados.



Fonte: Imagem coletada via *Google Earth Pro*.

parâmetros de “resolução da imagem”, “inclinação” e “distância do ponto de observação” mantidos constantes. O parâmetro “resolução” das imagens coletadas foi definido em  $4800 \times 2220$  (maior valor possível permitido no *software*) e o parâmetro “distância do ponto de observação” foi definido em 1 km. O parâmetro “inclinação” foi reiniciado antes da aquisição de cada imagem, de modo que o plano de observação ficasse sempre paralelo ao plano da região observada. As imagens obtidas apresentam resolução espacial de 25 cm.

Para cada município estudado foi coletado um conjunto amostral característico composto por imagens da sua região urbanizada. A estimativa da área de telhados em cada imagem foi feita a partir da segmentação dos pixels com base na coloração alaranjada característica dos telhados considerados nos conjuntos amostrais, calculando-se então a razão entre o número de pixels segmentados e o número total de pixels da imagem. Com isso obteve-se a proporção de pixels que representam telhados em cada imagem analisada. A Figura 21, mostra o resultado do processo de segmentação aplicado na imagem na Figura 20.

Ressalta-se que não foi segmentada toda a região urbana dos municípios, mas sim as imagens características da distribuição de uso e ocupação do solo para cada município e isto foi realizado a partir de uma interpretação visual das imagens das várias partes de cada cidade.

Assim, para cada município  $k$  estudado foi coletado um conjunto amostral com  $n$  imagens e obtidas as respectivas  $n$  proporções de pixels segmentados. Com isso, para cada imagem obteve-se a proporção de pixels segmentados com relação ao total de pixels a partir da seguinte expressão:

**Figura 21:** Resultado, em branco, da segmentação dos pixels de telhados na imagem da Figura 20, tomada como exemplo.



Fonte: Imagem coletada via *Google Earth Pro*.

$$T_i^k = \frac{N_{\text{seg}}^i}{N_{\text{total}}^i}, \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \text{ e } k = 1, 2, \dots, 16 \quad (11)$$

em que

- $T_i^k$  é a proporção de pixels de telhado segmentados para a imagem  $i$  no município  $k$ ;
- $N_{\text{seg}}^i$  é o número de pixels segmentados da imagem  $i$ ;
- $N_{\text{total}}^i$  é o número total de pixels da imagem  $i$ ;
- $n$  é o tamanho da amostra de imagens coletadas para o município  $k$ .

Em seguida, para cada município  $k$  foi obtida a média aritmética das  $n$  proporções obtidas, cada qual referente a uma imagem componente do conjunto amostral do respectivo município, da seguinte forma:

$$\bar{T}^k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^k, \quad \text{com } k = 1, \dots, 16 \quad (12)$$

em que

- $k$  é o índice que indica o município a ser avaliado, variando de 1 a 16;

- $\bar{T}^k$  é a proporção média de pixels de telhado segmentados para o município  $k$ ;

e, por fim, obtém-se a área estimada de telhados para cada município  $k$  multiplicando-se a respectiva proporção média de pixels de telhado segmentados pela área urbanizada deste município, obtida em IBGE (2020), como se segue.

$$AT^k = \bar{T}^k \times A_{\text{urb}}^k, \quad \text{com } k = 1, 2, \dots, 16 \quad (13)$$

em que

- $AT^k$  é a área de telhados estimada para o município  $k$ , dada em  $\text{km}^2$ ;
- $A_{\text{urb}}^k$  é a área urbanizada do município  $k$ , dada em  $\text{km}^2$ .

Deste modo, a partir da equação (13), foi obtida uma estimativa da área de telhados para cada município estudado.

A eficiência de conversão da energia do Sol em energia fotovoltaica foi definida como sendo de 15% devido ao fato de que a maioria dos painéis fotovoltaicos que tem sido comercializados utilizam do silício como material semicondutor, e esta é a eficiência estimada para painéis deste tipo (TOLMASQUIM, 2016; PINHO; GALDINO, 2014).

#### 4.2.4 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E POTENCIAL DE SUPRIMENTO

Conhecidas as informações citadas na seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 torna-se possível estimar a capacidade de geração de energia fotovoltaica para os municípios envolvidos no estudo e avaliar o potencial de suprimento do consumo de energia elétrica a partir da geração fotovoltaica.

Considerando a eficiência de conversão de 15%, a irradiação solar mensal média anual e a área de telhados avaliada, estimou-se para cada município  $k$ , no mês  $m$ , a geração fotovoltaica em potencial a partir da Equação (14):

$$F_m^k = I_m^k \times AT^k \times 10^6 \times 0,15 \times H_m^k \quad \text{com } m = 1, \dots, 12 \text{ e } k = 1, \dots, 16 \quad (14)$$

em que

- $F_m^k$  é a quantidade de energia fotovoltaica gerada em potencial no município  $k$  para o mês  $m$ ;
- $I_m^k$  é a irradiação solar mensal média dada em  $\text{kWh}/\text{m}^2$ , obtida para o município  $k$  a partir da média mensal da irradiação solar diária, dada em  $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ , multiplicada pelo número de dias do mês  $m$ ;
- $AT^k$  é a área de telhados estimada para o município  $k$ , dada em  $\text{km}^2$ ;

- o fator  $10^6$  corresponde à conversão da medida de área de  $\text{km}^2$  para  $\text{m}^2$ ;
- o fator 0,15 corresponde à eficiência de conversão da irradiação solar em energia fotovoltaica;
- $H_m^k$  é o fator de incidência solar direta média nos painéis para o município  $k$  no mês  $m$ , assumindo valores entre 0 e 1.

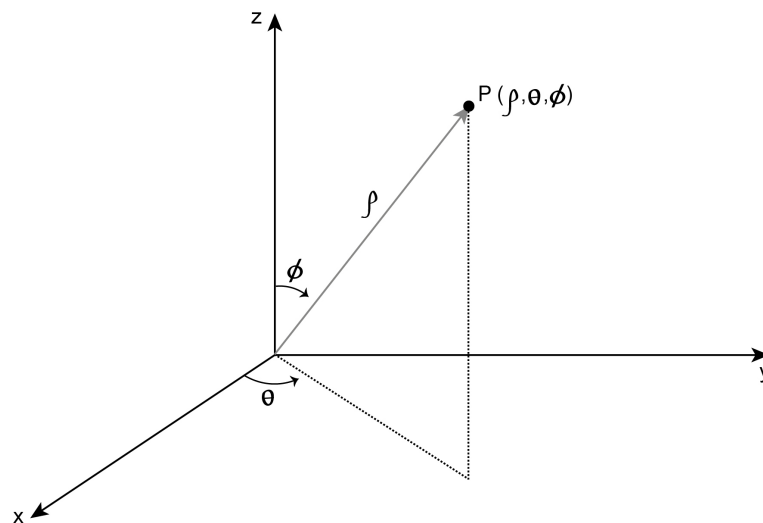
Assim, tem-se que a estimativa da geração fotovoltaica depende da irradiação solar mensal média, da área de telhados e do fator de incidência solar direta média nos painéis, associados a cada município envolvido no estudo. Importante destacar que tal estimativa foi obtida para cada mês do ano, em cada município estudado.

O fator de incidência solar direta média nos painéis ( $H_m^k$ ) consiste na porcentagem média do fluxo solar incidente de forma perpendicular à superfície dos painéis fotovoltaicos, obtida minuto a minuto para cada dia médio de cada mês, tendo sido calculado em cada caso a partir da análise da posição relativa entre o vetor posição do Sol e o vetor na direção perpendicular à superfície do painel.

Este índice foi utilizado para levar-se em conta a variação na posição dos painéis em virtude da posição dos telhados. Para isso, foram tomados valores médios para  $H_m^k$  a partir da variação dos parâmetros que descrevem a posição dos painéis com relação ao plano horizontal sobre o qual se posicionam. Este processo é descrito mais adiante no texto, ainda nesta seção.

Para avaliar estes vetores, os parâmetros de posição do Sol e orientação dos painéis fotovoltaicos foram adaptados para o sistema de coordenadas esféricas (STEWART, 2015). Neste sistema, são utilizados três parâmetros para definir um ponto, e conseqüentemente um vetor, no espaço de acordo com a representação mostrada na Figura 22, onde pode-se observar que um ponto qualquer e da mesma forma um vetor qualquer, é representado no sistema de coordenadas esféricas a partir dos parâmetros  $\rho$ ,  $\theta$  e  $\phi$ .

**Figura 22:** Sistema de coordenadas esféricas.



Fonte: O autor.

O parâmetro  $\rho$  consiste na distância  $OP$ , isto é, na distância da origem do sistema ao ponto  $P$  da extremidade do vetor. O parâmetro  $\theta$  é o ângulo formado pela projeção

do segmento  $\overline{OP}$  no plano  $xy$  e pelo eixo  $x$ , sendo o sentido anti-horário tomado como positivo e o parâmetro  $\phi$  representa o ângulo formado pelo segmento  $OP$  e o eixo  $z$ , com  $0 \leq \phi \leq 180^\circ$ .

A relação entre as coordenadas no sistema cartesiano e no sistema esférico é dada por:

$$x = \rho \sin(\phi) \cos(\theta),$$

$$y = \rho \sin(\phi) \sin(\theta),$$

$$z = \rho \cos(\phi).$$

Deste modo os parâmetros  $\beta$  e  $Z_S$ , descritos na seção 4.2.1, e  $\alpha$  e  $Z$ , descritos na seção 4.2.2, foram adaptados para o sistema de coordenadas esféricas tornando possível representar os vetores normal ao painel e posição do Sol e assim avaliar o fator de incidência solar direta média nos painéis ( $H_m^k$ ).

Cada vetor normal ao painel foi representado em coordenadas esféricas com a coordenada  $\theta$  assumindo os valores de  $Z_S$  e a coordenada  $\phi$  assumindo o valor de  $\beta$ . Pelo fato de que o interesse aqui é na direção dos vetores, em ambos os casos ambos os vetores foram considerados como unitários, isto é,  $\rho = 1$ . Logo, cada vetor normal à superfície do painel,  $\vec{n}$ , foi representado por

$$\vec{n} = (1, Z_S, \beta).$$

De maneira similar, cada vetor posição do Sol,  $\vec{s}$ , foi representado em coordenadas esféricas com o parâmetro  $\theta$  assumindo os valores de  $Z$  e o parâmetro  $\phi$  assumindo os valores de  $90 - \alpha$ :

$$\vec{s} = (1, Z, 90 - \alpha).$$

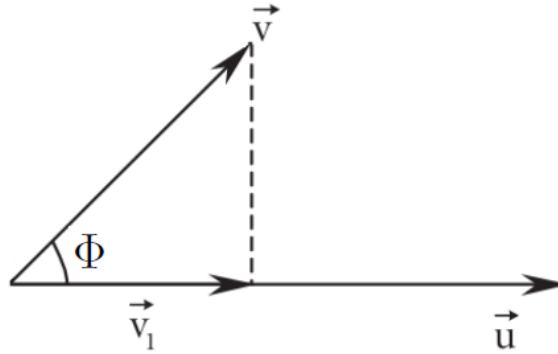
O fator de incidência solar direta média nos painéis ( $H_m^k$ ) para cada mês, na localidade de interesse, foi obtido a partir do módulo da projeção ortogonal do vetor  $\vec{s}$  sobre o vetor  $\vec{n}$ , calculado a partir do módulo do produto escalar entre estes vetores. Este módulo indica o comprimento da projeção do vetor  $\vec{s}$  sobre o vetor  $\vec{n}$  (WINTERLE, 2014).

A Figura 23 ilustra a projeção ortogonal de um vetor qualquer  $\vec{v}$  sobre um vetor qualquer  $\vec{u}$ , em que  $\Phi$  é o ângulo entre eles.

De modo a não fixar uma orientação específica dos painéis fotovoltaicos, numa inclinação fixa  $\beta$ , ao avaliar o potencial de geração, o vetor normal à superfície dos painéis ( $\vec{n}$ ) foi obtido para cada valor do ângulo azimutal da superfície ( $Z_S$ ) variando de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , num passo de  $15^\circ$  (ver seção 4.2.1), na sequência de valores  $\{0, 15, 30, \dots, 360\}$ . Com isso, obteve-se  $\vec{n}$  em 25 posições distintas, possibilitando simular de maneira abrangente as possíveis orientações dos painéis.

Fixando uma posição específica de  $\vec{n}$  para cada valor de  $Z_S$ , o vetor  $\vec{s}$ , cujas coordenadas variam em função do ângulo horário ( $h$ ) que, por sua vez, depende do horário padrão

**Figura 23:** Projeção ortogonal do vetor  $\vec{v}$  sobre o vetor  $\vec{u}$ , indicada por  $\vec{v}_1$ .



Fonte: Adaptada de Winterle (2014).

local (HPL), teve as posições obtidas a cada minuto do dia médio de cada mês utilizando as equações (5), (6) e (7). Assim, foram calculados os respectivos módulos das projeções ortogonais de  $\vec{s}$  sobre  $\vec{n}$ .

O fator  $H_m^k$  foi então obtido tomando-se a média do módulo das projeções de  $\vec{s}$  sobre  $\vec{n}$  para cada valor de  $Z_S$  ao longo de cada respectivo dia médio dos meses do ano, variando o vetor posição do Sol minuto a minuto, com o índice  $m = 1, 2, \dots, 12$  indicando o mês para o qual o fator  $H_m^k$  foi obtido. Com isso, para cada município  $k$  estudado, foram obtidos 12 valores de  $H_m^k$ .

Assim, o fator de incidência solar direta média nos painéis ( $H_m^k$ ) é dado por:

$$H_m^k = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \left\{ \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t |\vec{n}_i \cdot \vec{s}_j| \right\} \quad (15)$$

em que

- o índice  $i$  está associado aos elementos da sequência de variação de  $Z_S$  dada por  $\{0, 15, 30, \dots, 360\}$ ;
- $t$  indica o número de minutos de duração do dia médio do mês  $m$ ;
- $|\vec{n}_i \cdot \vec{s}_j|$  é o módulo do produto escalar entre os vetores  $\vec{n}_i$  e  $\vec{s}_j$ .

Levando em conta que ambos os vetores,  $\vec{s}$  e  $\vec{n}$ , são unitários tem-se que  $H_m^k$  será sempre um valor menor ou igual a 1. Além disso, sempre que o ângulo entre  $\vec{s}$  e  $\vec{n}$  for igual ou maior que  $90^\circ$  o fator  $H_m^k$  foi considerado zero pois, neste caso, o vetor posição do Sol não está incidindo na superfície frontal do painel.

A partir da estimativa de geração de energia fotovoltaica também foram calculadas estimativas do suprimento de energia elétrica para cada município. Foram calculadas estimativas mensais e anuais de suprimento fotovoltaico.

As estimativas mensais foram calculadas de acordo com a expressão dada por

$$E_m^k = 100 \times \frac{F_m^k}{C_m^k} \quad (16)$$

em que

- $E_m^k$  é o suprimento energético para o mês  $m$ , em porcentagem, do consumo mensal médio pela geração fotovoltaica mensal estimada do município  $k$ ;
- $F_m^k$  é estimativa para o mês  $m$  da quantidade de energia fotovoltaica gerada dada em kWh, obtida a partir da equação (14), para o município  $k$ ;
- $C_m^k$  é o consumo mensal médio nos períodos de Sol, dado em kWh, para o mês  $m$  no município  $k$ .

É importante deixar claro que no estudo não foram consideradas quaisquer formas de armazenamento da energia e, por isso, considerou-se apenas a energia fotovoltaica gerada nos períodos de Sol. Isso se reflete no parâmetro  $C_m^k$ . Este parâmetro consiste no consumo mensal médio observado para o município de interesse que ocorreu nos períodos de Sol, e foi obtido como

$$C_m^k = Q_m^k \times K_m^k \quad (17)$$

em que

- $K_m^k$  é a proporção média de consumo que ocorreu nos períodos de Sol no mês  $m$  para o município  $k$ , assumindo valores entre 0 e 1;
- $Q_m^k$  é o consumo médio no mês  $m$ , observado para o município  $k$ , dado em kWh.

O consumo médio mensal para o município  $k$  no mês  $m$  ( $Q_m^k$ ) foi obtido tomando o consumo anual ocorrido nos períodos de Sol do respectivo município, dado em São Paulo (2020), como se segue:

$$Q_m^k = C_{\text{ano}}^k \times \frac{N_m}{365} \quad (18)$$

em que

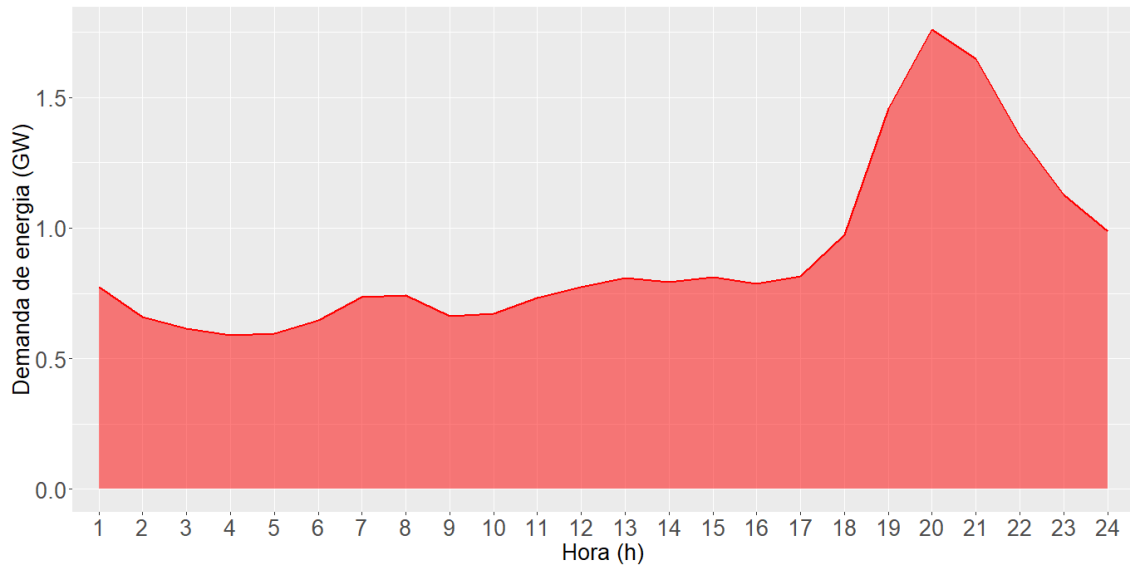
- $C_{\text{ano}}^k$  é o consumo anual médio nos períodos de Sol, dado em kWh, para o município  $k$  – ver equação (22);
- $N_m$  é o número de dias do mês  $m$ .

