



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

BRUNA GABRIELA SALES DE FREITAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

CARAÚBAS

2023

BRUNA GABRIELA SALES DE FREITAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo

CARAÚBAS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F866a Freitas, Bruna Gabriela Sales de.
Análise Comparativa de Metodologias de
Dimensionamento para Sistemas Fotovoltaicos /
Bruna Gabriela Sales de Freitas. - 2023.
76 f. : il.

Orientador: Daniel Carlos de Carvalho Crisótomo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. Software. 2. Sistemas fotovoltaicos
conectados à rede. 3. Energia fotovoltaica. I.
Crisótomo, Daniel Carlos de Carvalho, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

BRUNA GABRIELA SALES DE FREITAS

**ANALISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS DE
DIMENSIONAMENTO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: 06 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente

Glauco Fonsêca Henriques, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Allyson Arilson Lima Figueira, Me. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A graduação nunca foi um sonho, até que passou a ser e desde o começo sempre soube o que queria, sem nunca duvidar uma única vez de qual curso realmente queria. Até aqui o caminho não foi fácil, e acredito que o restante da caminhada também não será, mas desistir não é uma opção e nunca vai ser. Esse sonho não é somente meu, e tenho muito o que agradecer as pessoas que estão até aqui comigo, sendo alicerces.

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me capacitado e dado forças pra chegar até. Agradeço, em especial a minha mãe por tudo que tem é feito por mim ao longo de todo esse tempo, seus sonhos também são meus minha amada mãe. Meu pai Julinaldo Gomes, e minha irmã Maria Julyelmma por se fazerem presentes em mais essa conquista e por não soltarem minha mão.

Agradeço aos meus tios Jeilma Sales e Ângelo Tenorio, e minhas primas Ana Beatriz e Ana Cecília por me fazerem sentir se em casa, e partilharem comigo dessa jornada até aqui.

Agradeço ao meu namorado, Pedro Everton, por todo amor, compreensão, paciência e dedicação que sempre teve para comigo, segurando a minha mão e me dando o acalento quando achei que não daria certo.

Agradeço a amiga Emanuela Ieda, minha companheira de universidade, como sempre digo “meu outro eu”, obrigada por estar sempre comigo, não só nos momentos bons, como também nos momentos ruins, você foi peça fundamental para essa conquista.

Agradeço aos meu amigo, Nadson Daniel e Luís Gustavo, por toda ajuda, por toda amizade e cumplicidade até aqui. Por sempre mesmo nas adversidades estarem comigo, como verdadeiros amigos.

Agradeço de forma aberta aos amigos que a universidade me presenteou, meus amigos Nathan Vieira, Wagner Dutra, Mariane Ferreira e Joílson Felix. Cada um de vocês contribuiu de maneira única, seja através de palavras, incentivos, ou pelo simples fato de estarem ao meu lado, compartilhando desse desafio comigo.

Ao longo da vida academica, não fiz amizades somente com alunos, ao longo do meu trajeto passaram inúmeros professores que conquistaram lugar cativo no meu coração, em especial Tony Nogueira e sua esposa Mariana Maia, participamos de um projeto incrível juntos, que me tornou um ser humano melhor, também a professora Julia Pliscia e Edna Lucia, obrigada pelas risadas, histórias, ensinamentos, amizade e cuidado.

Por fim, porém não menos importante agradeço ao meu querido orientador Me. Daniel Carlos, chega a faltar palavras para descrever sua importância. Nos últimos dias, aprendi uma

palavra nova “sincronicidade” O conceito de sincronicidade foi introduzido pelo psicólogo suíço Carl Jung. Ele acreditava que certos eventos não apenas ocorrem por acaso, mas estão conectados por um significado subjetivo que vai além da simples casualidade. Essa palavra, faz todo sentido para eu falar sobre você, tinha que ser você. Obrigada por toda paciência e dedução, sem você nada disso seria possível.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9

