

<http://dx.doi.org/10.48005/2237-3713rta2024v13n1p98113>

Determinação da potência de módulos fotovoltaicos em usinas de geração distribuída através de um modelo algébrico*

Determination of the power of photovoltaic modules in distributed generation plants using an algebraic model

Luiz Guilherme Pereira Nunes Junior

Universidade Federal Fluminense
luiz.junior2014@engenharia.uff.br

Paulo Roberto Duailibe Monteiro

Universidade Federal Fluminense
pauloduailibe@id.uff.br

RESUMO

A determinação da potência dos módulos fotovoltaicos necessária ao atendimento da demanda energética dos consumidores inseridos na geração distribuída é de fundamental importância para o seu correto funcionamento. Este estudo tem como objetivo principal propor uma metodologia de cálculo da potência dos módulos fotovoltaicos e analisar o resultado com o valor obtido pelo software PVSyst. Para isto, foram realizadas análises de bibliografias e literaturas sobre dimensionamentos de sistemas de geração solar fotovoltaica e sobre as resoluções normativas ditadas pela ANEEL para o setor, entre elas a Resolução 1.059, que abarca todas as regras impostas pela Lei 14.300, além da aplicação de um estudo de caso em uma usina de Microgeração Distribuída. Mediante a comparação entre os valores de potência dos painéis fotovoltaicos calculado e o simulado pelo software, os resultados evidenciam uma diferença que é impactada principalmente pela escolha do método de cálculo do consumo diário médio da instalação.

Palavras-chaves: Geração Distribuída. Sistema Fotovoltaico. PVSyst. REN 1.059. Lei 14.300. Energia Elétrica.

ABSTRACT

Determining the power of photovoltaic modules necessary to meet the energy demands of consumers included in distributed generation is of fundamental importance for their correct functioning. This study's main objective is to propose a methodology for calculating the power of photovoltaic modules and analyze the result with the value obtained by the PVSyst software. For this, analyzes of bibliographies and literature were carried out on the sizing of photovoltaic solar generation systems and on the normative resolutions dictated by ANEEL for the sector, including Resolution 1,059, which covers all the rules imposed by Law 14,300, in addition to the application of a case study in a Distributed Microgeneration plant. By comparing the power values of the photovoltaic panels calculated and those simulated by the software, the results show a difference that is mainly impacted by the choice of method for calculating the installation's average daily consumption.

Keywords: Distributed Energy. Photovoltaic System. PVSyst. REN 1.059. Law 14.300. Electrical Energy.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilização do acesso à energia elétrica é um bem primordial à população, sendo um fator essencial para o desenvolvimento econômico, social e cultural de uma nação. Com o tempo, é natural que o crescimento econômico e populacional impulse uma demanda energética cada vez maior e, sendo assim, é imprescindível que a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica esteja preparada para o atendimento dessa demanda crescente. Nesse sentido, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em parceria com o ONS (Operador Nacional do Sistema) e a CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) divulgaram no dia 05 de abril de 2024 a 1ª Revisão Quadrimestral do Plano 2024 – 2028 das Previsões de Carga Global para o Planejamento Anual da Operação Energética [1], em que é previsto no Brasil um crescimento médio do PIB de 2,5% e de 3,3% para a carga. Estes indicadores servem como referência para que o Sistema Elétrico Brasileiro norteie seus investimentos em infraestrutura para o setor elétrico nacional.

Diferentemente dos países desenvolvidos do mundo, o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente composta por fontes renováveis. Historicamente, nossa matriz apresenta uma maior participação de geração advinda de grandes usinas hidrelétricas localizadas distantes dos grandes centros urbanos. Isto se deve ao grande potencial energético existente nas bacias hidrográficas nacionais. Todavia, atualmente este cenário vem sendo alterado como consequência da inserção, cada vez maior, de gerações distribuídas próximas às cargas, ou seja, uma geração de energia elétrica nos próprios centros urbanos e também devido à geração advinda dos parques eólicos, sobretudo na região Nordeste. A Figura 1 mostra a participação de cada tipo de fonte dos empreendimentos em operação fiscalizados pela ANEEL [2] que compõe a matriz elétrica brasileira.

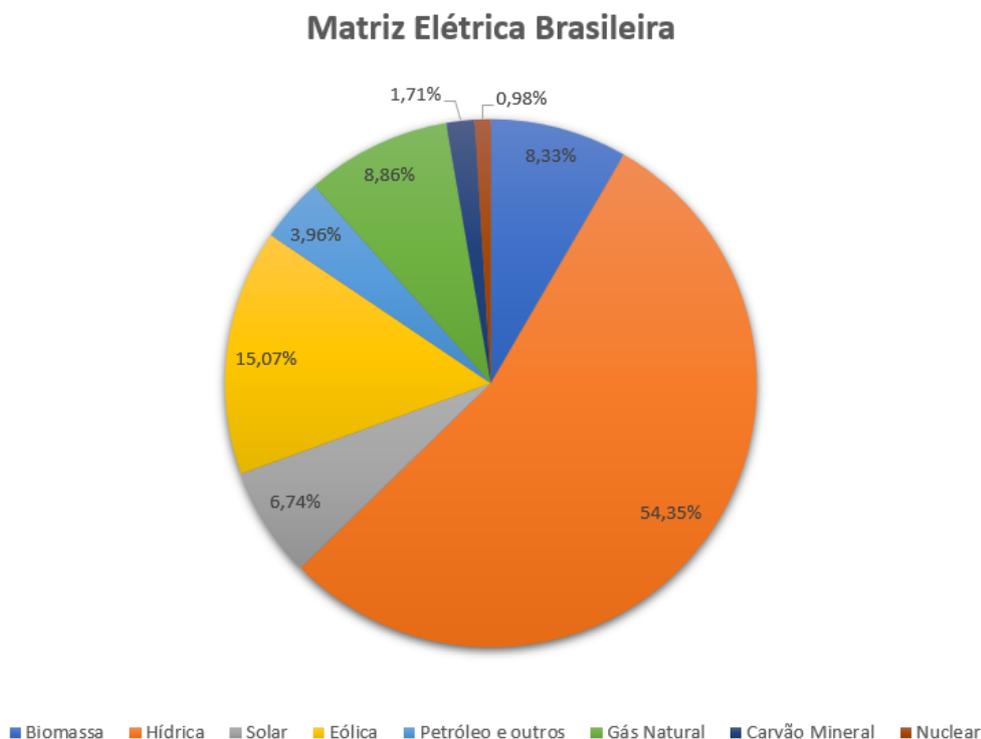


Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira. Adaptado de ANEEL (2024)