A razão  $N_m/365$  indica, portanto, a respectiva proporção do consumo anual para o mês  $m$ .

O parâmetro  $K_m^k$  foi obtido mês a mês para cada município estudado a partir de dados da curva de carga residencial típica disponibilizada em CPFL (2012). Esta curva ilustra

a demanda de energia observada num período de 24 h para consumidores exclusivamente residenciais de baixa tensão da concessionária CPFL Paulista, e é mostrada na Figura 24. Nota-se que há um pico na demanda no chamado período de ponta, que vai das 18h às 22h.

**Figura 24:** Curva de carga típica de consumidores residenciais na faixa de baixa tensão da CPFL.



Fonte: O autor. Dados de CPFL (2012).

A partir da Figura 24 foi possível determinar a proporção da demanda, e consequentemente do consumo, em qualquer período do dia com relação à demanda total observada no mesmo dia através do cálculo de áreas abaixo da curva. Logo, definindo o período em que ocorre a incidência de luz solar, tornou-se possível o cálculo da proporção de demanda residencial neste período. Com isso foi obtida a proporção do consumo residencial que ocorre nos períodos em que houve a incidência de luz solar com relação ao consumo total no período de 24 h.

O período de Sol para cada localidade de interesse, no dia médio de cada mês, foi obtido a partir das Equações (5) e (6), e as áreas abaixo da curva, tanto a total quanto nos períodos de Sol, foram obtidas utilizando o Método dos Trapézios de integração numérica (ARENALES; DAREZZO, 2017). A proporção do consumo ocorrido nos períodos de Sol no dia médio de cada mês foi obtida pela razão entre a área abaixo da curva típica de demanda nos respectivos períodos de Sol e a área total abaixo da mesma curva.

Deste modo, o parâmetro  $K_m^k$  foi obtido, para cada município  $k$  no mês  $m$ , tomando-se a razão  $AS_m^k/A_m^k$  para cada mês do ano:

$$K_m^k = \frac{AS_m^k}{A_m^k} \quad \text{com } m = 1, \dots, 12 \text{ e } k = 1, \dots, 16 \quad (19)$$

em que

- $AS_m^k$  é a área abaixo da curva típica nos períodos de Sol do município  $k$ , para o mês  $m$ ;

- $A_m^k$  é a área total abaixo da curva típica, para o município  $k$  no mês  $m$ .

A estimativa de suprimento fotovoltaico anual foi obtida utilizando a soma das estimativas de geração mensais:

$$E_{\text{ano}}^k = 100 \times \frac{F_{\text{ano}}^k}{C_{\text{ano}}^k} \quad (20)$$

em que

- $E_{\text{ano}}^k$  é o suprimento energético, em porcentagem, do consumo anual pela geração fotovoltaica mensal estimada do município  $k$ ;
- $F_{\text{ano}}^k$  é a soma das estimativas mensais da quantidade de energia fotovoltaica gerada dada em kWh, obtida a partir da equação (14), para o município  $k$ .

O parâmetro  $F_{\text{ano}}^k$  é dado por

$$F_{\text{ano}}^k = \sum_{m=1}^{12} F_m^k \quad (21)$$

em que  $F_m^k$  é a quantidade de energia fotovoltaica gerada em potencial no município  $k$  para o mês  $m$  – ver equação (14).

O consumo anual que ocorreu nos períodos de Sol ( $C_{\text{ano}}^k$ ) observado para o município de interesse foi obtido por:

$$C_{\text{ano}}^k = K_{\text{ano}}^k \times Q_{\text{ano}}^k \quad (22)$$

onde

- $K_{\text{ano}}^k$  é a proporção média do consumo que ocorreu nos períodos de Sol para o município  $k$ , assumindo valores entre 0 e 1;
- $Q_{\text{ano}}^k$  é o consumo total anual observado para o município  $k$  segundo São Paulo (2020), dado em kWh.

O parâmetro  $K_{\text{ano}}^k$  para cada município  $k$  foi obtido a partir da média aritmética do utilizado na equação (17) ao longo do ano, isto é

$$K_{\text{ano}}^k = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} K_m^k \quad (23)$$

em que  $K_m^k$  é a proporção média de consumo que ocorreu nos períodos de Sol no mês  $m$  para o município  $k$  – ver equação (17).

Portanto, a partir das equações (17) e (22) foram obtidos consumos médios mensal e anual nos períodos de Sol para cada município  $k$ , e com isso, estimou-se o suprimento fotovoltaico mensal e anual a partir das equações (16) e (20) respectivamente.

## 4.2.5 TEMPO DE PAYBACK ENERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES ESTUFA

Com o objetivo de expandir o escopo das análises, foi também avaliado o uso de sistemas FV do ponto de vista da sustentabilidade, considerando os pontos ambiental, econômico e social (GOLDEMBERG, 2015).

As análises foram efetuadas usando os indicadores tempo de payback energético (TPBE), que pode ser definido como o período de tempo necessário para que um sistema gerador de energia renovável produza a mesma quantidade de energia – em termos de energia primária ou equivalente – que foi utilizada durante todo o processo produtivo do próprio sistema, desde a manufatura até o transporte, a instalação e o uso final, o descarte ou a reciclagem (FRISCHKNECHT et al., 2016; PENG; LU; YANG, 2013), e a taxa de emissão de gases de efeito estufa (GEE), que são aqueles responsáveis pelo aumento e pela manutenção de temperaturas elevadas na atmosfera – potencial de aquecimento global – expresso em massa equivalente de CO<sub>2</sub> (PENG; LU; YANG, 2013).

Ambos os indicadores supracitados levam em conta o consumo de energia e as emissões de gases durante todo o ciclo de vida dos sistemas FV, da manufatura ao transporte, à instalação e o uso final, além da destinação final após o fim do uso (PENG; LU; YANG, 2013).

Peng, Lu e Yang (2013) trazem uma rica revisão sobre TPBE e EGE relacionados ao ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, em que é possível se obter ótimas análises de dados associados a estes indicadores. Lima, Toledo e Bourikas (2021), Wu et al. (2017) e Yue, You e Darling (2014) estão entre outros trabalhos que também trazem dados neste sentido, sendo que Lima, Toledo e Bourikas (2021) considera plantas fotovoltaicas no Brasil.

Levando em conta que a maioria dos módulos fotovoltaicos comerciais são aqueles que tem como base células de silício, dos quais mono-cristalino (mono-Si) apresentam maior eficiência (TOLMASQUIM, 2016), foram aqui utilizados dados e informações associadas a este tipo de módulo.

O TPBE pode ser obtido a partir da seguinte expressão (YUE; YOU; DARLING, 2014; LIMA; TOLEDO; BOURIKAS, 2021):

$$TPBE = \frac{E_{input} + E_{BOS}}{E_{output}/\eta_G} \quad (24)$$

em que

- $E_{input}$  é o *input* de energia primária durante o ciclo de vida do sistema fotovoltaico, em kWh;
- $E_{BOS}$  é a energia necessária para o balanço dos componentes do sistema fotovoltaico (cabos, estruturas de suporte, componentes eletroeletrônicos), em kWh;
- $E_{output}$  a geração elétrica anual do sistema fotovoltaico, em kWh;
- $\eta_G$  fator de conversão médio de energia primária em eletricidade na rede, no país

em que o sistema fotovoltaico está instalado.

A taxa de EGE é avaliada em diferentes trabalhos que abordam a sustentabilidade de sistemas FV, como Lima, Toledo e Bourikas (2021), Lukac et al. (2016), Wild-Scholten (2013) e Peng, Lu e Yang (2013), e é utilizada como um parâmetro de avaliação da sustentabilidade sob o aspecto ambiental. Neste trabalho, a taxa de EGE para sistemas FV mono-Si foi tomada como sendo de 61 g CO<sub>2</sub>/kWh (PENG; LU; YANG, 2013). Para efeitos de comparação, a EGE quando se utiliza de fontes fósseis para geração elétrica é estimada em 685 g CO<sub>2</sub>/kWh (D'ADAMO, 2018).

O ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos também é avaliado em Peng, Lu e Yang (2013), e aqueles compostos por mono-Si indicam um período de 30 anos. Além disso, como a presente análise leva em conta sistemas residenciais, distribuídos e conectados à rede que, portanto, não necessitam de armazenamento de energia, foram levados em conta inversores de baixa capacidade, que apresentam um ciclo de vida de 15 anos (PENG; LU; YANG, 2013).

Em relação às estimativas de produção de energia e de eficiência do sistema fotovoltaico para efeitos de planejamento, devem ser levadas em conta informações técnicas o mais detalhadas e precisas possível de modo a potencializar a acurácia das estimativas (NERO et al., 2020).

Do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, é essencial levar-se em conta informações relacionadas a geração e demanda de energia. Considerando a geração FV distribuída no ambiente urbano, isso implica na utilização da área de telhados disponível em conjunto com dados de radiação solar (SANTOS et al., 2014; NERO et al., 2020). Além disso, a geração distribuída tende a reduzir prejuízos financeiros devido às possíveis discontinuidades no fornecimento, associadas à geração centralizada. Este tipo de informação pode ser útil no direcionamento para decisões de gestores públicos no sentido de um planejamento urbano sustentável (FONSECA; SCHLUETER, 2015; NERO et al., 2020).

Com relação ao aspecto social da sustentabilidade, os efeitos a curto prazo estão associados à EGE no que diz respeito à poluição do ar e seus potenciais danos à saúde, bem como seu potencial de aquecimento global (ONAT; BAYAR, 2010). Outro aspecto associado à sustentabilidade social diz respeito à segurança e à diversidade no suprimento de energia elétrica. Neste sentido, a intermitência no fornecimento elétrico representa uma característica importante no contexto da segurança no fornecimento (SANTOYO-CASTELAZO; AZAPAGIC, 2014), de forma que a geração FV distribuída pode apresentar contribuição consistente.

Dados associados aos potenciais FV físicos, geográficos e técnicos também podem ser associados à sustentabilidade social, relacionando-se a parâmetros sociais como demanda de energia per capita, densidade populacional, distribuição geográfica da população, bem como características físicas de edificações (área e altura) e sistemas FV já instalados (NERO et al., 2020).

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas de geração fotovoltaica e suprimento do consumo de energia foram realizadas a partir de uma base de dados contendo alguns parâmetros associados especificamente a cada município estudado. Estes parâmetros e seus respectivos valores são mostrados na Tabela 7. Destaca-se que, como todos os municípios estudados apresentam o mesmo fuso horário e portanto estão localizados na mesma longitude padrão à esquerda do meridiano de Greenwich, os valores de LP foram considerados sempre  $-45^\circ$  (ver equação (4)).

**Tabela 7:** Base de dados utilizada para a realização das estimativas de geração e suprimento fotovoltaicos.

Município	Id (k)	Consumo* (kWh)	Área urbanizada (km <sup>2</sup> )	Latitude (°)	Longitude (°)
Águas de São Pedro	1	15.742.645	1,68	-22,6001	-47,8758
Águas de Lindóia	2	47.548.279	3,86	-22,4767	-46,6250
Ourinhos	3	220.637.556	32,21	-22,9831	-49,8788
Bauru	4	945.093.221	75,59	-22,3154	-49,0704
Piracicaba	5	2.172.571.731	94,53	-22,7250	-47,7012
Jundiaí	6	2.125.353.740	101,28	-23,1865	-46,8888
Santos	7	1.415.303.882	34,08	-23,9618	-46,3264
São José do Rio Preto	8	1.240.150.040	108,3	-20,8202	-49,3767
Sorocaba	9	2.097.824.129	122,31	-23,5062	-47,4582
Ribeirão Preto	10	1.961.335.673	134,9	-21,1767	-47,8097
Osasco	11	1.508.952.024	60,42	-23,5317	-46,7973
São José dos Campos	12	1.920.109.529	120,19	-23,1791	-45,8956
Santo André	13	2.803.407.497	63,4	-23,6666	-46,5254
São Bernardo do Campo	14	2.604.462.952	83,58	-23,6944	-46,5616
Campinas	15	3.315.984.916	241,09	-22,9064	-47,0643
Guarulhos	16	3.364.850.329	144,65	-23,4635	-46,5241

\* Consumo observado para o ano de 2019.

Fonte: O autor. Dados de São Paulo (2020), IBGE (2020).

Os municípios envolvidos no estudo foram selecionados considerando-se a disponibilidade de dados, em diferentes classes populacionais, buscando-se aumentar a abrangência das análises.

#### 4.3.1 POSIÇÃO DO SOL

Conforme metodologia descrita na seção 4.2.2, a posição do Sol foi obtida em função dos parâmetros ângulo da altitude solar ( $\alpha$ ) e do ângulo azimutal solar ( $Z$ ).

O parâmetro  $\alpha$  varia em função da declinação solar ( $\delta$ ) e do ângulo horário ( $h$ ). Os valores obtidos de  $\delta$ , para cada respectivo dia médio de cada mês do ano, estão ilustrados na Tabela 8.

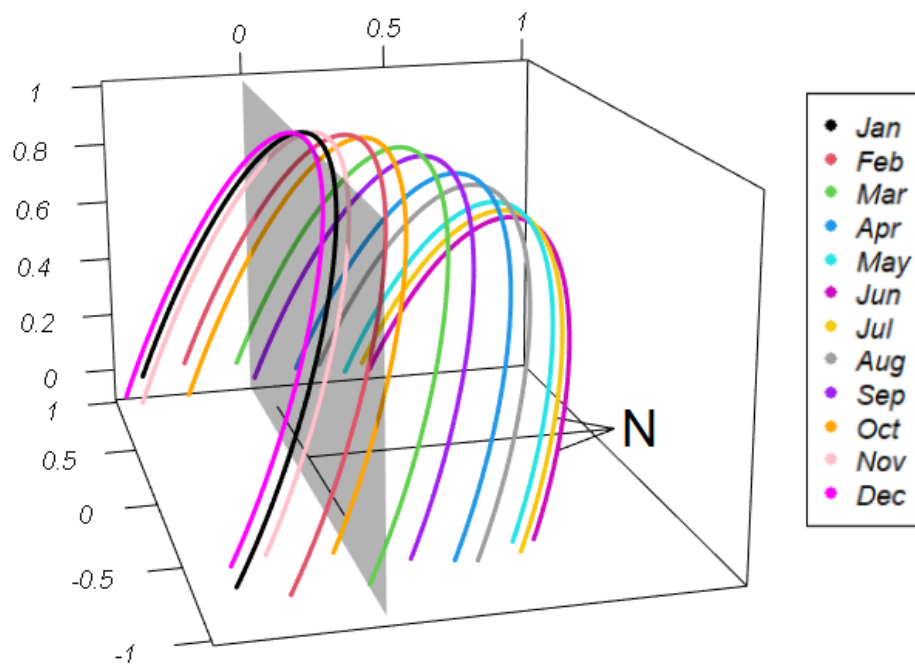
O ângulo horário ( $h$ ) varia conforme a hora padrão local (HPL) do dia, que foi obtida de acordo com os respectivos horários de nascer do sol ( $h_{NS}$ ) e por do sol ( $h_{PS}$ ) e da duração do dia (Dd).

**Tabela 8:** Data, dia médio recomendado para cada mês e respectiva declinação.

Mês	Dia Médio		
	Data	Número ( $N$ )	$\delta$ (graus)
Janeiro	17	17	-20,92
Fevereiro	16	47	-12,95
Março	16	75	-2,42
Abril	15	105	9,41
Maio	15	135	18,79
Junho	11	162	23,09
Julho	17	198	21,18
Agosto	16	228	13,45
Setembro	15	258	2,22
Outubro	15	288	-9,60
Novembro	14	318	-18,91
Dezembro	10	344	-23,05

Fonte: O autor. Dados de Kalogirou (2014).

A Figura 25 ilustra as trajetórias do Sol nos respectivos dias médios de cada mês do ano, para o município de Sorocaba. As trajetórias foram obtidas a partir da representação da extremidade do vetor posição do Sol para cada minuto do dia médio de cada mês.

**Figura 25:** Trajetória do Sol no dia médio de cada mês do ano, para o município de Sorocaba.

Fonte: O autor.

Em cinza, é mostrado o plano perpendicular à linha Leste-Oeste e a seta, contida no

plano horizontal, indica o Norte. Nota-se que nos meses de janeiro, novembro e dezembro o Sol fica a maior parte do dia no lado Sul do plano, implicando que painéis orientados nesta direção resultem numa maior incidência de irradiação direta em média para estes meses.

Porém, na média durante o ano, a orientação ao Norte dos painéis se mostra mais eficiente. Isso se justifica pelo fato de que, na maioria dos meses do ano, o Sol de fato está a maior parte do tempo no lado Norte do plano Leste-Oeste. Estes aspectos serão discutidos de forma mais detalhada na seção 4.3.3.

### 4.3.2 ÁREA DISPONÍVEL PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A área considerada como disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos foi obtida para cada município em função das respectivas área urbanizada e estimativa de área de telhados. A seção 4.2.3 detalha a metodologia utilizada.

Os dados de área urbanizada ( $A_{urb}^k$ ) de cada município foram obtidos em IBGE (2020) e são mostrados na Tabela 9, assim como a área total, a proporção média de telhados ( $\bar{T}^k$ ) e a área estimada de telhados ( $AT^k$ ).