RESUMO

A busca por alternativas energéticas sustentáveis é uma necessidade premente nos dias de hoje. A energia fotovoltaica se destaca como uma solução viável, aproveitando a abundante energia solar que incide de forma limpa em nosso planeta. Além de fornecer luz e calor essenciais à vida na Terra, essa energia solar pode ser capturada para a geração de eletricidade. Este trabalho aborda os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) e explora diversas abordagens de dimensionamento. Além disso, **investiga** o impacto das regulamentações da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) sobre o dimensionamento e a rentabilidade de projetos residenciais dessa natureza no contexto brasileiro de geração distribuída. Neste estudo, concentramos nossa atenção nos municípios de Caraúbas-RN e Mossoró-RN, localidades significativas para o autor desta pesquisa. Comparamos diferentes softwares de projeção de usinas fotovoltaicas nessa região. Esses *softwares*, a saber, *PVSyst* e *RETScreen*, apresentaram resultados semelhantes, fornecendo informações específicas e valores confiáveis para projeções futuras, como demonstrado ao longo deste trabalho. O *PVSyst*, com seu amplo escopo de dimensionamento e desempenho de sistemas, é uma ferramenta poderosa. O *RETScreen*, por sua vez, analisa minuciosamente os aspectos financeiros, incluindo o período de retorno do investimento e os riscos associados.

Palavras-chave: *Software*, Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, e Energia fotovoltaica.

ABSTRACT

The search for sustainable energy alternatives is a pressing need today. Photovoltaic energy stands out as a viable solution, taking advantage of the abundant solar energy that falls cleanly on our planet. In addition to providing light and heat essential to life on Earth, this solar energy can be captured to generate electricity. This work addresses Grid-Connected Photovoltaic Systems (SFCR) and explores different sizing approaches. Furthermore, it investigates the impact of ANEEL (National Electric Energy Agency) regulations on the sizing and profitability of residential projects of this nature in the Brazilian context of distributed generation. In this study, we focused our attention on the municipalities of Caraúbas-RN and Mossoró-RN, significant locations for the author of this research. We compared different projection software for photovoltaic plants in this region. These software, namely PVSyst and RETScreen, presented similar results, providing specific information and reliable values for future projections, as demonstrated throughout this work. PVSyst, with its broad scope for system sizing and performance, is a powerful tool. RETScreen, in turn, thoroughly analyzes the financial aspects, including the return on investment period and associated risks.

Keywords: Plant. Fish. Wind Energy. Financial management. Macroeconomics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração elétrica no mundo (Mtoe)	18
Figura 2: Capacidade de geração instalada	19
Figura 3: Trajetória do crescimento de usinas solares instaladas.	20
Figura 4: Reservas energéticas globais em comparação ao Recurso Solar	21
Figura 5: Distribuição do Recurso Solar em Âmbito Global	22
Figura 6: Variações na posição Terra - sol ao longo do ano.....	23
Figura 7: Efeito cosseno	24
Figura 8: Análise da variação do total diário de irradiação terrestre em relação à latitude no Hemisfério Norte	25
Figura 9: : Variabilidade Espectral da Irradiação Solar.....	26
Figura 10 : Representação das Componentes da Radiação Solar.....	27
Figura 11: Piranômetro.....	28
Figura 12: Recurso Solar Brasileiro GHI	28
Figura 13: Bandas de Valencia, Condução e Gap	29
Figura 14: Efeito Fotovoltaico e estrutura básica de célula fotovoltaica.....	31
Figura 15: Matriz de Capacidade Instalada	32
Figura 16: Representação de um sistema fotovoltaico conectado à rede	36
Figura 17: Efeito sombreamento.....	37
Figura 18: Preferência por fabricantes de painéis solares.....	40
Figura 19: Preferência por fabricantes de inversores.....	41
Figura 20: fluxograma metodológico.....	46
Figura 21: Ponto de localização.....	49
Figura 22: Ponto de localização 5° 11' 17" S - 37° 20' 39" O	50
Figura 23: Ponto de localização 5° 47' 45" S - 37° 33' 11" O	50
Figura 24: Geração estimada X real.....	54
Figura 25: Geração estimada X real.....	56
Figura 26: Tela inicial software PVSyst	58
Figura 27: Tela dimensionamento acoplado a rede.....	58
Figura 28: Tela de opções climáticas e localização	59
Figura 29: Tela de sombras e características técnicas	60
Figura 30: Resultado do dimensionamento – Residencial	61
Figura 31: Geração estimada X real.....	62