A Regulamentação que, inicialmente, estabeleceu as condições necessárias para que os consumidores tenham o direito de conectar sistemas de MMGD (Micro e Minigeração

Distribuída) às redes de distribuição das Concessionárias de Energia Elétrica e de participar do SCEE (Sistema de Compensação de Energia Elétrica) foi a Resolução 482 de 17 de abril de 2012. Desde então, novas resoluções normativas foram estabelecidas pela ANEEL: Resolução 1.000, de 7 de dezembro de 2021, que estabeleceu as novas regras de prestação do serviço público de energia elétrica, além de complementar os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e os Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET) e a Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, resolução esta que abarca todos os dispositivos da Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída.

O crescimento expressivo da Geração Distribuída (GD) na matriz elétrica brasileira traz como benefícios a diminuição das perdas ôhmicas nas linhas de distribuição e transmissão, uma vez que a geração é realizada próxima à carga, a diminuição do impacto do regime das chuvas associado à variação de geração nas usinas hidrelétricas e a redução do gasto com energia elétrica pelos consumidores brasileiros.

As usinas de geração solar fotovoltaica (UFV) é um dos sistemas de GD que mais crescem no país. Estes sistemas usufruem da elevada irradiação solar incidente no Brasil para realizarem a conversão da energia proveniente da irradiação solar em energia elétrica. Esta conversão é realizada nas células presentes nos módulos fotovoltaicos, normalmente compostas de silício ou outro material semicondutor, dopado com boro e fósforo. Quando a irradiação solar incide sobre a superfície da célula, estando a mesma conectada a uma carga, produz-se uma diferença de potencial, que leva os elétrons livres do material semicondutor a se movimentar de forma ordenada, fazendo circular, assim, uma corrente contínua do terminal positivo ao terminal negativo da célula (considerando o sentido convencional de circulação da corrente elétrica) [3].

Em março de 2024, dados contabilizados pela ANEEL demonstraram que o Brasil ultrapassou 40 GW de capacidade instalada em energia solar. Ainda sobre os dados disponibilizados pela agência, na data de 06 de maio de 2024 o quantitativo de GD proveniente da fonte solar fotovoltaica somam 2.591.129 instalações em mais de 5.547 municípios brasileiros, fornece créditos de energia para 3.708.230 unidades consumidoras e somam aproximadamente 28 GW de potência instalada. A Figura 2 abaixo ilustra a quantidade anual de conexões de gerações distribuídas na modalidade solar fotovoltaica no Brasil para o período compreendido entre 2015 e 2024.

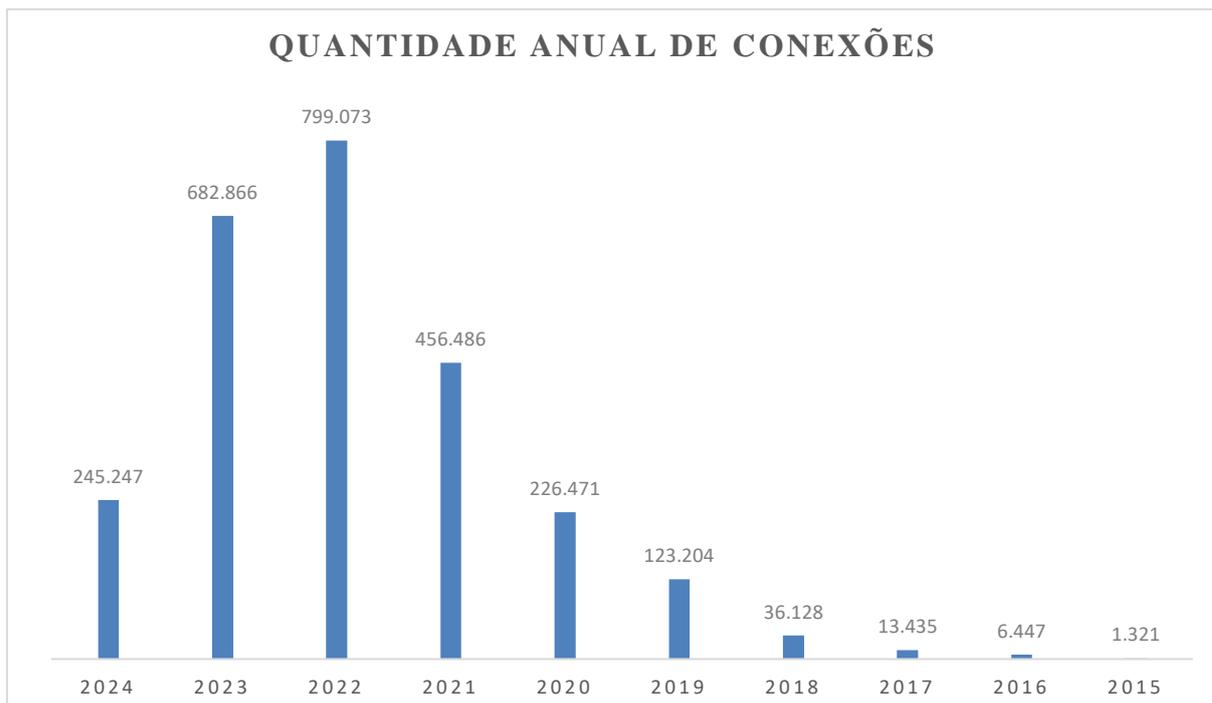


Figura 2 – Quantidade Anual de Conexões. Adaptado de ANEEL (2024)

Dessa forma, este estudo tem como objetivo propor uma metodologia de cálculo da potência dos módulos fotovoltaicos utilizando o consumo anual de energia elétrica de uma instalação real situada no município de Tanguá-RJ dentro da modalidade de Microgeração Distribuída e, posteriormente, analisar o resultado com o valor obtido pelo software PVSyst.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico, é apresentado um estudo bibliográfico com base nas pesquisas encontradas na literatura relacionadas ao dimensionamento de sistemas de geração solar fotovoltaica conectados à rede (on-grid) e de sistemas isolados (off-grid). Essa análise torna-se ainda mais necessária no atual cenário regulatório que o Brasil está inserido. Com a Lei 14.3000/2022 e posteriormente pela Regulação 1.059/2023 da ANEEL, os sistemas solares fotovoltaicos enquadrados como geração distribuída passaram a ter que suportar uma taxa progressiva de suas respectivas gerações de energia elétrica [4]. Dessa forma, um assertivo dimensionamento da potência dos módulos fotovoltaicos é imprescindível para a viabilidade econômica e correto atendimento da demanda energética destes projetos. Uma revisão bibliográfica foi feita e a seguir estão os quatro principais artigos analisados.