**Tabela 9:** Valores de área, área urbanizada, proporção média de telhados e área estimada de telhados para os municípios estudados.

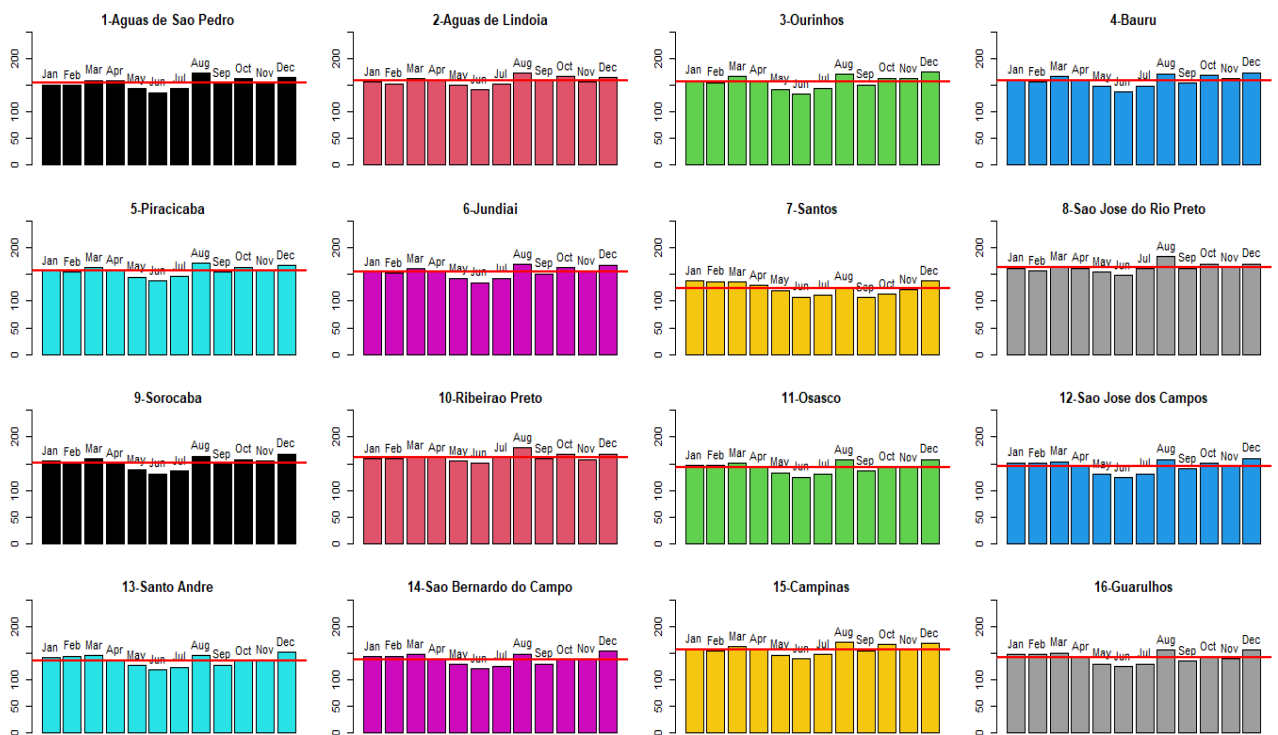
Município	Id (k)	Área (km <sup>2</sup> )	Área urbanizada (km <sup>2</sup> )	Proporção de telhados (%)	Área telhados (km <sup>2</sup> )
Águas de São Pedro	1	3,61	1,68	16,12	0,27
Águas de Lindóia	2	60,13	3,86	16,14	0,62
Ourinhos	3	295,82	32,21	28,50	9,18
Bauru	4	667,68	75,59	31,47	23,79
Piracicaba	5	1378,07	94,53	25,56	24,16
Jundiaí	6	431,21	101,28	18,44	18,67
Santos	7	281,03	34,08	27,87	9,50
São José do Rio Preto	8	431,94	108,3	31,39	34,00
Sorocaba	9	450,38	122,31	27,71	33,90
Ribeirão Preto	10	650,92	134,9	27,90	37,64
Osasco	11	64,95	60,42	33,25	20,09
São José dos Campos	12	1099,41	120,19	37,27	44,80
Santo André	13	175,78	63,4	34,73	22,02
São Bernardo do Campo	14	409,53	83,58	26,33	22,01
Campinas	15	794,57	241,09	24,96	60,17
Guarulhos	16	318,68	144,65	26,09	37,74

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), IBGE (2020).

### 4.3.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E POTENCIAL DE SUPRIMENTO

A estimativa de geração para cada município foi obtida através da equação (14), na seção 4.2.4, sendo função da irradiação solar mensal média ( $I_m^k$ ), dada em kWh/m<sup>2</sup> e do fator de incidência solar média nos painéis ( $H_m^k$ ) para os municípios estudados, por mês. Os valores obtidos para  $I_m^k$  são ilustrados na Figura 26, com as respectivas médias marcadas em retas horizontais em vermelho, e mostrados na Tabela 10, para os respectivos municípios e meses.

**Figura 26:** Irradiação mensal média em kWh/m<sup>2</sup> para os municípios estudados.



Fonte: O autor.

**Tabela 10:** Valores irradiação mensal média, em kWh/m<sup>2</sup> para os municípios estudados.

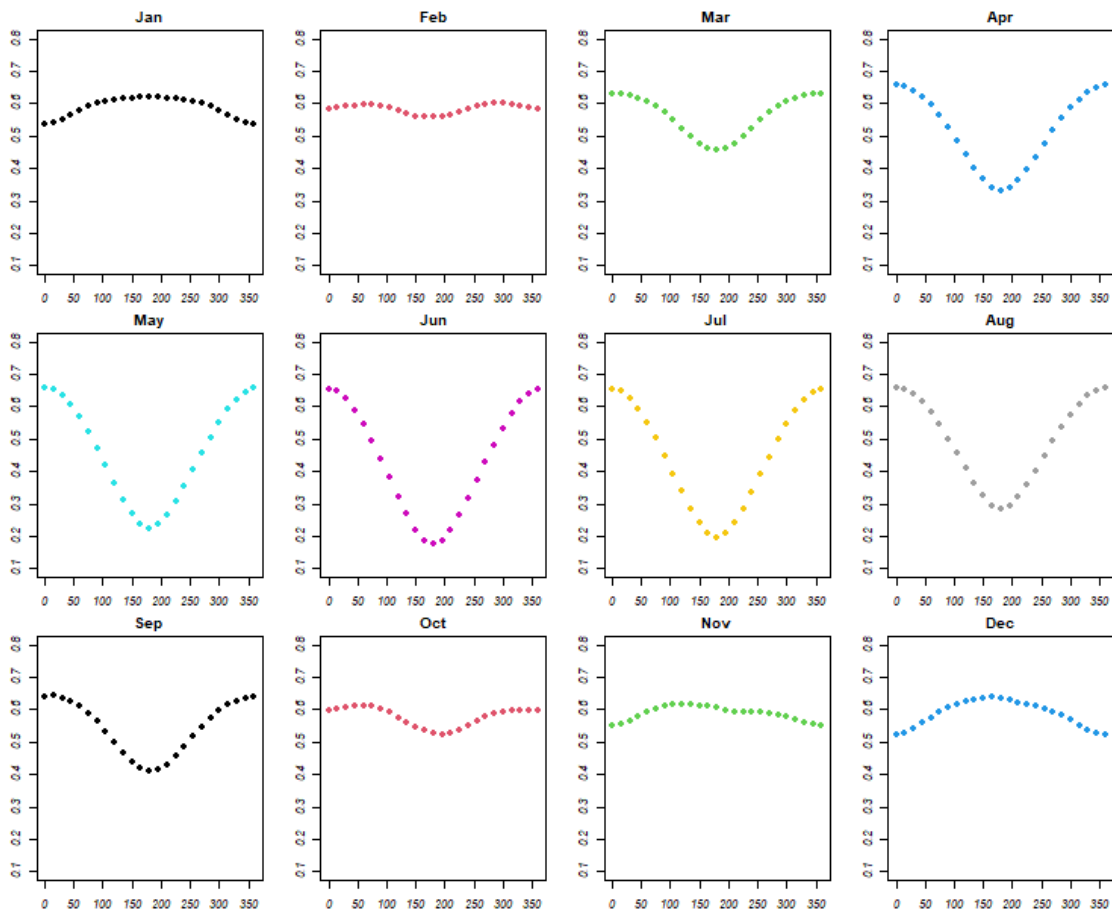
Id (k)	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1	150,97	150,08	159,34	157,50	143,22	136,50	143,53	172,67	152,70	161,82	153,00	164,30
2	155,93	153,16	162,75	159,60	150,04	141,00	151,28	172,05	157,80	166,47	156,30	164,92
3	159,03	154,84	166,16	159,30	142,29	133,50	143,22	170,50	150,90	163,37	162,30	174,53
4	159,34	156,52	166,47	160,20	147,25	137,40	148,49	171,74	153,60	168,95	162,90	173,60
5	156,55	154,00	162,75	157,50	145,39	138,00	145,70	170,50	153,90	163,99	157,20	167,40
6	154,07	152,32	160,89	154,50	142,29	135,00	141,98	168,95	151,50	162,75	155,70	168,02
7	138,26	136,92	135,47	129,30	120,28	108,00	110,98	126,17	107,10	113,15	120,60	137,33
8	161,82	156,24	164,30	162,00	154,38	148,80	160,58	183,83	162,00	169,88	162,60	169,88
9	155,62	153,44	158,72	151,20	138,88	131,40	136,71	163,99	148,20	158,10	154,50	168,64
10	159,03	158,48	163,99	161,70	155,00	150,30	160,58	179,18	159,00	167,09	158,40	168,64
11	146,94	147,28	150,66	143,40	132,99	124,80	129,89	157,17	135,90	144,15	142,80	158,41
12	151,59	151,20	153,76	144,90	130,51	124,50	130,82	157,79	139,80	151,28	144,30	160,27
13	141,36	143,92	144,77	136,80	126,48	117,90	123,69	145,70	127,50	134,54	135,90	151,90
14	143,22	144,20	146,63	138,60	128,03	120,00	125,24	148,49	129,90	136,40	138,00	153,45
15	157,17	153,72	162,13	157,50	146,01	138,60	146,94	170,19	154,80	166,16	156,00	168,33
16	147,25	147,56	150,35	142,80	129,89	124,80	129,58	155,93	135,00	143,22	139,50	155,93

Fonte: O autor. Dados de CRECESB (2020).

O fator de incidência solar direta média nos painéis ( $H_m^k$ ), para cada município  $k$  no respectivo mês  $m$ , foi obtido a partir da média mensal das projeções do vetor posição do Sol ( $\vec{s}$ ) sobre o vetor normal à superfície do painel ( $\vec{n}$ ), para cada minuto de cada dia médio mensal e variando o ângulo azimutal do painel  $Z_S$ , conforme descrito nas seções 4.2.1 e 4.2.2.

A Figura 27 mostra a variação da média das projeções de  $\vec{s}$  sobre  $\vec{n}$  (eixo vertical), no município de Sorocaba (9), em função do ângulo  $Z_S$  (eixo horizontal), para cada dia médio de cada mês do ano. Cada ponto nos gráficos mostra a média das projeções de  $\vec{s}$  sobre  $\vec{n}$  ao longo de cada dia médio, para cada valor fixado de  $Z_S$  na sequência  $\{0, 15, 30, \dots, 360\}$ .

**Figura 27:** Médias diárias das projeções de  $\vec{s}$  sobre  $\vec{n}$  em função de  $Z_S$  para cada mês, no município de Sorocaba.



Fonte: O autor.

Os valores de  $H_m^9$ , para cada mês, foram obtidos tomando a média aritmética dos valores no eixo vertical de cada gráfico na Figura 27. Os valores de  $H_m^k$  foram obtidos de forma equivalente, a partir dos respectivos valores ilustrados em cada gráfico na Figura 28.

Pode-se observar a relação entre a trajetória do Sol, descrita na Figura 25, e o comportamento das médias ilustrado na Figura 27. Lembrando que quando  $Z_S = 0^\circ$  tem-se que o painel está orientado com a superfície para o Norte, sendo o sentido positivo o Oeste, nota-se que para os meses de janeiro, novembro e dezembro os maiores valores das projeções são observados para  $Z_S$  próximo de  $180^\circ$ .

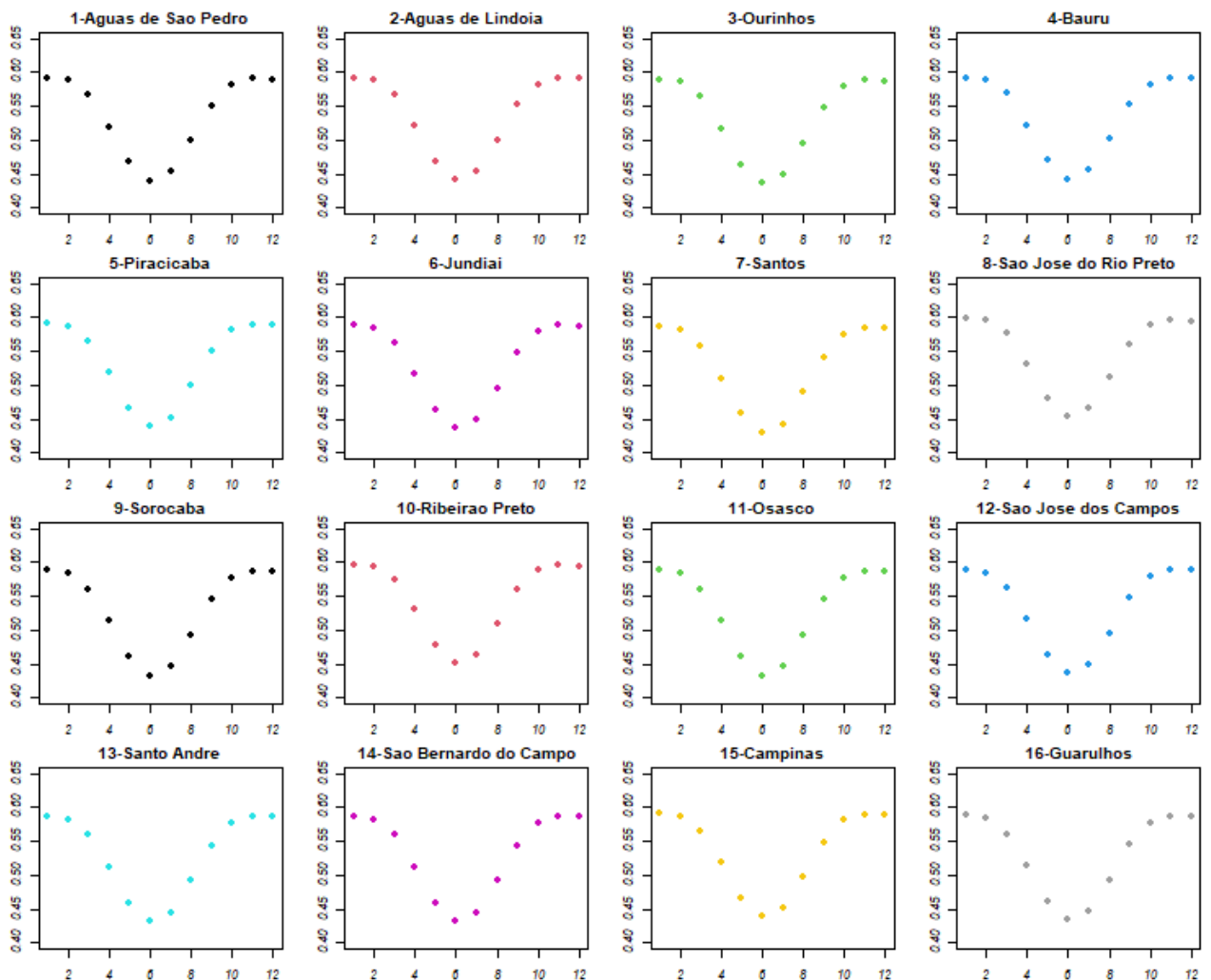
Isto se explica pelo fato de o Sol, nestes meses do ano, posicionar-se a maior parte do tempo ao lado Sul do plano Leste-Oeste, como foi mencionado na seção 4.3.1 e pode ser visto na Figura 25.

A Figura 28 mostra o comportamento do parâmetro  $H_m^k$  para todos os municípios estudados, com os valores dos eixos verticais indicando valores de  $H_m^k$  e sendo limitados entre 0,4 e 0,65. O eixo vertical indica os meses do ano. Percebe-se que o padrão de comportamento deste parâmetro ao longo do ano varia muito pouco de município para município.

Cada ponto nos gráficos da Figura 28 corresponde à média das projeções de  $\vec{s}$  sobre  $\vec{n}$  para todos os valores de  $Z_S$  em cada dia médio de cada mês. No caso de Sorocaba, por exemplo, cada ponto no respectivo gráfico da Figura 28 é a média dos valores observados em cada gráfico da Figura 27.

Com isso, nota-se que, em média, o ângulo  $Z_S$  orientado próximo ao Norte implica em um maior fluxo de irradiação solar direta nos painéis.