Figura 32: Resultado do dimensionamento - UFERSA	64
Figura 33: Geração estimada X real	65
Figura 34: Tela inicial RETScreen.....	66
Figura 35: captura de tela – localização e características técnicas - Mossoró	66
Figura 36: Capturas da telas - Resultado do dimensionamento - Mossoró	67
Figura 37: Geração estimada X Real – Mossoró	68
Figura 38: captura de tela – localização e características técnicas - Caraúbas	69
Figura 39: Capturas das telas - Resultado do dimensionamento - Caraúbas.....	69
Figura 40: Geração estimada X Real - Usina UFERSA.....	70
Figura 41: Comparativo entre metodologias - usina Mossoró	71
Figura 42: Comparativo entre metodologias – Usina Caraúbas.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais componentes de um sistema solar fotovoltaico	34
Tabela 2: Características do módulo escolhido	41
Tabela 3: Características do inversor escolhido.....	42
Tabela 4: irradiações solares no plano horizontal	51
Tabela 5: Dados do histórico de consumo.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEA	<i>Internacional energy agency</i> (agência internacional de energia)
TEH	<i>Terrawtt</i> - hora
CPTE	Centro de precisão de tempo e estudos climáticos
CEPEZ	Centro de pesquisa em energia elétrica
EPE	Empresa de planejamento energético
GHI	Irradiação global horizontal
INPE	Instituto nacional de pesquisa espaciais
SWERA	<i>Solar and wind energy resource assessment</i> (avaliação de reservas de energia solar e eólica)
ANEEL	Agência de energia elétrica
ABSOLAR	Associação brasileira de energia solar fotovoltaica
SFVCR	Sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica
SFVI	Sistema fotovoltaico isolado
CC	Corrente continua
CA	Corrente alternada
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
BESS	<i>Battery energy storage system</i>
FV	Fotovoltaico
NREZ	<i>National energy labotory</i>
MIT	<i>Massa chusetts intitute of technology</i>
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
SFV	Sistema fotovoltaico
HDIF	Irradiação direta normal
HDIF	Irradiação difusa horizontal
HSP	Horas de sol pleno
CEPEL	Centro de pesquisa de energia elétrica
UFERSA	Universidade federal rural do semi árido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Dados de Energia no Brasil e no Cenário Global.....	18
2.2. Energia solar: uma reserva inesgotável	20
2.2.1. Desvendando os segredos da radiação solar.....	22
2.2.2. Efeito Fotovoltaico	29
2.3. Atualidades da Energia Fotovoltaica no Brasil: Uma Perspectiva Atualizada....	31
2.4. Geração distribuída	33
2.5. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	36
2.6. Estimativa do recurso solar.....	37
2.6.1. Efeito Sombreamento	37
3. METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO	39
3.1. Elementos do Sistema de Geração de Energia	39
3.2. Método 1: Insolação média.....	42
3.3. Método 2: Aplicação De Ferramentas Computacionais	43
3.3.1. RETScreen expert.....	44
3.3.2. PVsyst.....	45
4. METODOLOGIA.....	46
4.1. Energia Solar: Metodologia e Melhores Práticas.....	46
4.1.1. Levantamento do consumo de eletricidade	46
4.1.2. Levantamento do local de instalação.....	46
4.1.3. Levantamento do recurso solar disponível	47
4.1.4. Dimensionamento do Sistema	47
4.2. Identificação do Local de Estudo.....	48