2.1 Dimensionamento prático de um sistema fotovoltaico – estudo de caso utilizando o software PVSyst

Neste trabalho, os autores apresentam um estudo de caso acerca de um dimensionamento de um projeto de sistema de geração solar fotovoltaica residencial na cidade de Uberlândia – MG utilizando o software PVSyst. A escolha dessa ferramenta computacional foi, segundo os autores, devido à sua interface intuitiva e seu vasto banco de dados para a realização do dimensionamento. Dados relevantes do local da instalação do sistema foram levantados: área disponível para instalação, irradiação média anual e possibilidade de sombras. Por último, algumas variáveis foram determinadas, sendo elas: orientação dos módulos,

composição do sistema fotovoltaico e as perdas durante o projeto. O artigo, em sua conclusão, destaca a simplicidade, precisão, visão sistêmica e rapidez com que o software PVSyst proporciona aos usuários durante o dimensionamento de uma UFV (Usina Fotovoltaica) [5].

2.2 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos

Neste estudo, o autor tem como principal objetivo propiciar o levantamento de informações importantes para o correto dimensionamento de um sistema gerador fotovoltaico: potência do sistema, tensão de saída, corrente de saída, número de módulos, etc. Além disso, demonstra como estimar a energia produzida pelo sistema mediante à intensidade da irradiação solar que incide no local da pretendida instalação. A seleção do inversor e dos painéis fotovoltaicos é detalhada, ressaltando que a potência máxima do inversor deve ser maior que 0,7 vezes e menor que 1,2 vezes a potência dos painéis fotovoltaicos para um bom funcionamento do sistema. Ainda, é tratado o dimensionamento de sistemas isolados, demonstrando como deve ser realizado o dimensionamento das baterias, controlador de carga e inversor de forma conjunta e integrada [6].

2.3 Pré-dimensionamento de Sistema Solar Fotovoltaico: Estudo de Caso do Edifício Sede do CREA-SC

Neste artigo, os autores apresentam um estudo de caso de um pré-dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. O local da instalação é o edifício sede de CREA-SC, localizado em Florianópolis-SC. No trabalho, é detalhado a área disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos, o consumo médio mensal e consumo médio diário foi determinado a partir das contas de energia elétrica do período de janeiro de 2002 até maio de 2003, a orientação geográfica foi determinada a partir de uma visita *in loco* e para a radiação solar foi utilizado o programa Radiasol 2.1. Já nos resultados, a partir do consumo médio diário durante o ano, o ganho por radiação solar diário e o rendimento do inversor (93%) calculou-se a potência média necessário em kW. Por último, dividindo a potência calculada anteriormente por uma eficiência de 12% para os painéis, calculou-se a área necessária para a instalação e comparou este resultado com a área disponível. [7]

2.4 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos

Neste trabalho, a autora analisa e descreve os principais componentes que constituem os sistemas fotovoltaicos conectados à rede e os sistemas isolados, apresenta uma metodologia para o dimensionamento e, ainda, desenvolve uma aplicação em linguagem Hypertext Preprocessor (PHP) para a Internet, para os dois modelos de sistemas mencionados anteriormente. Quanto aos programas de simulação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, foi realizada uma análise comparativa de diversos softwares, entre eles o Sol Pro, o SolarPro e o PVSyst. Por fim, para os estudos de caso, foi utilizada uma habitação no município português de Bragança para o caso de sistema isolado e no sistema conectado à rede, adotou-se uma produção de 3,68 kW para injeção na rede de energia elétrica. [8]

3. METODOLOGIA

Devido a importância de um dimensionamento assertivo para as usinas solares fotovoltaicas, este estudo propõe um estudo de caso com a aplicação de um modelo algébrico para se calcular a potência necessária de módulos fotovoltaicos que atendam a demanda energética anual de quatro instalações de uma fazenda localizada no município de Tanguá-RJ. Este dimensionamento foi realizado respeitando o enquadramento de microgeração distribuída conforme a Resolução 1.059/2023 da ANEEL, ou seja, usina(s) que somem potência nominal

de até 75 kW. São realizados três dimensionamentos de forma algébrica e um pré-dimensionamento utilizando o software PVSyst. As seguintes premissas foram adotadas:

- Potência de pico dos módulos calculado a partir do consumo médio mensal utilizando a média dos três maiores consumos mensais para as quatro instalações que serão abarcadas;
- Potência de pico dos módulos calculado a partir do consumo médio mensal utilizando a média aritmética dos consumos mensais para as quatro instalações que serão abarcadas;
- Potência de pico dos módulos calculado a partir de um pré-dimensionamento realizado pelo software PVSyst;
- Potência de pico dos módulos calculado a partir da média aritmética entre o maior valor dimensionado algebricamente e o valor obtido pelo PVSyst.

Por fim, é feita uma análise comparativa ao longo do tempo da geração e consumo ao longo dos meses do ano para cada um dos dimensionamentos obtidos a partir do software Microsoft Excel.

4. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, a metodologia proposta é aplicada no dimensionamento de um sistema de geração fotovoltaica que atenda a demanda de energia elétrica anual de quatro instalações de uma fazenda situada no município de Tanguá-RJ. No local da instalação, além da sede há três galpões que juntos totalizam uma área aproximada de 400 m². Neste estudo, não é abordado o dimensionamento da potência nominal dos inversores nem dos demais componentes que compõe o sistema, sendo o objetivo central o dimensionamento da potência dos módulos fotovoltaicos. A seguir, a Tabela 1 apresenta o consumo mensal do ano de 2023 para a sede da fazenda, para o galpão que armazena os produtos de origem animal, para o galpão que armazena os produtos de origem vegetal e para o galpão que armazena os produtos não perecíveis.