**Figura 28:** Valores de  $H_m^k$  para cada município estudado.

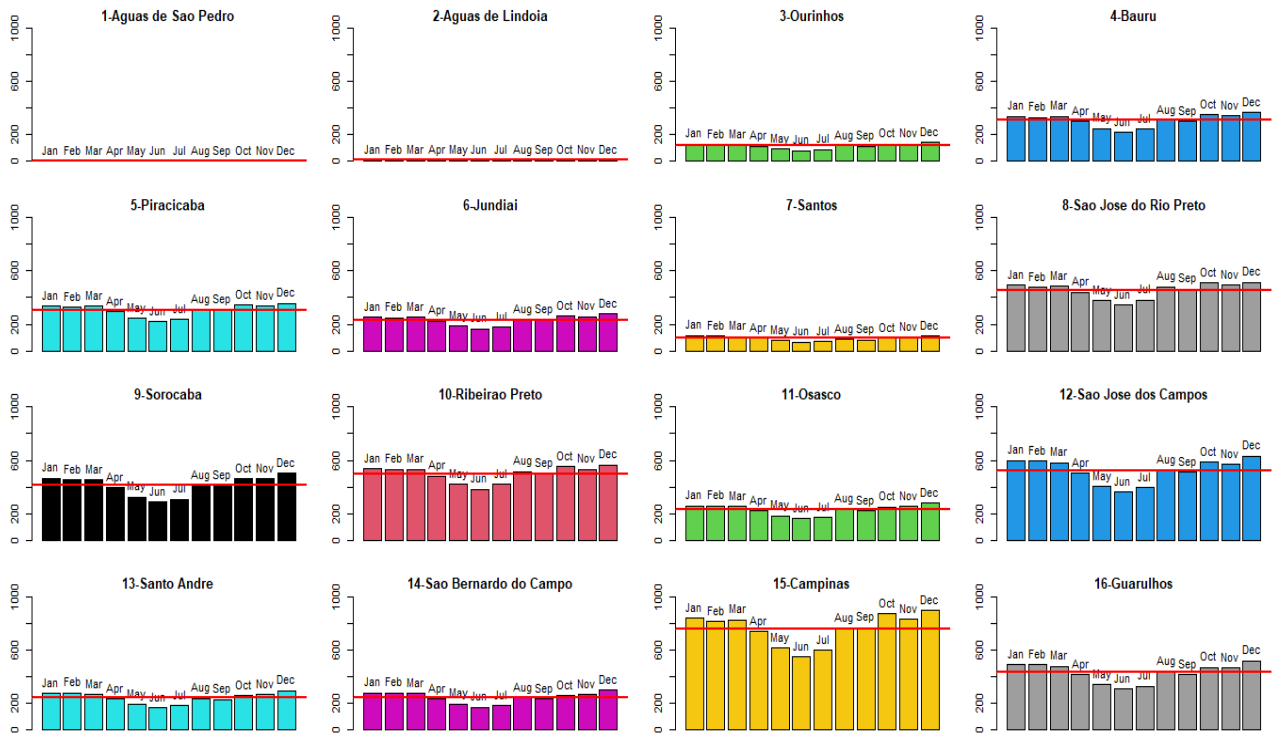


Fonte: O autor.

Assim, foram estimados os potenciais de geração de energia fotovoltaica por mês para

cada município, a partir da Equação (14), que são mostrados mês a mês na Figura 29.

**Figura 29:** Potencial de geração fotovoltaica para cada município, dado em GWh.



Fonte: O autor.

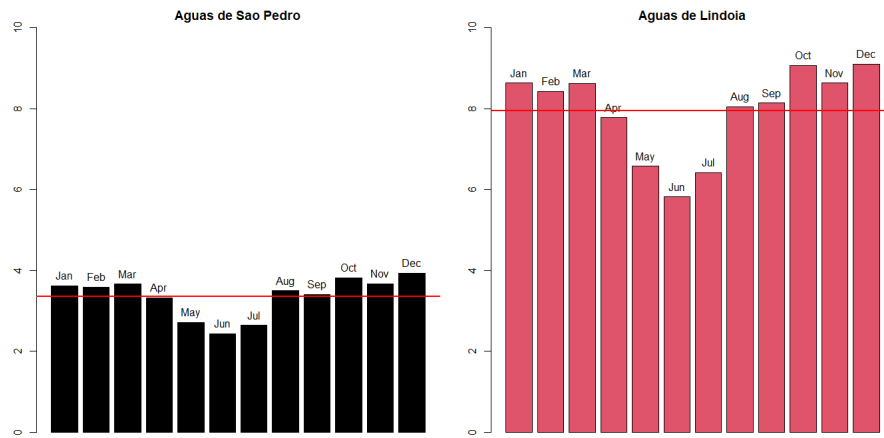
Cada gráfico na Figura 29 mostra o potencial de geração fotovoltaica por mês, dado em GWh, de um município estudado e, em vermelho, a média dos valores para cada mês. Em todos os gráficos o eixo vertical vai de 0 a 1000 GWh, de modo que seja possível comparar os potenciais de geração entre os municípios.

Para os municípios de Águas de São Pedro e Águas de Lindoia os potenciais de geração fotovoltaica obtidos são de menor ordem de grandeza com relação aos demais municípios e, por isso, não podem ser visualizados nos gráficos mostrados na Figura 29. Com isso, foram construídos gráficos em uma escala adequada para tais municípios, mostrados na Figura 30.

Nota-se a partir dos gráficos na Figura 29 que o município de Campinas apresentou o maior potencial de geração fotovoltaica, seguido do município de São José dos Campos. Isto pode ser também constatado comparando a posição das retas horizontais que representam as respectivas médias. Não por coincidência estes são os municípios que apresentaram as maiores estimativas de áreas de telhados, como pode ser visto na Tabela 11, que mostra os municípios ordenados de forma decrescente por valores de área de telhados estimada.

É possível observar também que uma maior área de telhados nem sempre implica em um maior potencial de geração quando tem-se valores próximos de área de telhados, como ocorre com os municípios de Guarulhos e Ribeirão Preto. Neste caso, os fatores irradiação solar mensal média ( $I_m^k$ ) e incidência solar média nos painéis ( $H_m^k$ ) influenciam de forma mais significativa no potencial de geração fotovoltaica.

**Figura 30:** Potencial de geração fotovoltaica para Águas de São Pedro e Águas de Lindóia, dado em GWh.



Fonte: O autor.

**Tabela 11:** Áreas de telhado estimadas para cada município, em ordem decrescente.

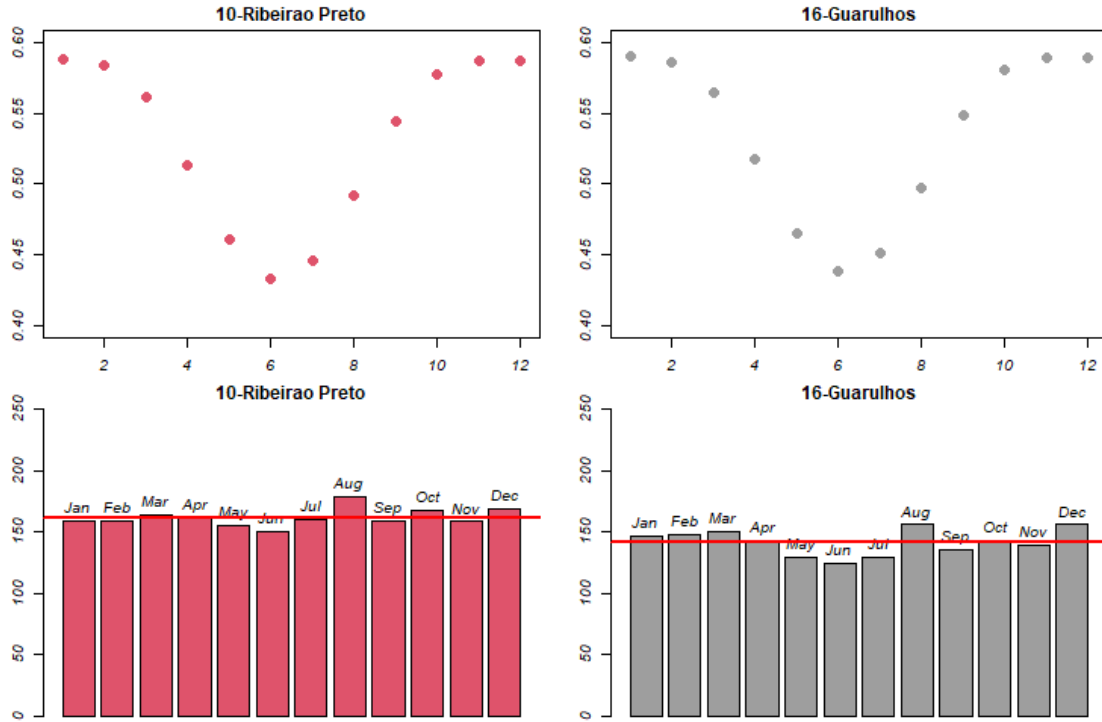
Município	Id (k)	Área telhados (km <sup>2</sup> )
Campinas	15	60,17
São José dos Campos	12	44,80
Guarulhos	16	37,74
Ribeirão Preto	10	37,64
São José do Rio Preto	8	34,00
Sorocaba	9	33,90
Piracicaba	5	24,16
Bauru	4	23,79
Santo André	13	22,02
São Bernardo do Campo	14	22,01
Osasco	11	20,09
Jundiaí	6	18,67
Santos	7	9,50
Ourinhos	3	9,18
Águas de Lindóia	2	0,62
Águas de São Pedro	1	0,27

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2020).

Na Figura 31 são mostrados gráficos de  $I_m^k$  e  $H_m^k$  para Guarulhos e Ribeirão Preto. Nota-se que a irradiação mensal média para Ribeirão Preto é maior se comparada à observada em Guarulhos. Já observando o comportamento de  $H_m^k$  para tais municípios, observa-se que este apresenta valores ligeiramente menores para Ribeirão Preto, indicando uma influência menos significativa em virtude da pequena variação.

Com isso foi possível constatar que, para os municípios estudados, o potencial de geração está diretamente relacionado à área de telhados, tomada aqui como sendo totalmente disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos. Avaliando os perfis de movimentação

**Figura 31:** Gráficos de  $H_m^k$  e  $I_m^k$  para os municípios de Ribeirão Preto e Guarulhos.



Fonte: O autor.

do Sol, que influencia no  $H_m^k$ , e de irradiação solar, que variam conforme a localização dos municípios, foi possível notar que as pequenas variações observadas não influenciam de forma tão significativa no potencial de geração fotovoltaica quanto a área de painéis.

Por outro lado, para o caso de municípios com valores de áreas de telhado próximos, os perfis de irradiação solar e movimentação do Sol influenciam de forma mais significativa no potencial de geração fotovoltaica. Pode-se observar esta situação comparando-se os resultados dos municípios de São José do Rio Preto e Sorocaba.

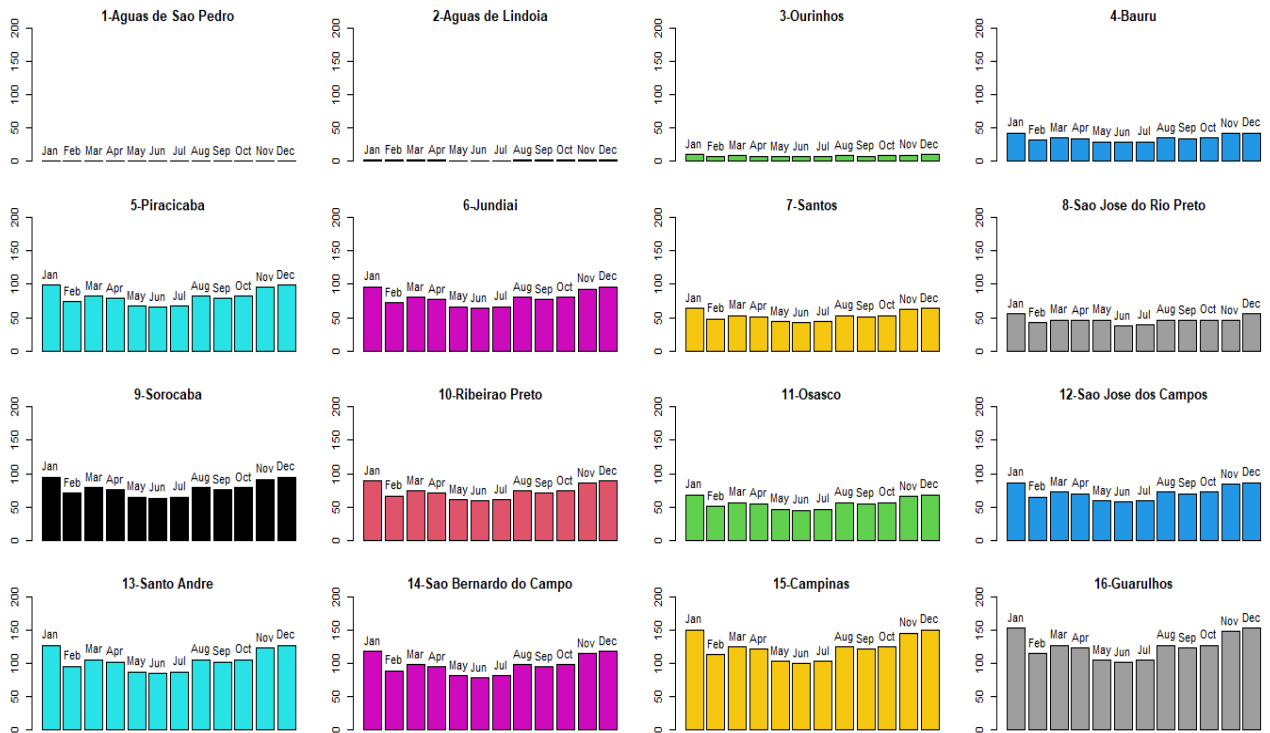
Conhecendo as estimativas de geração fotovoltaica, foram também obtidas estimativas mensais e anuais de suprimento do consumo de energia elétrica observado para os municípios a partir das equações (16) e (20).

Devido ao fato de não estarem sendo consideradas quaisquer formas de armazenamento da energia gerada, os potenciais de suprimento foram calculados em função das proporções do consumo que ocorre durante os períodos de Sol, e as relações usadas nesses cálculos são mostradas nas equações (17) e (22).

O potencial de suprimento fotovoltaico mensal depende do consumo nos períodos de Sol observado por mês para cada município ( $C_m^k$ ), da forma que ilustra a equação (16), e os valores obtidos para este consumo são mostrados na Figura 32. Os gráficos referentes aos municípios de Águas de São Pedro e Águas de Lindóia são mostrados na Figura 33.

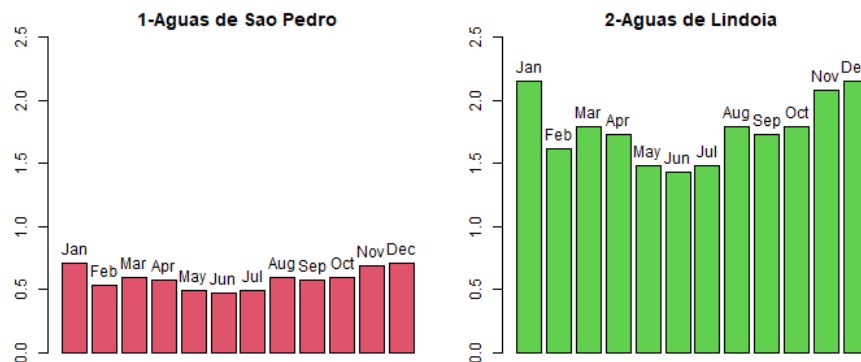
Determinados os potenciais de geração fotovoltaica ( $F_m^k$ ) e os consumos médios nos períodos de Sol ( $C_m^k$ ) por mês, para cada município, foram obtidos os potenciais de suprimento mensal via geração fotovoltaica ( $E_m^k$ ) utilizando a equação (16). Os valores obtidos

**Figura 32:** Consumo observado nos períodos de Sol por mês, para cada município, dado em GWh.



Fonte: O autor.

**Figura 33:** Consumo observado nos períodos de Sol por mês, para os municípios de Águas de São Pedro e Águas de Lindóia, dado em GWh.

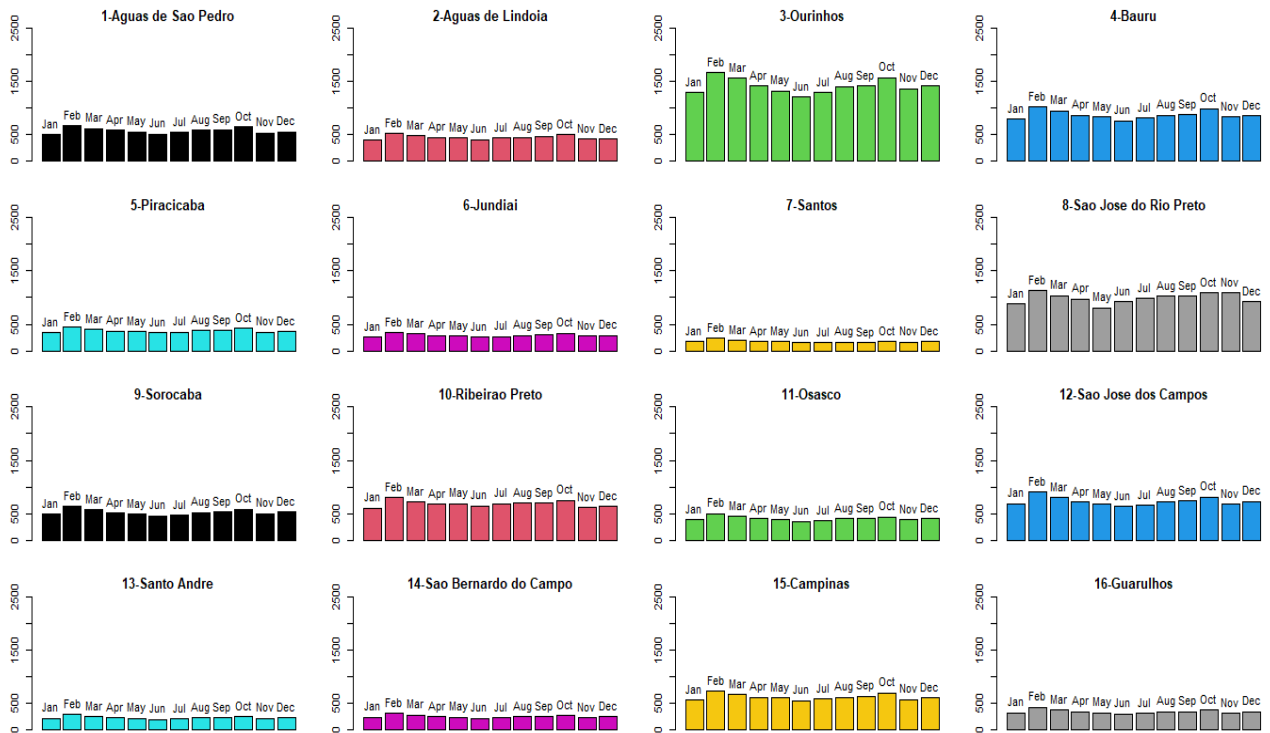


Fonte: O autor.

são apresentados na Figura 34.