4.2.1. Irradiação na região local e entorno	49
5. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS	52
5.1. Método 1 – Insolação média	52
5.1.1. Usina Residencial – Mossoró	52
5.1.2. Usina UFERSA – Caraúbas	55
5.2. Método 2 – Aplicação de ferramentas computacionais	57
5.2.1. Simulação PVSyst – Usina residencial.....	57
5.2.2. Simulação PVSyst – Usina UFERSA	63
5.2.3. Simulação RETScreen expert – Usina residencial	65
5.2.4. Simulação RETScreen expert – Usina UFERSA	68
5.3 Comparativos entre metodologias	71
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	75

1. INTRODUÇÃO

Na última década, assistiu-se a um notável avanço na conscientização pública sobre as mudanças climáticas (Wires *et al*, 2015). Esse avanço pode ser atribuído à inclusão da educação ambiental no currículo da geração dos *millennials*, paralelamente ao aumento de eventos climáticos extremos e aos alarmantes níveis de poluição ambiental. Além disso, ao longo dos últimos dez anos, presenciou-se eventos de grande importância relacionados a essa questão. No âmbito internacional e político, o marco mais significativo foi a assinatura do Acordo de Paris em 2015, no qual 194 países estabeleceram o objetivo comum de limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2015).

No que diz respeito à redução de emissões, a geração de energia elétrica desempenha um papel crucial. Há uma necessidade urgente de acelerar o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia limpa para enfrentar os desafios globais (IEA, 2014). Em nível nacional, nossa matriz energética renovável se viu obrigada a recorrer a termelétricas poluentes para superar a crise hídrica de 2014/2015, resultando no aumento das emissões e das tarifas de energia elétrica (Cerqueira *et al*, 2015).

Paralelamente a todos esses acontecimentos, o governo brasileiro tem buscado alinhar-se com os objetivos globais em relação ao clima. Em 2012, o Estado Brasileiro tomou sua primeira iniciativa formal para regulamentar a geração distribuída no país. Através da Resolução Normativa da ANEEL nº 482, foram estabelecidas as primeiras regras, marcando o início formal do setor fotovoltaico nacional. Mais recentemente, a Resolução da ANEEL nº 687, que revisa a anterior, junto com o Programa de Geração Distribuída, introduziram uma nova série de incentivos, reafirmando o compromisso do governo em estimular a geração de energia por fontes renováveis nos próximos anos (MME, 2015). Em meio a esse cenário complexo de crise hídrica e climática, a geração de energia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, graças à contínua redução dos preços de seus componentes (NAKABAYASHI, 2015), apresentando um considerável potencial de crescimento nos próximos anos.

Existem estudos que dimensionam e analisam sistemas fotovoltaicos, mas poucos comparam os diferentes softwares de projeção de usinas fotovoltaicas, ainda mais direcionado à região semiárida. O Rio Grande do Norte (RN) destaca-se como um estado brasileiro pioneiro e promissor no que diz respeito ao uso da energia fotovoltaica. Com seu clima privilegiado, abundância de sol ao longo do ano e vastas áreas disponíveis para instalação de painéis solares,

o RN tem se tornado uma referência na geração de energia limpa e renovável. Através de parques solares e usinas de energia fotovoltaica, o estado tem aproveitado seu potencial solar para produzir eletricidade de forma sustentável, reduzindo a dependência de fontes não renováveis e contribuindo para a preservação do meio ambiente. Além disso, o investimento em energia fotovoltaica impulsiona a economia local, gerando empregos e atraindo novos empreendimentos para a região. Com a contínua expansão desse setor, o RN se consolida como um exemplo inspirador para outras localidades interessadas em adotar a energia solar como uma solução viável e ecologicamente responsável.