Mês	Consumo da sede (kWh)	Consumo galpão origem animal (kWh)	Consumo galpão origem vegetal (kWh)	Consumo galpão origem não perecível (kWh)
Janeiro/2023	319	1.223	304	0
Fevereiro/2023	337	1.438	685	0
Março/2023	378	1.482	977	85
Abril/2023	494	1.217	940	74
Maio/2023	560	1.098	847	108
Junho/2023	713	920	724	126
Julho/2023	1.213	859	835	158
Agosto/2023	746	1.031	833	190
Setembro/2023	1.198	1.104	830	184
Outubro/2023	1.042	858	864	197
Novembro/2023	1.280	1.117	882	233
Dezembro/2023	1.291	1.322	814	205
Total	9.571	13.669	9.535	1.560

Tabela 1 – Consumo durante 2023. Fonte: Autor 2024.

Conforme a Tabela 1, as quatro instalações da fazenda representam um consumo anual de energia elétrica de 34.335 kWh no ano de 2023.

Os dados de irradiação solar foram retirados da página do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica) [9], através das coordenadas geográficas do local de interesse de implantação. Os dados de irradiação adotados consideram a premissa de ângulo igual a latitude, neste caso, de 22,8°, sendo a média diária de irradiação solar de 4,98 kWh/m² por dia. A Tabela 2 abaixo apresenta os valores de irradiação solar diária média para cada mês do ano.

Mês	Irradiação (kWh/m ² . dia)
Janeiro	5,54
Fevereiro	6,05
Março	5,21
Abril	5,06
Mai	4,46
Junho	4,44
Julho	4,32
Agosto	5,00
Setembro	4,76
Outubro	4,97
Novembro	4,73
Dezembro	5,26

Tabela 2 – Irradiação solar diária média mensal. Adaptado de CRESESB 2024.

O primeiro dimensionamento foi realizado através do consumo médio mensal utilizando a média dos três maiores consumos mensais para as quatro instalações. Conforme cálculo a seguir:

$$X = \frac{A_1+A_2+A_3}{3} + \frac{B_1+B_2+B_3}{3} + \frac{C_1+C_2+C_3}{3} + \frac{D_1+D_2+D_3}{3} \quad [1]$$

Onde:

X = consumo médio mensal via média dos 3 maiores valores de consumo (kWh);

A₁ = maior consumo mensal para a sede (kWh);

A₂ = segundo maior consumo mensal para a sede (kWh);

A₃ = terceiro maior consumo mensal para a sede (kWh);

B₁ = maior consumo mensal para o primeiro galpão (kWh);

B₂ = segundo maior consumo mensal para o primeiro galpão (kWh);

B₃ = terceiro maior consumo mensal para o primeiro galpão (kWh);

C₁ = maior consumo mensal para o segundo galpão (kWh);

C₂ = segundo maior consumo mensal para o segundo galpão (kWh);

C₃ = terceiro maior consumo mensal para o segundo galpão (kWh);

D₁ = maior consumo mensal para o terceiro galpão (kWh);

D_2 = segundo maior consumo mensal para o terceiro galpão (kWh);

D_3 = terceiro maior consumo mensal para o terceiro galpão (kWh).

O resultado da Equação [1] é um consumo mensal médio de 3.820 kWh. Entretanto, para o cálculo da potência dos módulos fotovoltaicos é necessário transformar esse valor em consumo médio diário. Sendo assim, dividindo o valor anterior por 30 dias, tem-se um consumo médio de 127,33 kWh por dia. Neste estudo foi adotado uma eficiência de 80% dos painéis. Posto isso, o cálculo para a potência requerida dos painéis fotovoltaicos é obtido a partir da equação [2]:

$$P = \frac{X}{E \cdot I} \quad [2]$$

Onde:

P = potência dos módulos fotovoltaicos (kWp);

X = consumo médio por dia (kWh);

E = eficiência dos módulos fotovoltaicos (%);

I = irradiação média diária (kWh/m². dia).

Resolvendo a Equação [2] obtém-se uma potência necessária de módulos fotovoltaicos de 32 kWp. A partir desse valor de potência, dos dados de irradiação solar médio por dia para cada mês do ano obtidos do CRESESB, do número de dias de cada mês e de uma premissa que os painéis sofrem uma degradação de 0,8% de sua capacidade de geração por ano, é possível realizar uma análise comparativa ao longo do tempo da geração e consumo das instalações objeto deste estudo.

A Tabela 3 e a Figura 3 seguir apresentam a geração e consumo durante o primeiro ano de operação do sistema dimensionado.

Mês	Consumo (kWh)	Energia média diária (kWh)	Energia média mensal (kWh)
Janeiro	1.846,0	141,82	4.396,54
Fevereiro	2.460,0	154,88	4.336,64
Março	2.922,0	133,38	4.134,66
Abril	2.725,0	129,54	3.886,08
Mai	2.613,0	114,18	3.539,46
Junho	2.483,0	113,66	3.409,92
Julho	3.065,0	110,59	3.428,35
Agosto	2.800,0	128,00	3.968,00
Setembro	3.316,0	121,86	3.655,68
Outubro	2.961,0	127,23	3.944,19
Novembro	3.512,0	121,09	3.632,64
Dezembro	3.632,0	134,66	4.174,34
Total	34.335,00	1.530,88	46.506,50

Tabela 3 – Primeiro dimensionamento: geração e consumo para o primeiro ano de operação.

Fonte Autor 2024.