Os resultados obtidos mostram que, para todos os meses em todos os municípios, o potencial de suprimento fotovoltaico  $E_m^k$  foi consideravelmente maior que 100%, indicando que todo o consumo observado para cada mês poderia ser suprido via geração fotovoltaica. Isso significa que em todas as cidades o consumo no período de luz solar poderia ter sido suprido por energia fotovoltaica, desde que toda a área de telhados fosse coberta por módulos fotovoltaicos. Vale destacar que os dados de irradiação utilizados são resultados

**Figura 34:** Potencial de suprimento fotovoltaico mensal para cada município, em porcentagem (%).



Fonte: O autor.

de valores estimados a partir de medidas realizadas em diferentes pontos do território nacional, tendo portanto levado em conta a influência das nuvens no céu na irradiação solar.

Como já visto, este parâmetro depende do potencial de geração fotovoltaica ( $F_m^k$ ) e do consumo mensal ( $C_m^k$ ) observados para cada município. Com isso, municípios com baixo potencial de geração podem apresentar altos potenciais de suprimento devido a baixos consumos observados, como ocorre com o município de Ourinhos. Do mesmo modo, municípios com alto potencial de geração, como Campinas, podem apresentar potenciais de suprimento menores devido a altos consumos.

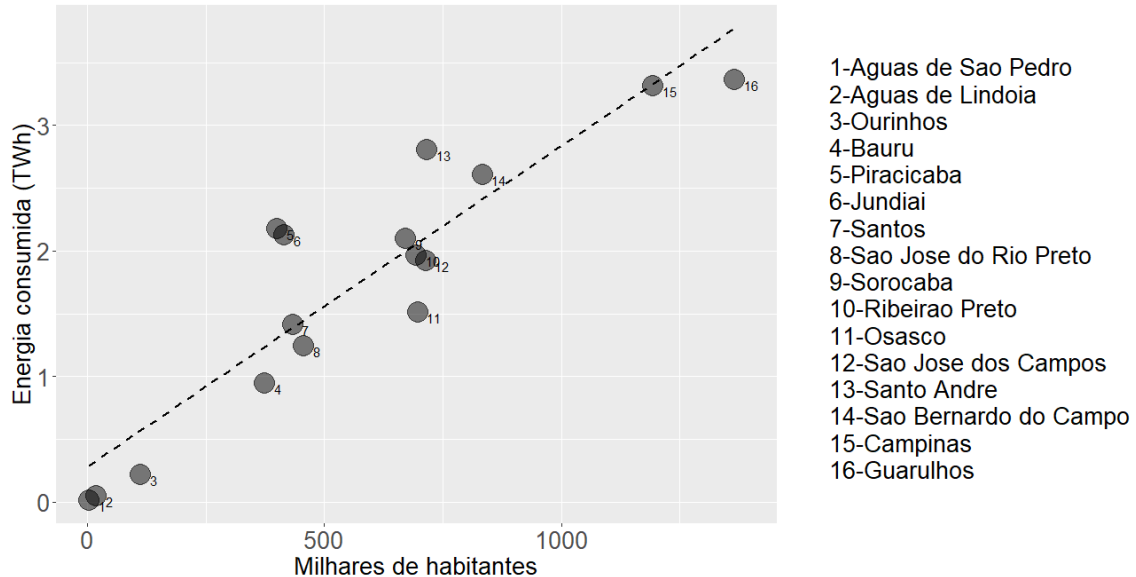
Neste sentido, foram feitas análises da relação entre algumas variáveis envolvidas no estudo buscando elucidar eventuais influências no consumo de energia, que afeta de forma importante o suprimento de geração fotovoltaica. A primeira delas foi a da relação entre as variáveis Energia Consumida e Número de Habitantes.

Para esta análise foi construído um diagrama de dispersão envolvendo tais variáveis, mostrado na Figura 35, que evidencia uma tendência de crescimento linear do consumo de energia em função do número de habitantes. A figura mostra também, em pontilhado, uma reta obtida a partir do ajuste linear dos dados utilizados na construção do diagrama.

De fato, o fator de correlação linear obtido para as variáveis Energia Consumida e Número de Habitantes foi de 0,912 de um máximo de 1, indicando uma relação positiva forte, isto é, existe uma correlação praticamente linear entre o número de habitantes e a energia consumida. A Tabela 12 mostra os parâmetros estatísticos associados o ajuste

linear, obtido utilizando o método dos mínimos quadrados, além do fator de correlação linear.

**Figura 35:** Diagrama de dispersão para as variáveis Energia Consumida e Número de Habitantes.



Fonte: O autor.

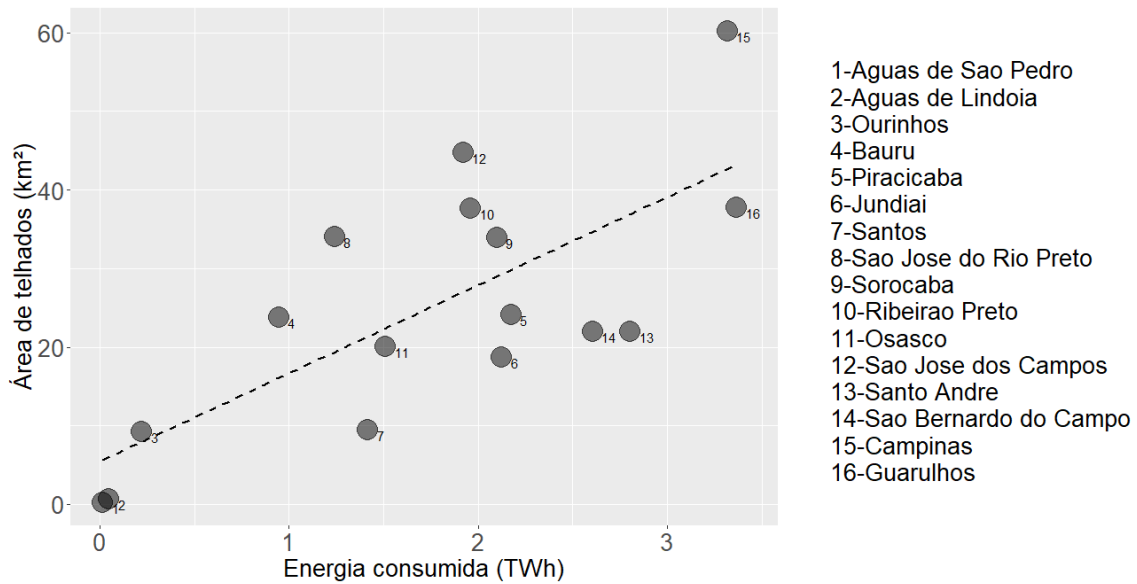
**Tabela 12:** Parâmetros estatísticos obtidos da análise das variáveis Energia Consumida e Número de Habitantes.

Parâmetro	Valor obtido
$R^2$ ajustado	0,819
Correlação linear	0,912
p-valor*	$8,611 \times 10^{-7}$

\* O p-valor garante a rejeição da hipótese nula do teste de hipóteses sobre a existência de correlação entre as variáveis, com nível de significância de 0,05%.

Por outro lado, o potencial de suprimento fotovoltaico depende da área de telhados de cada município, que foi considerada aqui como sendo a área disponível para a instalação de painéis e utilizada nas estimativas de geração fotovoltaica. Por isso a relação entre os parâmetros Energia Consumida e Área de Telhados também foi abordada, e é ilustrada no diagrama de dispersão mostrado na Figura 36. A Tabela 13 mostra os parâmetros estatísticos obtidos do ajuste linear para estas variáveis.

Ao avaliar a relação entre as variáveis Energia Consumida e Área de Telhados nota-se uma tendência linear positiva, porém não tão forte quanto a observada anteriormente, de apenas 0,731. Isso mostra que um crescimento no consumo de energia pode ser associado

**Figura 36:** Diagrama de dispersão para as variáveis Energia Consumida e Área de Telhados.

Fonte: O autor.

**Tabela 13:** Parâmetros estatísticos obtidos da análise das variáveis Energia Consumida e e Área de Telhados.

Parâmetro	Valor obtido
R <sup>2</sup> ajustado	0,502
Correlação linear	0,731
p-valor*	$1,284 \times 10^{-3}$

\* O p-valor garante a rejeição da hipótese nula do teste de hipóteses sobre a existência de correlação entre as variáveis, com nível de significância de 0,1%.

a um crescimento na área de telhados, porém implicando num crescimento não na mesma proporção.

Esta relação se reflete nos dados exibidos na Tabela 14, que mostra valores de área de telhados, consumo de energia elétrica e número de habitantes, ordenados de forma decrescente por área de telhados. Nota-se que tanto os valores de consumo quanto de número de habitantes não apresentam ordem decrescente da mesma forma que os valores de área de telhados, indicando uma relação menos próxima da área de telhados com o consumo e o número de habitantes.

Assim, justifica-se o potencial de suprimento fotovoltaico obtido para Ourinhos, que apresenta potencial de geração relativamente baixo porém um potencial de suprimento mensal da ordem de 1500%. De forma similar, justifica-se também o observado para a cidade de Campinas, que apresenta grande potencial de geração mas um potencial de suprimento mediano devido ao alto consumo.

**Tabela 14:** Valores de área de telhados, consumo de energia elétrica e número de habitantes, ordenados de forma decrescente por área de telhados.

Município	Id (k)	Área telhados (km <sup>2</sup> )	Consumo (kWh)	Número de habitantes
Campinas	15	60,165	3.315.984.916	1.194.094
São José dos Campos	12	44,798	1.920.109.529	713.943
Guarulhos	16	37,739	3.364.850.329	1.365.899
Ribeirão Preto	10	37,642	1.961.335.673	694.534
São José do Rio Preto	8	33,997	1.240.150.040	456.245
Sorocaba	9	33,896	2.097.824.129	671.186
Piracicaba	5	24,159	2.172.571.731	400.949
Bauru	4	23,789	945.093.221	374.272
Santo Andre	13	22,016	2.803.407.497	716.109
São Bernardo do Campo	14	22,008	2.604.462.952	833.240
Osasco	11	20,092	1.508.952.024	696.850
Jundiaí	6	18,672	2.125.353.740	414.810
Santos	7	9,498	1.415.303.882	432.957
Ourinhos	3	9,18	220.637.556	112.711
Agua de Lindoia	2	0,623	47.548.279	18.599
Agua de São Pedro	1	0,271	15.742.645	3.380

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2020), São Paulo (2018) e IBGE (2019).

Como indicado na seção 4.2.4, foram também obtidos potenciais anuais de suprimento fotovoltaico a partir da equação 20. Estes foram calculados em função do parâmetro  $F_{ano}^k$ , dado pelo somatório dos potenciais mensais de geração fotovoltaica – ver equação (21) – e do consumo médio anual nos períodos de Sol  $C_{ano}^k$  – ver equação (22). Os valores obtidos para  $F_{ano}^k$  e  $C_{ano}^k$  são mostrados na Tabela 15, em que os valores estão ordenados de forma decrescente por potencial de geração.

Na Tabela 15 é possível notar que os potenciais de geração não apresentam o mesmo ordenamento decrescente observado para o consumo, o que evidencia o ponto discutido anteriormente de que municípios com alto potencial de geração não necessariamente irão apresentar maiores potenciais de suprimento energético devido aos respectivos consumos observados.

A partir dos valores da Tabela 15 foram então obtidos os potenciais de suprimento, que são mostrados na Tabela 16 e ilustrados na Figura 37.

#### 4.3.4 TEMPO DE PAYBACK ENERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES ESTUFA

Com os dados disponíveis em Peng, Lu e Yang (2013) e Wu et al. (2017), os valores de  $E_{BOS}$  dos módulos mono-Si foram definidos para cada cidade estudada, com a energia necessária para balanço do sistema (BOS) multiplicada pela respectiva área de telhados estimada dada na Tabela 9.

A demanda total de energia para BOS foi considerada sendo de 19.44 kWh/m<sup>2</sup> para

**Tabela 15:** Potencial de geração fotovoltaica e consumo anuais nos períodos de Sol, em kWh, e ordenados de forma decrescente por potencial de geração, para cada município estudado.

Município	Id (k)	Consumo nos períodos de Sol (kWh)	Potencial de geração (kWh)
Campinas	15	1.446.649.860	9.098.009.791
Sao Jose dos Campos	12	855.860.260	6.276.436.007
Ribeirao Preto	10	828.364.045	5.978.571.442
Sao Jose do Rio Preto	8	515.433.914	5.458.623.695
Guarulhos	16	1.416.959.878	5.145.630.348
Sorocaba	9	909.366.508	4.941.689.180
Bauru	4	411.339.207	3.676.466.762
Piracicaba	5	898.147.587	3.650.558.284
Sao Bernardo do Campo	14	1.180.039.491	2.906.391.824
Santo Andre	13	1.245.613.506	2.870.918.144
Jundiai	6	892.478.629	2.771.744.658
Osasco	11	645.351.785	2.757.781.453
Ourinhos	3	92.065.206	1.389.140.726
Santos	7	621.075.179	1.123.188.583
Aguas de Lindoia	2	20.895.509	95.231.800
Aguas de Sao Pedro	1	6.719.317	40.339.574

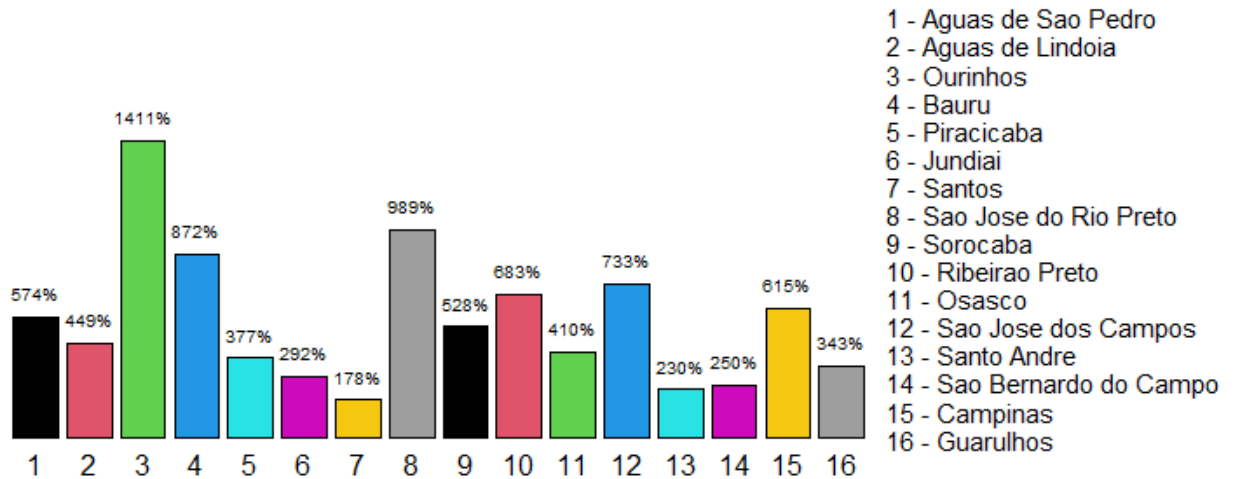
Fonte: O autor. Dados de São Paulo (2020).

**Tabela 16:** Potencial anual de suprimento energético, em porcentagem (%), para os municípios estudados.

Id (k)	Município	Proporção de suprimento (%)
1	Aguas de Sao Pedro	574,26
2	Aguas de Lindoia	448,85
3	Ourinhos	1410,97
4	Bauru	871,78
5	Piracicaba	376,56
6	Jundiai	292,26
7	Santos	177,85
8	Sao Jose do Rio Preto	988,67
9	Sorocaba	527,91
10	Ribeirao Preto	683,12
11	Osasco	409,58
12	Sao Jose dos Campos	732,55
13	Santo Andre	229,50
14	Sao Bernardo do Campo	250,08
15	Campinas	614,87
16	Guarulhos	342,71

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), IBGE (2020).

**Figura 37:** Potencial de suprimento fotovoltaico anual para cada município, em porcentagem (%).



Fonte: O autor.

estruturas de suporte e cabeamento (PENG; LU; YANG, 2013) e  $25.87 \text{ kWh/m}^2$  para os inversores (WU et al., 2017), enquanto que  $n_G$  foi definido como 0,625 (LIMA; TOLEDO; BOURIKAS, 2021).

$E_{\text{input}}$  foi tomado como  $794.44 \text{ kWh/m}^2$  (PENG; LU; YANG, 2013), também sendo multiplicado pela respectiva área de telhados estimada para cada município estudado.  $E_{\text{output}}$  foi tomado como sendo a geração fotovoltaica anual para cada cidade – ver Tabela 15. Os TPBE estimados são mostrados na Tabela 17.

A taxa de EGE foi obtida para cada município considerando  $61 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$  (PENG; LU; YANG, 2013) e são mostrados também na da Tabela 17. Os valores indicam a quantidade de  $\text{CO}_2$  que teria sido emitida durante todo o ciclo de vida dos sistemas FV considerados para cada cidade. Os valores representam em torno de 9,5% de todas as emissões de  $\text{CO}_2$  que teriam ocorrido em um ano se a mesma quantidade de energia elétrica tivesse sido gerada utilizando fontes fósseis, a partir da taxa de emissão de  $685 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$  (D'ADAMO, 2018).

Vale mencionar também que, de acordo com Peng, Lu e Yang (2013), o maior TPBE observado para sistemas fotovoltaicos mono-Si é de 2,7 anos, enquanto que o ciclo de vida esperado é de 30 anos. Em Lima, Toledo e Bourikas (2021), que leva em conta plantas fotovoltaicas no Brasil, o maior TPBE obtido é de 4,69 anos.