1.1. Objetivo Geral

Identificar e aplicar diversas metodologias para dimensionar sistemas fotovoltaicos de pequena e média potência, concentrando-se em duas cidades do interior do Rio Grande do Norte, de modo a confrontar um sistema de geração real.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar os principais elementos que compõem um sistema fotovoltaico conectado à rede;
- Analisar a comparação das metodologias aplicadas ao dimensionar um sistema fotovoltaico;
- Explorar equacionamentos matemáticos;
- Comparar resultados obtidos pelos métodos, apresentando o modelo mais confiável com dados de geração do inversor do sistema já instalado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

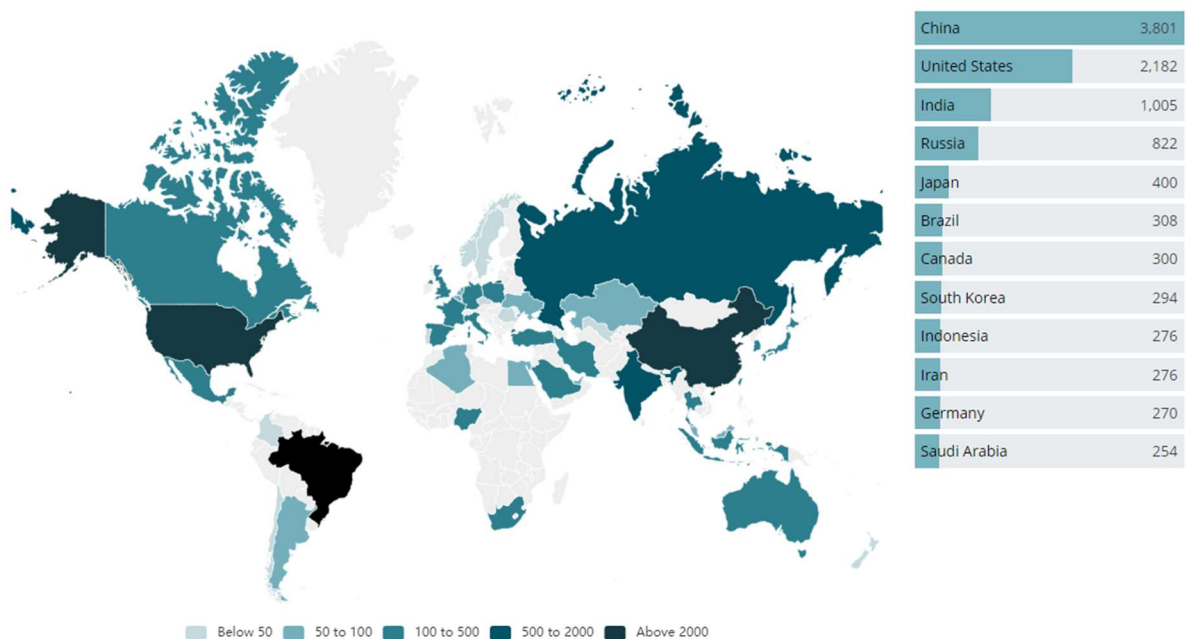
2.1. Dados de Energia no Brasil e no Cenário Global

De acordo com os dados extraídos do Anuário Estatístico Global de Energia de 2022, fica evidente que houve uma queda na constante alta de crescimento, comparando com anos interiores, contudo permaneceu superior à sua taxa média de crescimento que é de 1,4% ao ano, na produção de energia elétrica em escala global no ano de 2022.

No último ano, observou-se uma desaceleração no crescimento do consumo de energia nos dois maiores países consumidores do mundo. Na China, que detém o título de maior consumidor global de energia com uma fatia de 25% em 2022, o aumento ficou em 3%, comparado a um índice de 5,2% em 2021. Já nos Estados Unidos, outro gigante no cenário energético, o crescimento foi de 1,8%, em contraste com os 4,9% registrados no ano anterior.

Por outro lado, economias robustas impulsionaram significativamente o consumo de energia em países como a Índia (+7,3%), a Indonésia (+21%), e a Arábia Saudita (+8,4%). Além disso, houve um crescimento mais moderado no Canadá (+3,8%) e na América Latina (+2,7%), englobando um aumento de +2,4% no Brasil e México e +4,5% na Argentina. Conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Geração elétrica no mundo (Mtoe)



Fonte: Enerdata (2023)