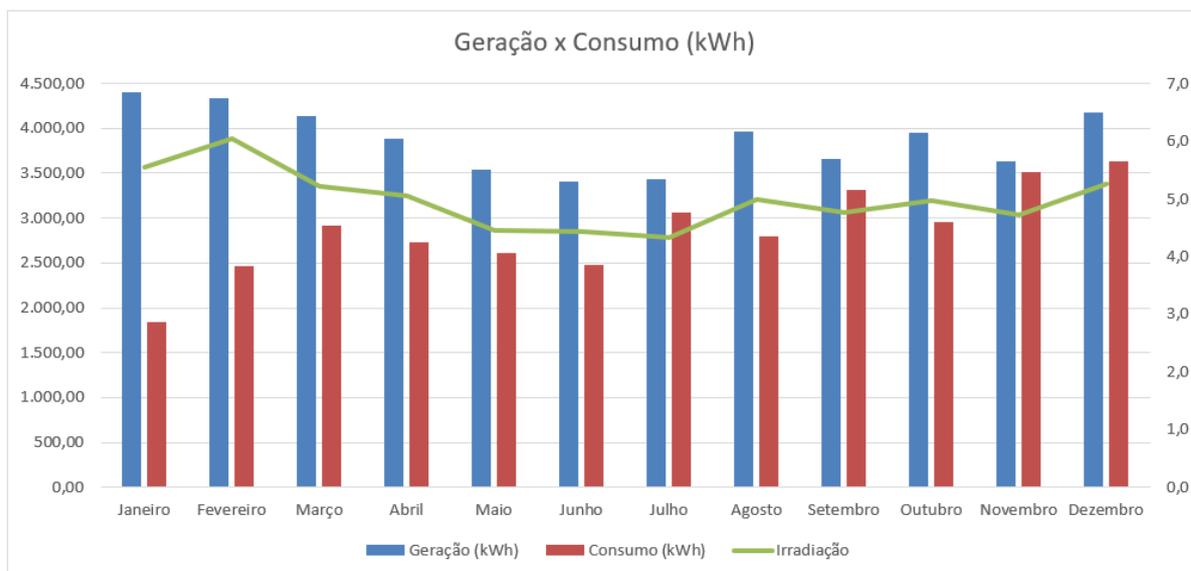


Figura 3 – Primeiro dimensionamento: geração, consumo e irradiação no primeiro ano de operação. Fonte Autor 2024.

A Figura 4 apresenta a geração estimada durante o período em que o sistema solar fotovoltaico consegue suprir a demanda de energia elétrica da fazenda. Para este primeiro dimensionamento, o sistema consegue atender a demanda por 38 anos.

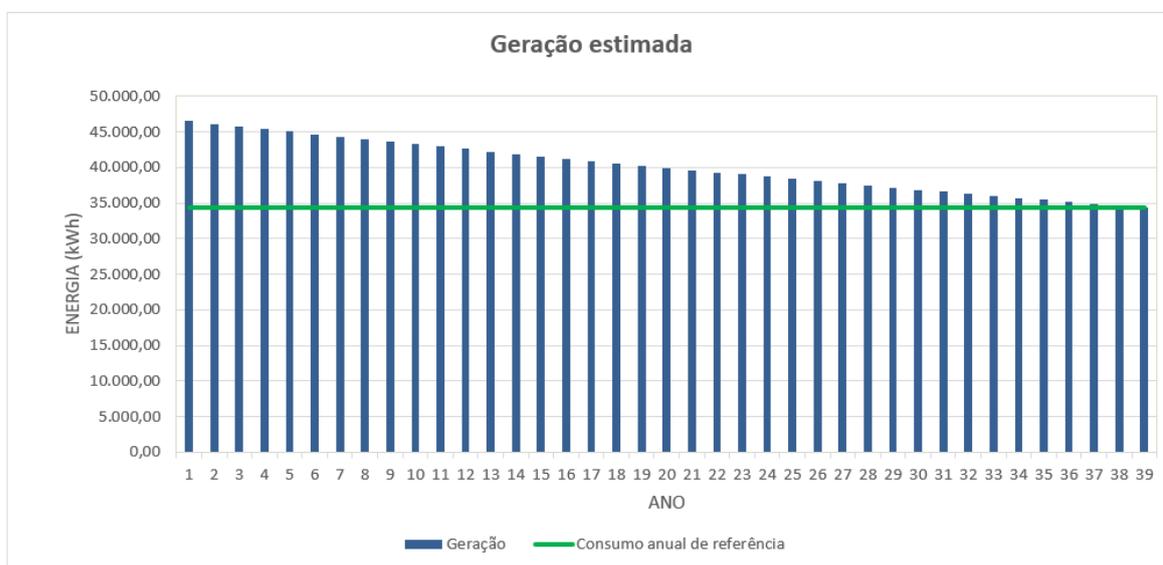


Figura 4 – Primeiro dimensionamento: geração de energia ao longo do tempo. Fonte Autor 2024.

Por fim, a partir da implantação dessa Usina Fotovoltaica (UFV) é possível evitar a emissão de aproximadamente 1,80 tCO₂e/ano (um inteiro e oito décimos de toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano) na atmosfera. Este valor foi obtido a partir do Fator Médio Mensal de 0,0385 tCO₂/MWh para o ano de 2023, divulgado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação [10]. Este indicador representa a quantidade média de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica advinda de todas as usinas que estão gerando energia no SIN (Sistema Interligado Nacional).

O segundo dimensionamento foi realizado através do consumo médio mensal utilizando a média aritmética padrão dos consumos mensais para as quatro instalações.

$$Y = \frac{E}{12} + \frac{F}{12} + \frac{G}{12} + \frac{H}{12} \quad [3]$$

Onde:

Y = consumo médio mensal obtido via média aritmética (kWh);

E = consumo anual total para a sede (kWh);

F = consumo anual total para o primeiro galpão (kWh);

G = consumo anual total para o segundo galpão (kWh);

H = consumo anual total para o terceiro galpão (kWh).

O resultado da Equação [3] é um consumo mensal médio de 2.861,25 kWh e um consumo médio de 95,38 kWh por dia. Foi novamente adotado uma eficiência de 80% dos painéis. O cálculo para a potência requerida dos painéis fotovoltaicos é obtido de forma análoga à Equação [2], tendo como única diferença a utilizado do valor obtido Y no lugar do valor calculado para X . Logo, o valor de potência calculado para o segundo dimensionamento foi 24 kWp.

A Tabela 4 e a Figura 5 a seguir apresentam a geração e consumo durante o primeiro ano de operação do sistema dimensionado.

Mês	Consumo (kWh)	Energia média diária (kWh)	Energia média mensal (kWh)
Janeiro	1.846,0	106,37	3.297,41
Fevereiro	2.460,0	116,16	3.252,48
Março	2.922,0	100,03	3.100,99
Abril	2.725,0	97,15	2.914,56
Maio	2.613,0	85,63	2.654,59
Junho	2.483,0	85,25	2.557,44
Julho	3.065,0	82,94	2.571,26
Agosto	2.800,0	96,00	2.976,00
Setembro	3.316,0	91,39	2.741,76
Outubro	2.961,0	95,42	2.958,14
Novembro	3.512,0	90,82	2.724,48
Dezembro	3.632,0	100,99	3.130,75
Total	34.335,00	1.148,16	34.879,87

Tabela 4 – Segundo dimensionamento: geração e consumo para o primeiro ano de operação.
Fonte Autor 2024.