**Tabela 17:** TPBE em anos e EGE em toneladas de CO<sub>2</sub>.

Município	TPBE (anos)	EGE (toneladas de CO <sub>2</sub> )
Águas de São Pedro	3,5	2.460,71
Águas de Lindoia	3,4	5.809,14
Ourinhos	3,5	84.737,58
Bauru	3,4	224.264,47
Piracicaba	3,5	222.684,06
Jundiaí	3,5	169.076,42
Santos	4,4	68.514,50
São Jose do Rio Preto	3,3	332.976,05
Sorocaba	3,6	301.443,04
Ribeirão Preto	3,3	364.692,86
Osasco	3,8	168.224,67
São José dos Campos	3,7	382.862,60
Santo André	4,0	175.126,01
São Bernardo do Campo	4,0	177.289,90
Campinas	3,5	554.978,60
Guarulhos	3,8	313.883,45

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), IBGE (2020).

#### 4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Da Figura 37 nota-se que os municípios com maior potencial de suprimento foram Ourinhos, São José do Rio Preto e Bauru, que apresentaram uma relação entre consumo e potencial de geração mais favorável neste sentido. Como discutido previamente, tais resultados dependem principalmente dos respectivos consumo de energia e área de telhados disponível para a instalação de sistemas FV.

Municípios como Campinas, Guarulhos, São Bernardo do Campo e Santo André estão entre os que apresentaram maior potencial de geração fotovoltaica ( $F_{\text{ano}}^k$ ). Entretanto, devido ao elevado consumo observado nos períodos de Sol, apresentaram menores potenciais de suprimento.

Destaca-se que em todas as análises realizadas os potenciais de suprimento fotovoltaico, por menores que tenham sido, sempre indicaram valores que atenderiam a todo o consumo observado nos municípios, sejam em períodos mensais ou em período anual. O menor potencial anual de suprimento observado foi para a cidade de Santos, tendo sido de 177,85%.

Os números mostram que as cidades apresentam potencial para redução da dependência da geração centralizada de energia – pelo menos nos períodos em que há luz solar.

Por fim, o maior TPBE obtido foi de 4,4 anos (Santos), sendo consideravelmente menor do que o tempo de vida estimado de 30 anos para o sistema fotovoltaico mono-Si. Isto indica que tais sistemas retornariam a energia consumida em seu ciclo de vida em um período de tempo relativamente curto se comparado ao tempo de vida total do sistema. Além disso, as estimativas indicam que teriam sido gerados por volta de 8,9% das EGE

caso a mesma quantidade de energia fosse gerada a partir de fontes fósseis.

Sobre os aspectos econômico e social da sustentabilidade, a geração FV distribuída pode proporcionar significativa segurança e maior diversidade no suprimento de energia elétrica, implicando em acesso mais amplo a este tipo de energia e reduzindo a descontinuidade e eventuais custos de manutenção.

Estes resultados trazem uma reflexão no sentido de promoverem argumentos e subsídios científicos capazes de enaltecer a geração fotovoltaica no Brasil, tando do ponto de vista de potencial natural quanto de viabilidade técnica, já que foram obtidos considerando a geração distribuída a partir de estruturas domiciliares já existentes.

## 5. GERAÇÃO A PARTIR DE RSU

### 5.1 INTRODUÇÃO

As análises dos potenciais de geração e suprimento energético pelos RSU foram realizadas a partir do potencial de conversão considerando a abordagem WTE, que representa uma tendência mundial no aproveitamento energético ambientalmente adequado dos RSU via incineração, e é descrita na seção 2.5. Para isso foram tomados dados de quantidade de massa coletada disponíveis em Brasil (2021c), para os municípios estudados. Essa fonte contém informações de massa coletada de RSU em municípios de todo o país desde o ano de 2002, sendo estes disponibilizados em toneladas por ano, indicando inclusive as unidades em que os resíduos sólidos foram recebidos e o meio de coleta realizado.

Com relação à geração via WTE há na literatura materiais bastante detalhados que abordam a tecnologia, dentre eles Brunner e Rechberger (2015) e Martin, Martin e Koralewska (2019). Estes materiais, além de tratarem da tecnologia, também disponibilizam informações associadas à eficiência do processo de conversão WTE. Em Martin, Martin e Koralewska (2019) tem-se um material bastante completo que aborda a tecnologia, tratando inclusive de informações técnicas de diferentes plantas WTE.

Além da geração limpa de energia, a abordagem WTE traz uma possibilidade para o gerenciamento adequado dos RSU. Entretanto, atualmente no Brasil não há qualquer empreendimento que utiliza esta abordagem para a geração e tratamento dos RSU devido principalmente à falta de incentivos legais para que esta tecnologia seja adotada de forma sistêmica na estrutura nacional do gerenciamento de RSU (TISI, 2021; TISI; NOGUEIRA, 2021).

Segundo a Associação Brasileira de Recuperação Energética (ABREN), hoje em dia o Brasil apresenta um potencial de instalação de 250 empreendimentos WTE, o que implicaria em um suprimento de no mínimo 6,4% das necessidades energéticas do país. Isso demandaria um investimento de aproximadamente 160 bilhões de reais. Além disso, há indicativos de que os aterros de grandes regiões metropolitanas como Rio de Janeiro e São Paulo irão atingir sua capacidade máxima dentro de no máximo 3 anos (TISI, 2021).

### 5.2 METODOLOGIA

Nesta seção serão mostradas as metodologias para as estimativas da geração de energia via RSU e do custo de instalação das respectivas plantas WTE, que foram aplicadas para o conjunto de 16 municípios do interior do Estado de São Paulo.

#### 5.2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO

De modo a avaliar o potencial de geração local e de suprimento de consumo de energia elétrica a partir dos RSU foram levados em conta valores observados de quantidade coletada de RSU no período de 2019, além de informações acerca do número de habitantes e do consumo de energia elétrica dos municípios estudados. Também foram feitas análises

estatísticas de tais variáveis quando cabível, com o objetivo de elucidar eventuais relações entre elas. De maneira similar à análise de geração fotovoltaica, foram estimados os potenciais anuais e mensais de geração via RSU. Além disso, foram obtidas estimativas de custo de instalação e manutenção de usinas de geração elétrica via incineração dos RSU.

Destaca-se que existem diferentes tecnologias WTE de conversão de RSU em energia elétrica e por isso pode haver variações na eficiência de conversão de acordo com a tecnologia utilizada.

Segundo Seadi et al. (2013), 46% dos RSU no mundo são registrados como orgânicos e, segundo Brasil (2012), tem-se que no Brasil tal fração é de 51,4%. As informações em Martin, Martin e Koralewska (2019), que abordam a conversão WTE, levam em conta uma taxa de conversão em usinas instaladas em países na Europa, com composição de RSU que se aproxima da média mundial. Sendo assim, mesmo tendo uma fração diferente da média mundial, porém devido a proximidade dos valores, considerou-se aqui o fator de conversão segundo Martin, Martin e Koralewska (2019).

A geração anual via RSU para o município  $k$  ( $R_{ano}^k$ ), dada em kWh, foi estimada a partir da relação que se segue:

$$R_{ano}^k = M_{RSU}^k \times 500 \quad (25)$$

em que

- $M_{RSU}^k$  é a massa coletada de RSU no período de um ano, dado em toneladas;
- o fator 500 representa a conversão de massa em energia, a partir da abordagem WTE (MARTIN; MARTIN; KORALEWSKA, 2019), dado em kWh/ton.

Analogamente à análise de geração fotovoltaica, obteve-se uma estimativa do suprimento anual de energia elétrica, porém considerando o consumo obtido nos períodos em que não há luz do Sol, a partir dos RSU para cada município através da relação a seguir.

$$S_{ano}^k = 100 \times \frac{R_{ano}^k}{Q_{ano}^k (1 - K_{ano}^k)} \quad (26)$$

em que

- $S_{ano}^k$  é o suprimento energético, em porcentagem, do consumo médio anual pela geração via RSU estimada;
- $Q_{ano}^k$  é o consumo total anual observado para o município  $k$  segundo São Paulo (2018), dado em kWh;
- $K_{ano}^k$  é a proporção média do consumo anual que ocorreu nos períodos de Sol para o município  $k$ , assumindo valores entre 0 e 1.

O fator  $(1 - K_{ano}^k)$  representa a proporção do consumo que ocorre nos períodos em que não há Sol para cada município e, conseqüentemente, não há geração fotovoltaica. A

forma como  $K_{\text{ano}}^k$  foi obtido é descrita na seção 4.2.4, e este fator foi incluído nesta estimativa devido à complementaridade entre a geração fotovoltaica e via RSU já mencionada anteriormente.

As estimativas de geração mensal via RSU, para cada município, foram obtidas a partir das quantidades médias de massa coletada para cada mês, dadas por

$$M_m^k = M_{\text{RSU}}^k \times \frac{N_m}{365} \quad (27)$$

em que

- $M_m^k$  é a massa coletada média de RSU no mês  $m$ , dada em toneladas;
- $N_m$  é o número de dias do mês  $m$ . A razão  $N_m/365$  indica, portanto, a respectiva proporção da massa coletada anual para o mês  $m$ ;

e, com isso, estimou-se a geração elétrica via RSU para o mês  $k$  no município  $m$  ( $R_m^k$ ), dada em kWh, a partir da seguinte equação:

$$R_m^k = M_m^k \times 500. \quad (28)$$

Por fim, a partir dos valores de consumo mensal nos períodos de Sol ( $C_m^k$ ), de consumo mensal total ( $Q_m^k$ ) – ver equações (17) e (18) na seção 4.2.4 – e da estimativa de geração via RSU ( $R_m^k$ ) foram estimados os suprimentos mensais via RSU, em porcentagem, para o mês  $k$  no município  $m$  ( $S_m^k$ ) de forma similar à Equação (26), como se segue:

$$S_m^k = 100 \times \frac{R_m^k}{Q_m^k (1 - K_m^k)} \quad (29)$$

em que

- $Q_m^k$  é o consumo médio observado para o município  $k$ , no mês  $m$ , dado em kWh;
- $K_m^k$  é a proporção média de consumo que ocorreu nos períodos de Sol no mês  $m$  para o município  $k$ , assumindo valores entre 0 e 1.

O fator  $K_m^k$  foi incluído nesta estimativa devido à complementaridade entre a geração fotovoltaica e via RSU já mencionada anteriormente.

## 5.2.2 CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

As estimativas de custos de instalação das plantas WTE foram obtidas segundo a seguinte expressão (OKOLIE; CHUKWUMUANYA; ILO, 2020; TEHRANI; HAGHI, 2015):

$$I = 2,3507 \times C^{0,7753} \quad (30)$$

em que

- I é o investimento em milhões de dólares;
- C é a capacidade da planta em questão, em milhares de toneladas por ano.

Além disso, também foram obtidas estimativas para custos de manutenção e operação das plantas (OKOLIE; CHUKWUMUANYA; ILO, 2020; TEHRANI; HAGHI, 2015):

$$A = 0,0744 \times C^{0,8594} \quad (31)$$

em que A é o custo anual de operação e manutenção, em milhões de dólares.

## 5.3 RESULTADOS

### 5.3.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO

Os potenciais de geração e suprimento de energia elétrica via RSU foram avaliados com base na massa coletada, em toneladas, com dados do período do ano de 2019. A Tabela 18 mostra os respectivos valores observados, além de valores para número de habitantes e consumo de energia elétrica para o mesmo ano.

**Tabela 18:** Municípios estudados, número de habitantes, consumo anual de energia e massa de RSU coletada para o ano de 2019.

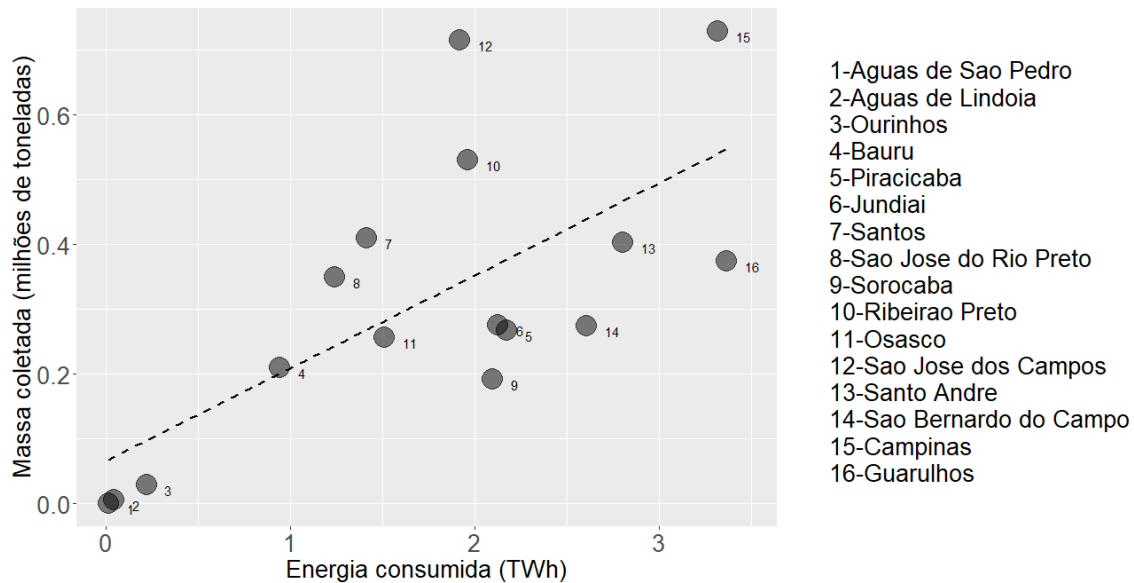
Id (k)	Município	Número de habitantes	Massa coletada de RSU (ton)	Consumo (kWh)
1	Aguas de Sao Pedro	3.380	865,0	15.742.645
2	Aguas de Lindoia	18.599	5.519,1	47.548.279
3	Ourinhos	112.711	28.620,0	220.637.556
4	Bauru	374.272	210.185,6	945.093.221
5	Piracicaba	400.949	267.150,8	2.172.571.731
6	Jundiai	414.810	275.761,0	2.125.353.740
7	Santos	432.957	410.619,6	1.415.303.882
8	Sao Jose do Rio Preto	456.245	349.869,7	1.240.150.040
9	Sorocaba	671.186	192.000,0	2.097.824.129
10	Ribeirao Preto	694.534	529.992,2	1.961.335.673
11	Osasco	696.850	256.747,5	1.508.952.024
12	Sao Jose dos Campos	713.943	715.851,0	1.920.109.529
13	Santo Andre	716.109	403.252,3	2.803.407.497
14	Sao Bernardo do Campo	833.240	274.743,8	2.604.462.952
15	Campinas	1.194.094	728.939,3	3.315.984.916
16	Guarulhos	1.365.899	374.466,2	3.364.850.329

Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), São Paulo (2020) e Brasil (2021c).

Inicialmente foi avaliada a relação entre a massa coletada e o consumo de energia elétrica nos municípios em questão, ilustrada na Figura 38, que mostra um diagrama de dispersão onde é possível verificar que para municípios com uma mesma faixa de consumo de energia existem diferentes perfis de massa coletada e vice-versa.

Do ponto de vista da massa coletada, nota-se que o município de São José dos Campos (12) apresentou o maior valor e, por outro lado, apresentou uma quantidade intermediária de energia elétrica consumida. Deste modo, num primeiro momento tal município mostra-se um candidato interessante a ter o potencial de suprimento energético avaliado. Interessante observar também que os municípios de Ribeirão Preto (10), Sorocaba (9), Jundiaí (6) e Piracicaba (5) apresentaram consumo de energia elétrica similar ao de São José dos Campos (12), porém com uma quantidade de massa coletada consideravelmente menor.

**Figura 38:** Reta obtida pela regressão linear a partir dos dados de massa coletada e consumo de energia, para o ano de 2019.



Fonte: O autor. Dados de Brasil (2021c) e São Paulo (2020).

Ainda observando a Figura 38, nota-se uma tendência linear de crescimento da massa coletada em função da energia consumida, porém com uma tendência de aumento da dispersão em torno da reta com o aumento da energia consumida. O coeficiente de correlação linear entre tais variáveis é de 0,69.

Deste modo a correlação obtida indica que, em geral, municípios que apresentam alto consumo de energia tendem a apresentar altas quantidades de massa coletada, o que pode ser interessante para a geração e o suprimento energéticos via RSU, ainda assim ocorrendo certa variabilidade neste comportamento.

Além disso, considerando um teste de hipóteses para existência de correlação linear entre tais variáveis obteve-se a rejeição da hipótese nula com um nível de significância de 0,1%<sup>1</sup>. A hipótese nula neste caso é a de não existência de correlação entre tais variáveis.

<sup>1</sup>O nível de significância de um teste de hipóteses corresponde à probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira (MAGALHÃES; LIMA, 2002)

Na Figura 38, em pontilhado, é indicada a reta resultante da regressão linear – obtida a partir do método dos mínimos quadrados – associada às variáveis massa coletada e energia consumida, para os municípios envolvidos no estudo. Na Tabela 19, são mostrados os dados associados às análises estatísticas efetuadas, inclusive o valor do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), que indica a proporção dos dados observados explicada pela regressão.