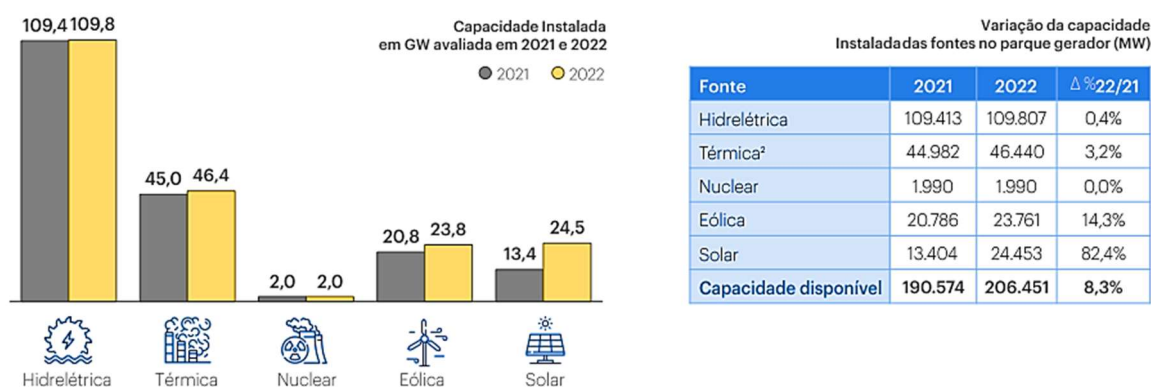
A matriz energética global é predominantemente composta por combustíveis fósseis, incluindo carvão, petróleo e gás natural, que desempenham um papel crucial na geração de cerca de 80% da energia mundial. No entanto, é importante observar que essas fontes de energia também são responsáveis pela emissão de gases poluentes, incluindo o dióxido de carbono, decorrente de seus processos de combustão (BEN, 2016).

A energia elétrica oferece uma ampla gama de benefícios, como o aumento do conforto e da conveniência na vida das pessoas. Apesar das fontes renováveis representarem uma pequena parcela da produção global de energia elétrica, o potencial para a adoção desse modelo é imenso (VILLALVA, 2015).

No Brasil, em particular, o país possui um vasto potencial de geração de energia solar devido à sua extensa área territorial e localização privilegiada na superfície da Terra. Além disso, o Brasil também apresenta um excelente potencial para a produção de energia elétrica por meio de usinas hidrelétricas, que se tornaram a solução mais amplamente utilizada para atender à demanda nacional (BEN 2013).

A capacidade instalada de geração de energia no Brasil em 2022 apresentou um crescimento de 8,3% em relação a 2021, com destaque para a energia eólica e solar. Na Figura 2, será ilustrado isso que foi relatado.

Figura 2: Capacidade de geração instalada



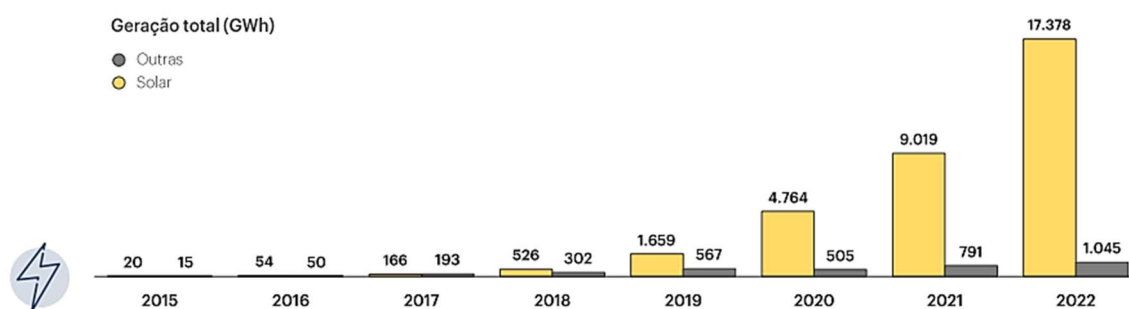
Fonte: Balanço Energético Nacional (2022)

A capacidade instalada de geração elétrica foi segmentada de acordo com as principais fontes de energia. A figura fornecida pela ANEEL, com dados do Balanço Energético Nacional de 2023, destaca claramente a predominância da fonte hídrica na potência total instalada no Brasil. No entanto, merecem destaque os notáveis aumentos nas capacidades instaladas no ano

passado, especialmente no segmento das usinas solares de micro e minigeração em 2022, que registraram um impressionante aumento de quase 88% em comparação a 2021.