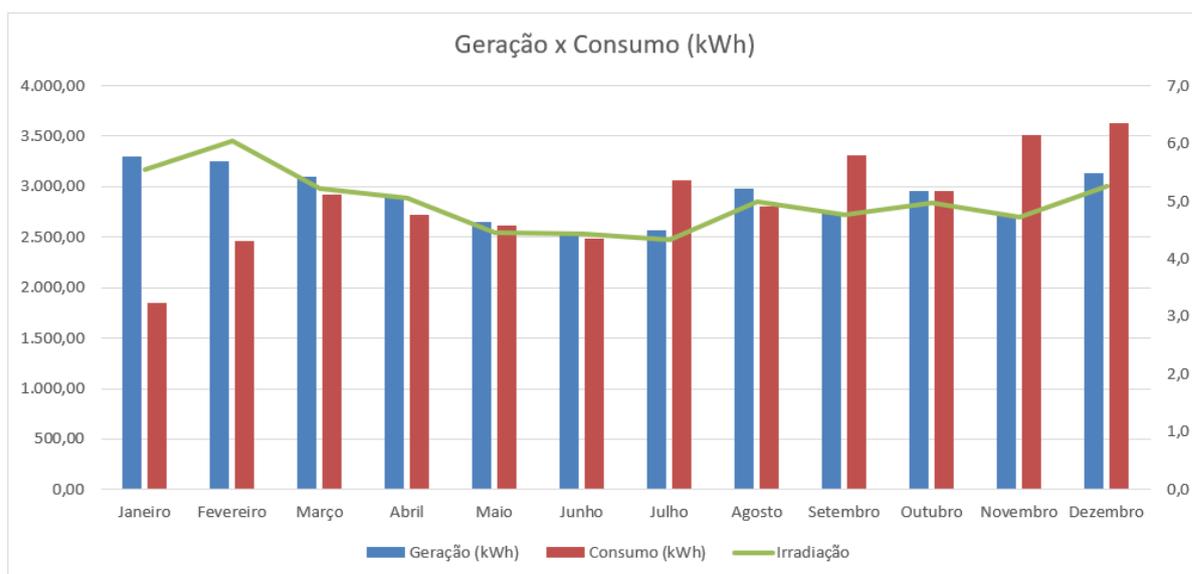


Figura 5 – Segundo dimensionamento: geração, consumo e irradiação no primeiro ano de operação. Fonte Autor 2024.

A Figura 6 apresenta a geração estimada durante 15 anos. Neste segundo dimensionamento, o sistema conseguiu suprir a demanda energética anual das quatro instalações por apenas 2 anos.

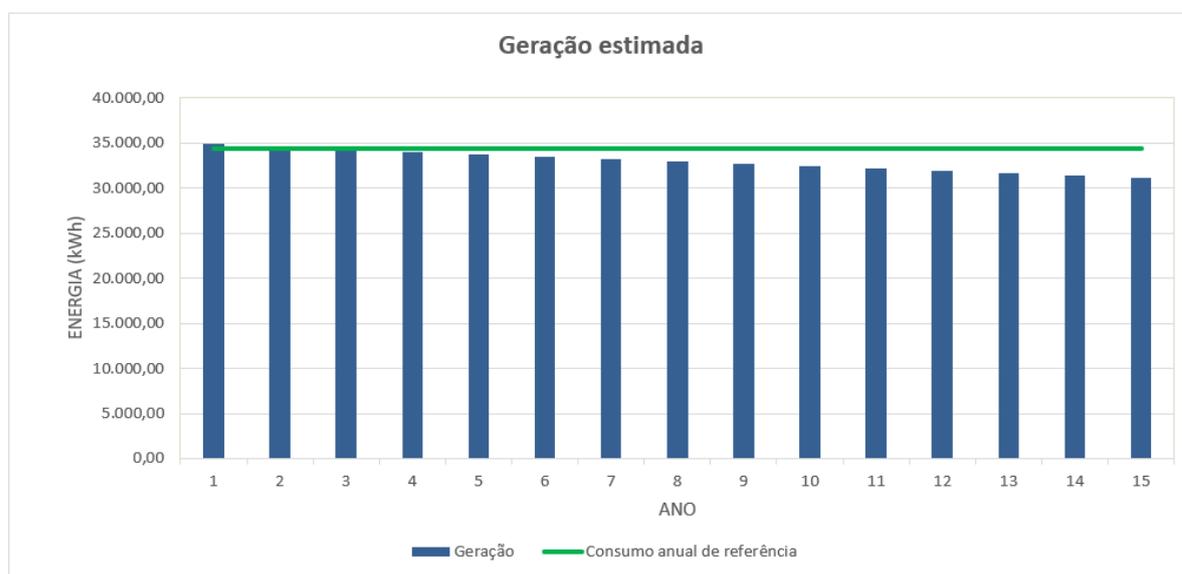


Figura 6 – Segundo dimensionamento: geração de energia ao longo do tempo. Fonte Autor 2024.

A partir da implantação dessa UFV é possível evitar a emissão de aproximadamente 1,34 tCO₂e/ano na atmosfera.

O terceiro dimensionamento foi realizado no software PVSyst V7.4.5 na modalidade de pré-dimensionamento conectado à rede. Foi adotada a inclinação dos módulos igual à latitude do local, no caso 22°, ângulo de azimute de 0°, módulos padrão e constituídos de células de silício policristalino e a irradiação solar incidente no local foi obtida a partir da localização da

estação solarimétrica correspondente às coordenadas geográficas do local da instalação. Quanto à demanda energética que o sistema deve atender, foi inserido a demanda energética anual da fazenda, ou seja, 34.335 kWh. O resultado calculado pelo software foi uma potência de 21,6 kWp e uma área necessária para implantação de 144 m². A Tabela 5 apresenta a irradiação solar incidente e a Tabela 6 a geração e consumo durante o primeiro ano de operação do sistema dimensionado pelo PVSyst.