**Tabela 19:** Parâmetros estatísticos obtidos da análise da regressão das variáveis massa coletada e energia consumida.

Parâmetro	Valor obtido
$R^2$ ajustado	0,4456
Correlação linear	0,69
p-valor*	$2,82 \times 10^{-3}$

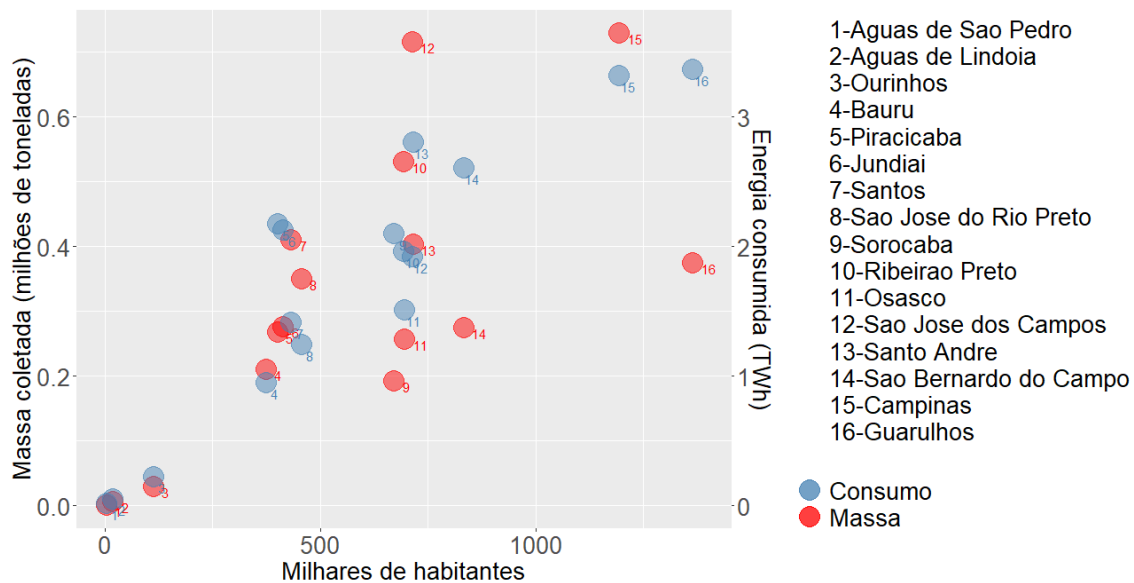
\* O p-valor obtido garante a rejeição da hipótese nula do teste de hipóteses sobre a existência de correlação entre as variáveis, com nível de significância de 0,1%.

Apesar de ter sido observada uma relação linear entre as variáveis com um nível significativo, ainda ocorrem diferenças nos perfis de consumo de energia elétrica e de massa coletada. Tais diferenças podem ser observadas em municípios que apresentam uma mesma faixa de consumo de energia mas com quantidades de massa coletada diferentes, como por exemplo entre Santos (7) e Osasco (11), entre Piracicaba (5), Jundiaí (6), Sorocaba(9), Ribeirão Preto (10) e São José dos Campos (12) além de Campinas (15) e Guarulhos (16). Cada conjunto de municípios citado se encontra em uma mesma faixa de energia consumida, porém em faixas diferentes de quantidade de massa coletada. Essas diferenças podem se dar por fatores distintos, dentre eles o número de habitantes do município. Obviamente que existem outros fatores na esfera socioeconômica que também influenciam em tais parâmetros, que não serão levados em conta neste estudo.

Também foram analisados os dados de energia consumida e de massa coletada em conjunto com o número de habitantes dos municípios. A relação entre essas três variáveis é ilustrada na Figura 39, onde cada município da Tabela 18 é representado por um par de pontos, cada qual na forma descrita através das legendas, indicando a relação entre a massa coletada e o número de habitantes, e a relação entre energia consumida e número de habitantes. Com isso a figura possibilita a comparação dos perfis de massa coletada e de consumo de energia elétrica em municípios de mesmas faixas populacionais.

Os municípios de Bauru (4), Piracicaba (5), por exemplo, encontram-se numa faixa populacional de aproximadamente 400 mil habitantes e os pontos vermelhos associados a tais municípios estão próximos entre si, indicando perfis similares de massa coletada. Entretanto, os pontos azuis correspondentes a estes municípios apresentam-se distantes entre si, indicando perfis distintos de consumo de energia. Neste caso, o município de Piracicaba (5) apresentou um consumo maior se comparado ao consumo apresentado pelo município de Bauru (4) no período avaliado. Por outro lado os municípios de Piracicaba (5) e Jundiaí (6) apresentam perfis similares tanto de massa coletada quanto de consumo

**Figura 39:** Relação entre o número de habitantes com a massa coletada e com o consumo de energia, para o ano de 2019.



Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), Brasil (2021c) e São Paulo (2020).

de energia, já que tanto os pontos vermelhos quanto os pontos azuis associados a estes municípios encontram-se próximos no gráfico.

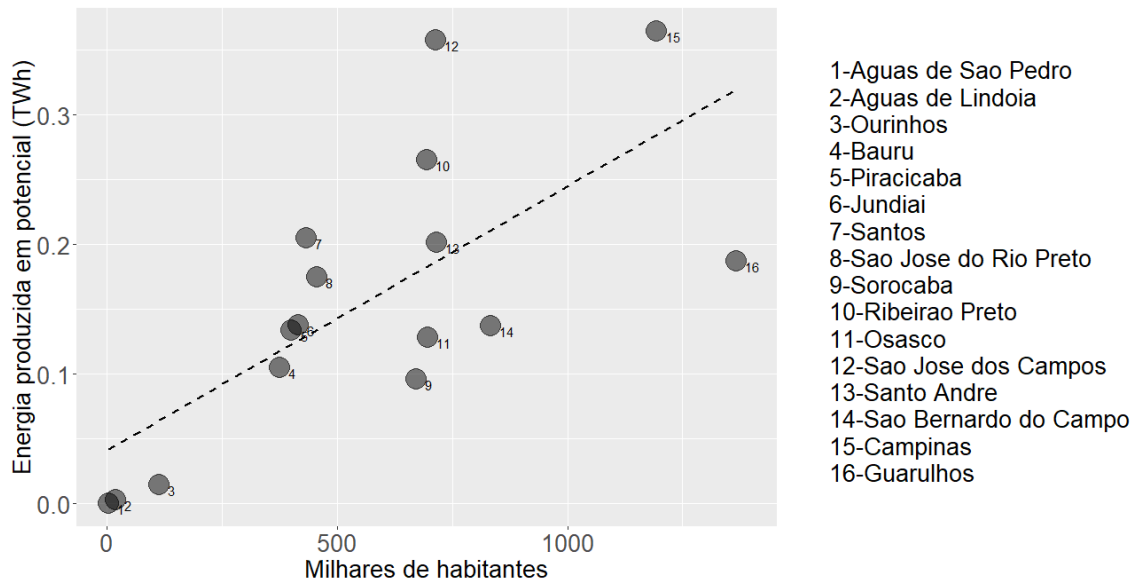
Tais variações nos perfis de consumo de energia e massa coletada de RSU podem vir a indicar municípios cujos potenciais de geração e suprimento energético a partir dos RSU sejam significativos. Porém, para que tal análise fosse realizada de forma coerente, se fez necessário converter os dados de massa coletada para geração de energia em potencial, de modo que fossem comparados parâmetros com a mesma unidade de medida – o kWh. Tal conversão foi efetuada através da equação (25), descrita na seção 5.2.

Assim, foi construído um diagrama de dispersão com as variáveis energia gerada em potencial e número de habitantes, mostrado na Figura 40. As variáveis número de habitantes e energia consumida foram avaliadas na Seção 4.3.3, na Figura 35 e na Tabela 12, onde se observa uma correlação linear de 0,91. Este valor – bastante próximo de 1 – mostra uma relação linear muito forte entre as variáveis número de habitantes e energia consumida, indicando que para grandes valores do número de habitantes espera-se alto consumo de energia, o que é bastante razoável.

A tendência linear e a forte correlação observadas a partir dos dados de energia consumida e número de habitantes não ocorre da mesma maneira quando se trata dos parâmetros energia gerada em potencial e número de habitantes. A Figura 40 mostra o diagrama de dispersão construído.

Para estas variáveis a correlação obtida foi de 0,65, indicando uma relação linear quase mediana. Isso pode ser explicado pela dispersão, ou variabilidade, dos valores de energia gerada em potencial em torno da reta obtida pela regressão, com o aumento do número de habitantes (daqui em diante, no texto, o termo variabilidade será utilizado fazendo menção à dispersão dos valores da variável dependente em torno de cada respectiva reta de regressão). Assim, um município que tem um número grande de habitantes, e

**Figura 40:** Reta obtida pela regressão linear a partir dos dados obtidos de energia gerada em potencial, a partir dos RSU, e número de habitantes, para 2019.



Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019) e Brasil (2021c).

consequentemente consome muita energia, não necessariamente terá massa de RSU para gerar energia numa mesma proporção.

Por outro lado, isto também pode ser outro indicativo da existência de municípios com potencial considerável para o suprimento de energia a partir dos RSU. Neste sentido, o município de São José dos Campos (12) mostra potencial interessante, já que o ponto que o representa é um dos que se encontra mais acima na Figura 38, estando mais afastado do aglomerado onde se encontram a maioria dos pontos para uma faixa mediana de consumo.

Neste caso também foi efetuado um teste de hipóteses com o objetivo de verificar a existência de uma relação linear positiva entre as variáveis energia consumida e número de habitantes. Os parâmetros estatísticos associados, tanto à regressão quanto ao teste de hipóteses, estão na Tabela 20. Do teste, obteve-se novamente um indicativo da existência de correlação para um nível de significância de 1%.

**Tabela 20:** Parâmetros estatísticos obtidos da análise das variáveis energia gerada em potencial e número de habitantes.

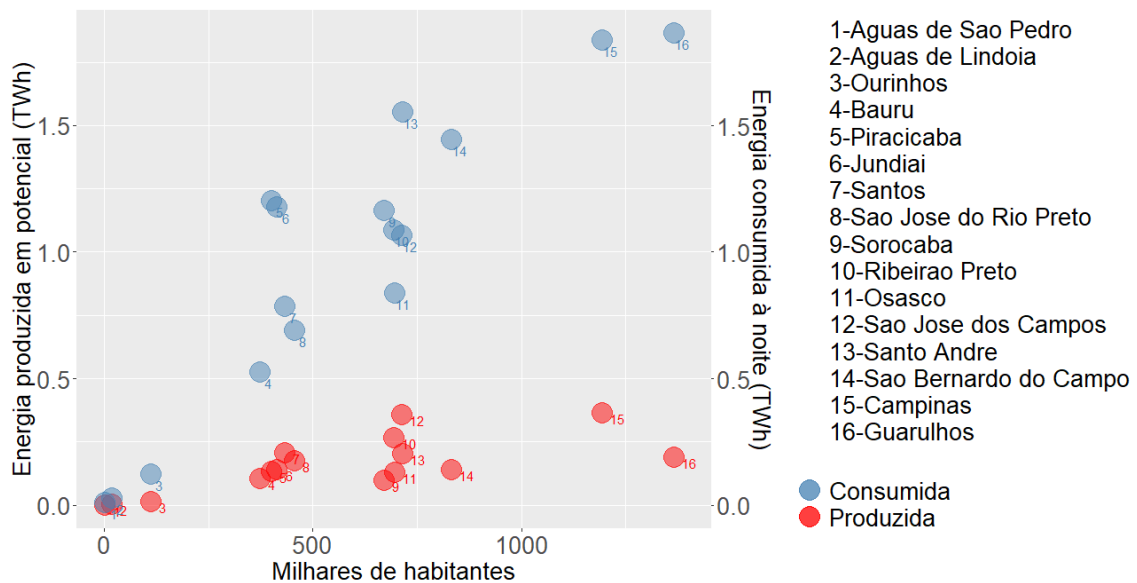
Parâmetro	Valor obtido
R <sup>2</sup> ajustado	0,4628
Correlação linear	0,71
p-valor*	$2,23 \times 10^{-3}$

\* O p-valor menor que 0,005 garante a rejeição da hipótese nula do teste de hipóteses sobre a existência de correlação entre as variáveis, com nível de significância de 1%.

Com isso, das Tabelas 12 e 20, bem como das Figuras 35 e 40, nota-se que o parâmetro energia gerada em potencial apresenta maior variabilidade, indicada pela dispersão em torno da reta, em função do número de habitantes, se comparado à energia consumida. Como consequência, evidenciam-se municípios em que a utilização da energia proveniente dos RSU seria mais eficaz no sentido de suprimento energético.

A Figura 41 foi construída a partir das variáveis energia gerada em potencial e energia consumida, ambas em função do número de habitantes. Importante destacar que os valores de energia consumida, neste caso, são aqueles observados considerando a proporção de consumo para os períodos em que não há a incidência de luz solar<sup>2</sup> e, conseqüentemente, não ocorre geração fotovoltaica. Na figura, os pontos cheios representam a energia gerada em potencial e os pontos vazios representam a energia consumida em 2019, em que cada par de pontos associado a um mesmo município encontra-se sobre a mesma faixa populacional. Nota-se novamente certa variabilidade no comportamento de tais parâmetros em função do número de habitantes.

**Figura 41:** Relação entre o número de habitantes, energia produzida em potencial e o consumo de energia no período sem Sol, para o ano de 2019.



Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), Brasil (2021c) e São Paulo (2020).

Constata-se a partir da Figura 41 que para todos os municípios, exceto Águas de São Pedro (1) e Águas de Lindóia (2)<sup>3</sup>, os pontos vazios estão sempre acima dos cheios, indicando que a quantidade de energia consumida – mesmo nos períodos em que não há incidência de luz solar – é sempre maior que a quantidade potencial de energia gerada.

Para ilustrar a situação, foram obtidos os respectivos potenciais de suprimento energético pela da geração a partir dos RSU para cada município. Este potencial foi calculado a partir da equação (26), descrita na seção 5.2. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 21 e na Figura 42. A tabela mostra a porcentagem do consumo noturno de energia de

<sup>2</sup>Ver equação 26.

<sup>3</sup>Os pontos que representam tais municípios estão coincidindo devido à escala dos eixos verticais da figura. Mais adiante, será possível observar que a energia gerada em potencial e a energia consumida também não coincidem para tais municípios.

cada município suprida a partir da energia gerada em potencial. Entre todos os municípios observados, destacam-se Santos (7), São José do Rio Preto (8), Ribeirão Preto (10) e São José dos Campos (12), apresentando respectivamente as porcentagens de 26,20%, 25,43%, 24,40% e 33,66% de suprimento teórico de consumo de energia elétrica via RSU – os maiores observados.

Analisando a Figura 39, nota-se que o município de São José dos Campos (12) apresentou uma das maiores quantidades de massa coletada, com a quantidade de energia consumida tendo sido mediana, enquanto que Santos (7), São José do Rio Preto (8) e Ribeirão Preto (10) apresentaram distâncias menores entre a massa coletada e a energia consumida, o que pode ser constatado observando os respectivos pontos na figura.

**Tabela 21:** Potencial de suprimento energético a partir de RSU para os municípios estudados, para 2019.

Id (k)	Município	Massa coletada de RSU (ton)	Consumo noturno (kWh)	Potencial de geração via RSU (kWh)	Proporção de suprimento (%)
1	Aguas de Sao Pedro	865,0	8.717.969	432.500	4,96
2	Aguas de Lindoia	5.519,1	26.331.308	2.759.550	10,48
3	Ourinhos	28.620,0	122.184.767	14.310.000	11,71
4	Bauru	210.185,6	523.374.156	105.092.800	20,08
5	Piracicaba	267.150,8	1.203.127.767	133.575.400	11,10
6	Jundiai	275.761,0	1.176.979.366	137.880.500	11,71
7	Santos	410.619,6	783.767.631	205.309.800	26,20
8	Sao Jose do Rio Preto	349.869,7	688.031.613	174.934.850	25,43
9	Sorocaba	192.000,0	1.161.734.006	96.000.000	8,26
10	Ribeirao Preto	529.992,2	1.086.149.366	264.996.100	24,40
11	Osasco	256.747,5	835.628.142	128.373.750	15,36
12	Sao Jose dos Campos	715.851,0	1.063.319.133	357.925.500	33,66
13	Santo Andre	403.252,3	1.552.472.286	201.626.150	12,99
14	Sao Bernardo do Campo	274.743,8	1.442.300.685	137.371.900	9,52
15	Campinas	728.939,3	1.836.327.643	364.469.650	19,85
16	Guarulhos	374.466,2	1.863.388.354	187.233.100	10,05

Fonte: O autor. Dados de São Paulo (2018) e Brasil (2021c).

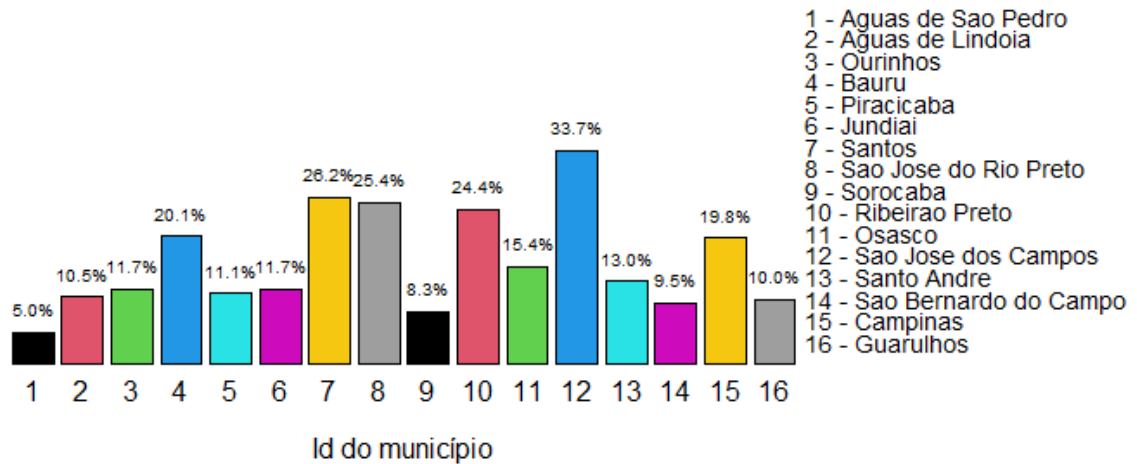
### 5.3.2 CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

A partir das equações (30) e (31), descritas na seção 5.2.2, foram estimados os custos de instalação e de funcionamento e manutenção das plantas de incineração WTE. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 22.