Mês	Irradiação (kWh/m ² . dia)
Janeiro	5,92
Fevereiro	5,91
Março	5,41
Abril	5,42
Maio	4,98
Junho	4,82
Julho	4,98
Agosto	5,08
Setembro	5,22
Outubro	5,10
Novembro	4,75
Dezembro	5,29

Tabela 5 – Irradiação solar diária média mensal. Adaptado de PVSyst 2024.

Mês	Consumo (kWh)	Energia média diária (kWh)	Energia média mensal (kWh)
Janeiro	1.846,0	106,3	3.296,00
Fevereiro	2.460,0	106,1	2.971,00
Março	2.922,0	97,22	3.014,00
Abril	2.725,0	97,43	2.923,00
Maio	2.613,0	89,48	2.774,00
Junho	2.483,0	86,59	2.598,00
Julho	3.065,0	89,58	2.777,00
Agosto	2.800,0	91,44	2.835,00
Setembro	3.316,0	93,85	2.816,00
Outubro	2.961,0	91,47	2.835,00
Novembro	3.512,0	85,22	2.557,00
Dezembro	3.632,0	94,81	2.939,00
Total	34.335,00	1.129,49	34.335,00

Tabela 6 – Pré-dimensionamento pelo PVSyst: geração e consumo para o primeiro ano de operação. Fonte Autor 2024.

Portanto, o sistema dimensionado pelo PVSyst é capaz de suprir a demanda de energia elétrica anual da fazenda apenas no primeiro ano de operação, considerando que o sistema perde sua eficiência ao longo dos anos como resultado da deterioração dos módulos fotovoltaicos. Quanto à redução de emissões, essa UFV possui o potencial de evitar 1,21 tCO₂e/ano na atmosfera.

O terceiro dimensionamento algébrico foi realizado através da média aritmética entre o maior valor de potência calculada e o valor obtido pelo PVSyst. Sendo assim, o valor obtido é de 26,8 kWp.

A Tabela 7 e a Figura 7 a seguir apresentam a geração e consumo durante o primeiro ano de operação do sistema dimensionado.

Mês	Consumo (kWh)	Energia média diária (kWh)	Energia média mensal (kWh)
Janeiro	1.846,0	118,78	3.682,11
Fevereiro	2.460,0	129,71	3.631,94
Março	2.922,0	111,70	3.462,77
Abril	2.725,0	108,49	3.254,59
Maio	2.613,0	95,62	2.964,29
Junho	2.483,0	95,19	2.855,81
Julho	3.065,0	92,62	2.871,24
Agosto	2.800,0	107,20	3.323,20
Setembro	3.316,0	102,05	3.061,63
Outubro	2.961,0	106,56	3.303,26
Novembro	3.512,0	101,41	3.042,34
Dezembro	3.632,0	112,77	3.496,01
Total	34.335,00	1.282,11	38.949,19

Tabela 7 – Terceiro dimensionamento: geração e consumo para o primeiro ano de operação. Fonte Autor 2024.

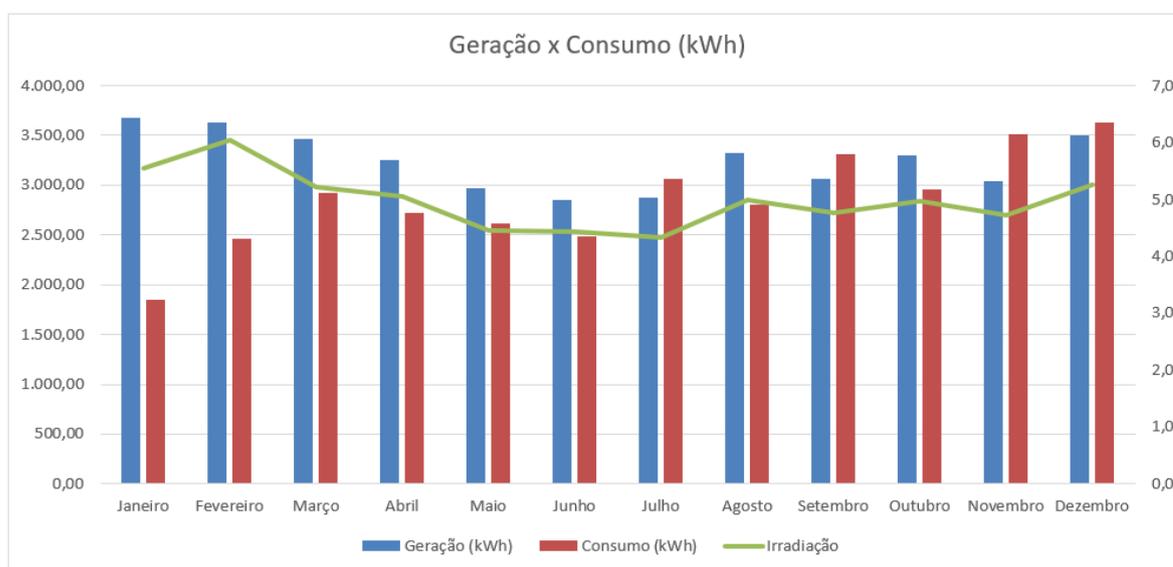


Figura 7 – Terceiro dimensionamento: geração, consumo e irradiação no primeiro ano de operação. Fonte Autor 2024.

A Figura 8 apresenta a geração estimada durante 25 anos. Neste terceiro dimensionamento, o sistema conseguiu suprir a demanda de energia elétrica anual das quatro instalações por 16 anos.

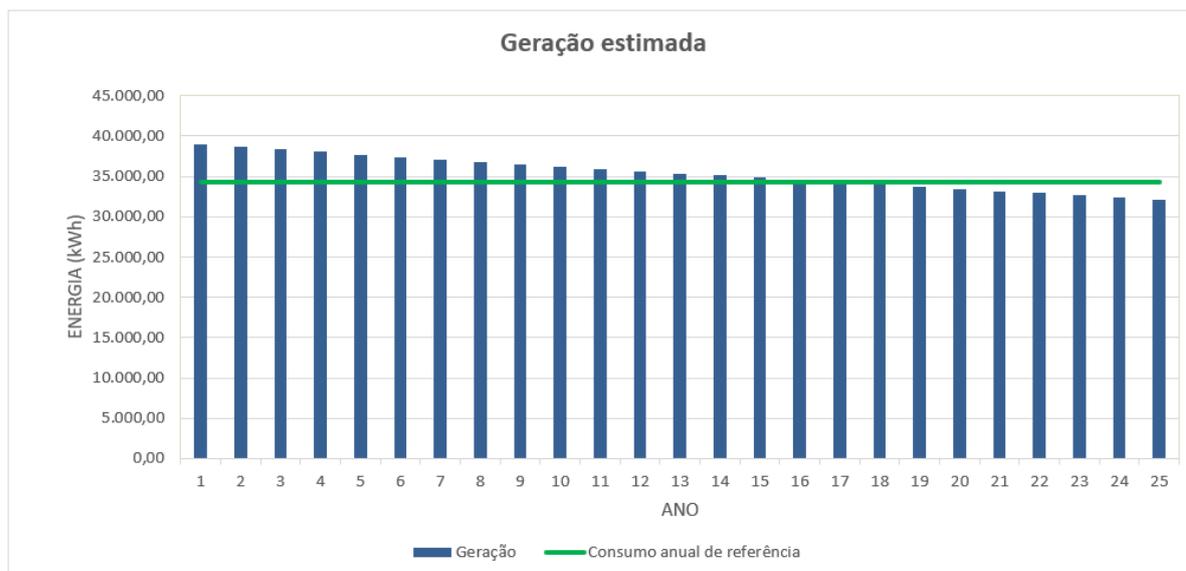


Figura 8 – Terceiro dimensionamento: geração de energia ao longo do tempo. Fonte Autor 2024.

A partir da implantação dessa UFV é possível evitar a emissão de aproximadamente 1,50 tCO₂e/ano na atmosfera.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme resultados obtidos a partir do estudo de caso, valores distintos de potência dos módulos fotovoltaicos, autonomia do sistema ao longo do tempo e redução de emissões de gases intensificadores do efeito estufa foram calculados. Além disso, no pré-dimensionamento realizado pelo PVSyst foi estimada a área necessária para a implantação do sistema projetado. De modo a fazer uma análise comparativa com relação a área requerida para a implantação da UFV, foi adotada para os três dimensionamentos realizados de forma algébrica uma premissa de mercado que para cada 1 MWp de potência instalada é preciso uma área de 10.000 m². Sendo assim, a Tabela 8 apresenta todos os resultados obtidos a partir do estudo de caso da UFV projetada para a fazenda em estudo.

Dimensionamento	Potência (kWp)	Autonomia (anos)	Área (m ²)	tCO ₂ e/ano evitados
1° Dimensionamento	32,0	38	320	1,80
2° Dimensionamento	24,0	2	240	1,34
Pré-dimensionamento PVSyst	21,6	1	144	1,21
3° Dimensionamento	26,8	16	268	1,50

Tabela 8 – Resultados obtidos a partir do estudo de caso proposto. Fonte Autor 2024.

Conforme dados apresentados, todos os resultados estão de acordo com a potência delimitada como microgeração distribuída como determinado pela ANEEL e requerem uma área necessária inferior à disponibilizada na fazenda.

6. CONCLUSÃO

O artigo se propôs a dimensionar a potência de painéis solares fotovoltaicos necessária ao atendimento da demanda de energia elétrica anual de uma instalação real mediante uma formulação algébrica e posteriormente analisar os resultados obtidos com o encontrado no pré-dimensionamento realizado pelo software PVSyst.

Diante dos resultados obtidos, o valor mais discrepante de potência ocorreu para o dimensionamento a partir da média de consumo mensal dos 3 maiores valores encontrados para cada uma das quatro instalações da fazenda objeto do estudo de caso. Este resultado gerou uma autonomia de 38 anos para o sistema, ou seja, durante todo esse período a UFV conseguirá atender ao consumo de referência anual delimitado no início do artigo sem que seja necessário comprar energia elétrica advinda da distribuidora de energia elétrica local e, ainda, com a possibilidades de abater créditos de energia sob a lógica da geração distribuída em outras unidades sob a mesma titularidade do proprietário que esteja localizada na área de concessão da mesma distribuidora de energia.

Quanto ao dimensionamento que utilizou a média aritmética do consumo, o valor de potência encontrado e a autonomia do sistema foram próximas ao obtido pelo PVSyst, sendo a diferença fruto dos diferentes valores de irradiação adotados nos dois casos e a possível diferença de eficiência dos módulos fotovoltaicos. Por fim, a última potência calculada, de 26,8 kWp, apresentou uma autonomia de 16 anos, valor este que casa bem com o provável período de fim da vida útil do(s) inversor(es) do sistema. Sendo assim, este último valor calculado pode ser uma boa referência no aspecto de planejamento de reinvestimento necessário para a manutenção da qualidade e eficiência do sistema projetado.

Como proposição para trabalhos futuros:

- Realizar o dimensionamento completo dos componentes do sistema solar fotovoltaico e comparar os resultados com um dimensionamento mais detalhado realizado pelo PVSyst;
- Desenvolver uma análise financeira durante o período de tempo para os diferentes dimensionamentos realizados, incluindo a compra de energia elétrica da distribuidora nos anos que o sistema não atende à demanda energética anual;
- Analisar os impactos de diferentes FDI (Fator de Dimensionamento do Inversor) na geração de energia do sistema ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

[1] EPE, Revisões Quadrimestrais da Carga. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/revisoes-quadrimestrais-da-carga>, acesso em 08/05/2024.

[2] ANEEL, Geração. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>, acesso em 08/05/2024, acesso em 08/05/2024.

[3] Braga, R. P. (2008). Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações.

[4] ANEEL. <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>, acesso em 19/05/2024.

[5] dos Santos, L. N. C., & de Lima, G. F. M. (2022). Dimensionamento prático de um sistema fotovoltaico—estudo de caso utilizando o software PVsyst Sizing and simulation of a

photovoltaic system using the software PVsyst. Brazilian Journal of Development, 8(3), 20035-20047.

[6] Carneiro, J. A. (2009). Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

[7] Marinoski, D. L., Salamoni, I. T., & Rüther, R. (2004, July). Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. In Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável (Vol. 1).

[8] Freitas, S. S. A. (2008). Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (Master's thesis, Instituto Politecnico de Braganca (Portugal)).

[9] CRESESB. <https://cresesb.cepel.br/>, acesso em 26/05/2024.

[10] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>, acesso em 26/05/2024.