## 5.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Da Figura 42 pode-se notar que os municípios com maior potencial de suprimento foram Santos (7), São José do Rio Preto (8), Ribeirão Preto (10) e São José dos Campos (12), todos eles com potencial maior que 20%, tendo portanto apresentado uma relação entre massa coletada e energia consumida mais favorável neste sentido.

**Figura 42:** Potencial de suprimento energético a partir de RSU para os municípios estudados, no ano de 2019.



Fonte: O autor. Dados de IBGE (2019), Brasil (2021c) e São Paulo (2020).

**Tabela 22:** Estimativas de custos de instalação e de manutenção e funcionamento de plantas WTE, em milhões de dólares.

Id	Município	Instalação (milhões de dólares)	Manutenção e funcionamento (milhões de dólares por ano)
1	Águas de São Pedro	2,04	0,06
2	Águas de Lindoia	8,84	0,32
3	Ourinhos	36,77	1,57
4	Bauru	80,10	3,72
5	Piracicaba	77,05	3,56
6	Jundiaí	192,20	9,81
7	Santos	135,01	6,63
8	São José do Rio Preto	280,03	14,89
9	Sorocaba	133,15	6,529
10	Ribeirão Preto	266,73	14,10
11	Osasco	463,93	26,05
12	São José dos Campos	265,27	14,02
13	Santo André	216,61	11,20
14	São Bernardo do Campo	174,57	8,82
15	Campinas	389,97	21,49
16	Guarulhos	226,14	11,75

Fonte: O autor.

Diferentemente das estimativas de suprimento via geração FV, neste caso nenhum dos municípios apresentou suprimento igual ou superior a 100%, indicando que ainda haveria

dependência da geração centralizada nos períodos em que não há luz do Sol.

Observou-se também indícios de que a relação entre o número de habitantes e a massa coletada dos municípios apresenta certa variabilidade, de modo que a geração via RSU – que depende da massa coletada – não cresça necessariamente na mesma taxa que o número de habitantes, implicando que, quando isso ocorre, haverá uma dependência ainda maior de outras fontes de energia elétrica, como ocorre principalmente para os municípios de Sorocaba (9), São Bernardo do Campo (14) e Guarulhos (16). Por outro lado, este fato também pode resultar em um suprimento energético proporcionalmente maior, como por exemplo ocorre com o município de São José dos Campos (12).

Do ponto de vista da sustentabilidade, a utilização deste tipo de energia implica diretamente em benefícios no aspecto social já que possibilita a destinação e o tratamento adequado dos RSU. Neste sentido, tem-se incentivos que vão além da diminuição na dependência de geração centralizada, englobando principalmente aspectos econômicos, sociais e ambientais.

## 6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Este trabalho propõe que as cidades passem a ser centros geradores de energia elétrica, diminuindo a dependência externa e conseqüentemente diminuindo as perdas referentes ao transporte, aos custos com transformadores de alta tensão e às falhas de fornecimento. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia para avaliar a capacidade de municípios gerarem energia elétrica, levando em conta dados livres fornecidos por entidades de pesquisa e/ou governamentais de parâmetros como consumo anual de energia, irradiação solar diária média e massa anual coletada de resíduos sólidos urbanos (RSU). A metodologia leva em conta estimativas de geração de energia fotovoltaica (FV) distribuída, considerada para os períodos em que há luz do Sol, e geração via RSU atuando de forma complementar, nos períodos de noite.

Os resultados mostram quantitativamente que, principalmente nos períodos de Sol, seria possível diminuir consideravelmente a dependência da geração centralizada. Nos períodos de noite, as estimativas de geração via RSU não mostraram potenciais tão significativos quanto as estimativas FV. Ainda assim o processo de geração considerado implica na incineração quase que total da massa coletada, propiciando benefícios consideráveis sob o ponto de vista de gerenciamento dos RSU.

Tendo em vista que os dados utilizados são disponibilizados por entidades governamentais, em tese é possível aplicar tal metodologia para avaliar o potencial de suprimento via as fonte citadas (fotovoltaica e RSU) para qualquer município de interesse. Por outro lado, há a necessidade de se estimar a área de telhados dos municípios para que seja possível se obter a estimativa de geração fotovoltaica. Existem estudos que apresentam formas de realizar esta estimativa sem medir ou estimar diretamente a área como foi feito neste trabalho, considerando-se dados associados à densidade populacional e tipos de edificação presentes nos municípios como é abordado em Izquierdo, Rodrigues e Fueyo (2008).

Os números associados à geração FV, que foram obtidos considerando-se também a produção fotovoltaica em função dos períodos do ano (os meses), mostram um potencial de suprimento maior do que o consumo observado para o período estudado, o que seria o potencial máximo para geração, na prática dificilmente seria alcançado. Isso pode se justificar principalmente por dois pontos:

- dificilmente seria possível, do ponto de vista prático, preencher 100% da área de telhados com painéis fotovoltaicos. Por isso, o potencial real de geração fotovoltaica seria menor do que o estimado devido a uma menor área de aquisição da irradiação solar;
- ainda que, de fato, 100% da área de telhados fosse ocupada por painéis fotovoltaicos, estes não absorveriam toda a irradiação solar incidente durante o período de Sol devido à sua movimentação durante o dia. Para que o aproveitamento fosse de 100%, os painéis teriam que se movimentar acompanhando a posição do Sol, o que implicaria na instalação de um sistema consideravelmente mais complexo e mais caro de painéis fotovoltaicos. Vale ressaltar que as estimativas foram obtidas considerando-se as variações na posição do Sol e diferentes orientações e inclinações dos painéis FV.

Mesmo considerando os pontos supracitados, o potencial de geração fotovoltaica mostrou-

se considerável. Com isso, os resultados podem ser indicadores de que seja válido desenvolver-se estudos específicos para municípios que tenham intenção de diminuir a dependência da geração centralizada de energia elétrica, com o objetivo de implementar a geração fotovoltaica localizada.

Tais estudos seriam focados na viabilidade econômica e técnica para a instalação de estrutura necessária para a geração fotovoltaica, além de tecnologias que tornariam possível a implementação de uma Smart Grid (p. e. medidores digitais), possibilitando a gestão inteligente da energia gerada.

Neste sentido, seria interessante fazer uma avaliação de custos de instalação de painéis fotovoltaicos para cada município, de acordo com a área de telhados estimada, e compará-los com os custos com eletricidade estimados a partir dos dados de consumo. Com isso, teria-se uma ideia do custo-benefício dos cenários descritos nos resultados.

Outro possível desenvolvimento associado ao potencial de geração FV consiste em avaliar o perfil anual da cobertura do céu por nuvens nos municípios estudados. Isso pode ser feito a partir da análise temporal de imagens de satélite com processamento digital de imagens, permitindo uma compreensão mais específica da influência deste fator no potencial de geração FV.

No que diz respeito à geração via RSU, foi avaliado o comportamento do consumo de energia com relação à massa coletada e, com isso, notou-se o comportamento diferenciado de alguns municípios com certa variabilidade em se tratando desses parâmetros, como pode ser visto na Figura 38. Analisando municípios em faixas de consumo similares, observou-se casos de quantidade de massa coletada bastante acima da tendência linear observada e também casos em que esta quantidade mostrou-se abaixo da tendência.

Nos casos em que a massa coletada é próxima ou maior que a tendência em função da energia consumida, indicada pela reta na Figura 38, tem-se indícios de uma geração em potencial de pelo menos em torno de 15% da energia consumida, desde que haja a disponibilidade da tecnologia adequada para esta forma de geração. Nos casos em que a massa coletada é menor que a tendência, o suprimento energético estimado fica abaixo dos 15%, porém ainda implicando em uma destinação adequada para os RSU, como pode ser observado na Tabela 21.

Em ambos os casos, um fator que implica diretamente nas estimativas é a qualidade da coleta de RSU. Neste sentido, faria-se necessária uma análise com foco na constituição da coleta dos municípios estudados.

Outra análise relevante consiste em avaliar as razões pelas quais não há plantas WTE instaladas no Brasil. No contexto nacional atual, existem fatores regulatórios legais que implicam em barreiras para a utilização dessa tecnologia, incluindo os fatos de a PNRS não incluir o aproveitamento energético na hierarquia da destinação dos RSU. Outro ponto que pesa neste sentido é que empreendimentos WTE ainda não são considerados financiáveis por entidades públicas, como o Banco Nacional do desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (TISI, 2021; ABREN, 2021; TISI; NOGUEIRA, 2021).

Por fim, os valores de instalação, manutenção e funcionamento devem ser levados em conta considerando que esta abordagem traz o aproveitamento energético em conjunto com o tratamento legal e ambientalmente adequado para os RSU. Por isso, tal análise seria enriquecida se realizada num contexto em que custos de destinação e tratamento

adequados dos RSU são considerados.

## Referências

- ABEEOLICA. *Boletim anual de geração eólica 2018*. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica, 2019.
- ABEEOLICA. *Boletim anual de geração eólica 2020*. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica, 2021.
- ABREN. Lixo é energia – um luxo pouco aproveitado no brasil (aupa). *Associação Brasileira de Recuperação Energética – ABREN*, Brasília. Disponível em <<https://abren.org.br/2021/02/15/lixo-e-energia-um-luxo-pouco-aproveitado-no-brasil-aupa/>>. Acesso em abril, 2021.
- ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: 2. ed. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2005.
- ANEEL. *Resolução Normativa número 482*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2012.
- ANEEL. *Dados Abertos de Geração*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/dados/geracao>>. Acesso em: julho, 2021.
- ARENALES, S.; DAREZZO, A. *Cálculo Numérico: aprendizagem com apoio de software*. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017. ISBN 978-85-221-1287-6.
- BRASIL. *Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências*. Brasília: Diário Oficial da União, 2004.
- BRASIL. *Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica e dá outras providências*. Brasília: Diário Oficial da União, 2004.
- BRASIL. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME), 2007.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências*. Brasília: Diário Oficial da União, 2010.
- BRASIL. *Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2012.

- BRASIL. *Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2016.
- BRASIL. *Balanço energético nacional 2017: ano base 2016 – Relatório Síntese*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2017.
- BRASIL. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Brasília: Ministério de Minas e Energia – MME/Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2017.
- BRASIL. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis. Ano 2018*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2019.
- BRASIL. *Balanço energético nacional 2019: ano base 2018 – Relatório Síntese*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2019.
- BRASIL. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis. Ano 2019*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2020.
- BRASIL. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis. Ano 2020*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2021.
- BRASIL. *Balanço energético nacional 2021: ano base 2020 – Relatório Síntese*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2021.
- BRASIL. *Sistema nacional de informações sobre saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos*. Brasília: Ministério do desenvolvimento regional. Secretaria nacional de saneamento. Disponível em <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em: julho, 2021.
- BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy – key element for sustainable waste management. *Waste Management*, v. 37, p. 3–12, 2015.
- CPFL. *Caracterização da Carga da CPFL Paulista*. São Paulo: Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL, 2012.
- CRECESB. *Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito*. Ministério de Minas e Energia – MME. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: janeiro, 2020.
- CREMONEZ, P. A. et al. Digestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 2, p. 21–35, 2013.
- D’ADAMO, I. The profitability of residential photovoltaic systems: a new scheme of subsidies based on the price of CO<sub>2</sub> in a developed PV market. *Social Sciences*, v. 7, n. 148, p. 21, 2018.
- FONSECA, J. A.; SCHLUETER, A. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, v. 142, p. 247–265, 2015.
- FRISCHKNECHT, R. et al. *Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity*. 3. ed. [S.l.], 2016. Report.

GOLDEMBERG, J. Energia e sustentabilidade. *Revista de Cultura e Extensão*, 2015.

IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: setembro, 2019.

IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, DGC/Coordenação de Geografia, DGC/Coordenação de Cartografia*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: julho, 2020.

IEA. *Global Energy Review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO<sub>2</sub> emissions in 2021*. Paris: International Energy Agency – IEA, 2021.

INMET. *Estações meteorológicas de observação de superfície automática*. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: agosto, 2019.

INPE. *Sistema de organização nacional de dados ambientais. Estações de medição de dados ambientais*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>>. Acesso em: agosto, 2019.

IZQUIERDO, S.; RODRIGUES, M.; FUEYO, N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, v. 82, p. 929–939, 2008.

KALDELLIS, J. K.; ZAFIRAKIS, D. The wind energy (r)evolution: a short review of a long history. *Renewable Energy*, v. 36, n. 7, p. 1887–1901, 2011.

KALOGIROU, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397270-5.

LECKNER, B. Process aspects in combustion and gasification waste-to-energy (wte) units. *Waste Management*, v. 37, p. 13–25, 2015.

LIMA, G. C. d.; TOLEDO, A. L. L.; BOURIKAS, L. The role of national energy policies and life cycle emissions of pv systems in reducing global net emissions of greenhouse gases. *Energies*, v. 14, n. 4, 2021. ISSN 1996–1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/961>>.

LUKAC, N. et al. Economic and environmental assessment of rooftops regarding suitability for photovoltaic systems installation based on remote sensing data. *Energy*, v. 107, p. 854–865, 2016.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. de. *Noções de probabilidade e estatística*. 4. ed. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2002. ISBN 85-314-0677-3.

MARTIN, U.; MARTIN, J.; KORALEWSKA, R. Wte: The martin wte technology. In: *Recovery of materials and energy from urban wastes*. 2. ed. Nova York: Springer, 2019.

MERRILL, L.; GERASIMCHUK, I.; SANCHEZ, L. Fossil fuel subsidy reform and taxation: stories for success for the talanoa dialogue. *International Institute for Sustainable Development*, 2017.

- MULLER, L. N. P. S.; ARRUDA, J. B. F.; FILHO, J. J. H. Potencial de usinas waste to energy no nordeste brasileiro: projeção e análise comparativa de impactos na esfera ambiental e no setor energético. *Produção Online*, v. 18, n. 4, p. 1374–1397, 2018.
- NASCIMENTO, T. S. M. *Cidades inteligentes como estratégia para desenvolvimento de cidades sustentáveis – o caso da cidade de Búzios*. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Propaganda e Marketing – ESPM, 2019.
- NERO, M. A. et al. Case study of a model of local solar radiation potential and discussion on the associated sustainable applications and potentials. *Sustainability in Debate*, v. 11, n. 2, p. 173–189, 2020.
- OKOLIE, P. C.; CHUKWUMUANYA, E. O.; ILO, O. H. Techno-economic assessment of municipal solid waste as fuel for electricity generation in awka city. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, v. 9, n. 1, p. 75–86, 2020. ISSN 2277-5668.
- OLIVEIRA, M. Cidades do futuro. *Revista Pesquisa FAPESP*, n. 202, 2012.
- ONAT, N.; BAYAR, H. The sustainability indicators of power production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 3108–3115, 2010.
- ONU. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Organização das Nações Unidas – ONU. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>>. Acesso em: julho, 2021.
- PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 255–274, 2013.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017. ISBN 978-85-17-00089-8.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)/ Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), 2014.
- REN21. *Renewables 2018 – Global Status Report*. 2019.
- REN21. *Renewables 2020 – Global Status Report*. 2021.
- SANTOS, T. et al. Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, v. 51, p. 48–57, 2014.
- SANTOYO-CASTELAZO, E.; AZAPAGIC, A. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, v. 80, p. 119–138, 2014.
- SEADI, T. A. et al. *Source separation of MSW: An overview of the source separation and separate collection of the digestible fraction of household waste, and of other similar wastes from municipalities, aimed to be used as feedstock for anaerobic digestion in biogas plants*. [S.l.]: IEA Bioenergy, 2013. ISBN 978-1-910154-01-4.
- SIDDIQUI, M. M.; NASEER, M. N.; WAHAB, Y. A. Evaluation of municipal solid wastes based energy potential in urban pakistan. *Process*, v. 7, n. 848, p. 14, 2019.

SIGA. *Sistema de Informações de Geração da ANEEL*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: julho, 2021.

SÃO PAULO. *Anuário de energéticos por município no estado de São Paulo – 2018. Ano base 2017*. São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração, 2018.

SÃO PAULO. *Anuário de energéticos por município no estado de São Paulo – 2020. Ano base 2019*. São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração, 2020.

STEWART, J. *Cálculo*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015. ISBN 978-85-221-1259-3.

TEHRANI, F. B.; HAGHI, E. Techno-economic assessment of municipal solid waste incineration plant-case study of tehran, iran. In: THE FIRST SUSTAINABLE DEVELOPMENT CONFERENCE OF ENGINEERING SYSTEMS IN ENERGY, WATER AND ENVIRONMENT. Tehran, Iran: Mechanical Engeneering Department. Iran University of Science and Technology, 2015.

TISI, Y. S. A. B. The brazilian waste to energy market: Energising waste opportunities (efw net). *Associação Brasileira de Recuperação Energética – ABREN*, Brasília. Disponível em <<https://abren.org.br/2021/02/17/the-brazilian-waste-to-energy-market-energising-waste-opportunities-efw-net/>>. Acesso em abril, 2021.

TISI, Y. S. A. B.; NOGUEIRA, G. Consulta pública ao plano nacional de resíduos sólidos: é hora de transformar lixo em energia. *Associação Brasileira de Recuperação Energética – ABREN*, Brasília. Disponível em <<https://abren.org.br/2020/10/01/consulta-publica-ao-plano-nacional-de-residuos-solidos-e-hora-de-transformar-lixo-em-energia-estadao/>>. Acesso em abril, 2021.

TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. ISBN 978-85-60025-06-0.

WASTE ATLAS. *Interactive Map: WTE plants*. Disponível em: <<http://www.atlas.dwaste.com/>>. Acesso em: dezembro, 2019.

WILD-SCHOLTEN, M. J. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 119, p. 296–305, 2013.

WINTERLE, P. *Vetores e geometria analítica*. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. ISBN 978-85-430-0239-2.

WU, P. et al. Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. *Energy Procedia*, v. 105, p. 68 – 74, 2017.

YUE, D.; YOU, F.; DARLING, S. B. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. *Solar Energy*, v. 106, p. 669–678, 2014.