Essa tendência de crescimento progressivo na geração solar fotovoltaica tem sido construída ao longo do tempo, e fica ainda mais evidente quando se analisa a Figura 3, a qual ilustra a trajetória desse crescimento contínuo.

Figura 3: Trajetória do crescimento de usinas solares instaladas.



Fonte: Balanço Energético Nacional (2022)

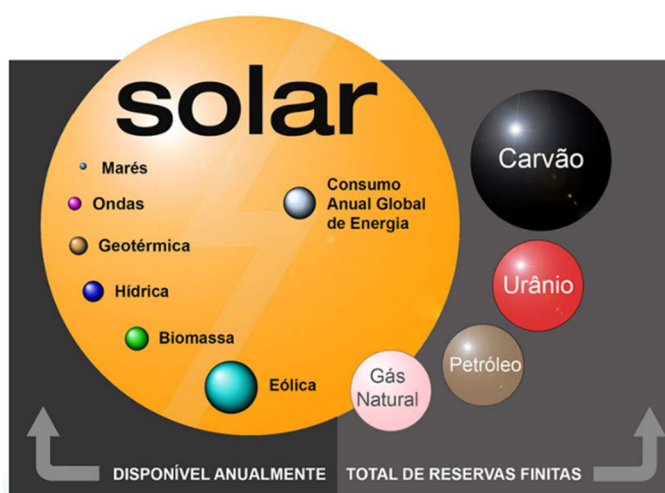
2.2. Energia solar: uma reserva inesgotável

A energia solar proveniente do sol é admitida como um recurso energético de extrema relevância e importância em diversos aspectos (SOUZA, 2018). A abundância inesgotável dessa forma de energia ao longo da escala de tempo de vida humana torna-a uma das opções mais favoráveis para compor uma parcela significativa das demandas energéticas atuais e futuras, a sustentabilidade e a ausência de impactos ambientais negativos são os princípios orientadores. A amplitude da energia solar se torna evidente ao considerar que praticamente todas as demais fontes de energia disponíveis, de forma intrínseca, são originadas ou renovadas pelo próprio sol, conforme apontado pelo *Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative*.

A todo instante, o sol realiza uma transformação evidente, convertendo mais de quatro milhões de toneladas de sua própria massa, sobretudo constituída de hélio e hidrogênio, em energia por meio de reações termonucleares ocorridas em seu núcleo. Dessa forma, neutrinos e radiação solar são emitidas em todas as direções do espaço. Após uma jornada de aproximadamente 150 milhões de quilômetros, que permanece por pouco mais de oito minutos, uma pequena fração desta radiação é direcionada a terra (IEA, 2014).

Afim de que seja traduzido em números a imensidão energética do sol, cerca de 885 milhões de *terawatt-hora* (TWh) alcançam a superfície terrestre anualmente. Essa cifra é equivalente a aproximadamente 6.200 vezes o consumo energético global registrado em 2008. Enquanto as reservas comprovadas de combustíveis fósseis são estimadas para durar cerca 150 anos (carvão), 58 anos (gás) e 46 anos (petróleo), considerando a taxa atual de consumo (IEA, 2010), a quantidade energia solar que se recebe em um único ano seria capaz de suprir o consumo energético total por aproximadamente 6 milênios, caso por conjectura fosse possível ser coletada e armazenada. Logo, torna-se evidente o enorme potencial inerente ao desenvolvimento de tecnologias de geração elétrica fundamentadas na energia solar. A Figura 4, ilustra muito bem essas informações.

Figura 4:Reservas energéticas globais em comparação ao Recurso Solar



Fonte: ECOMONTES – Energia Solar, 2016

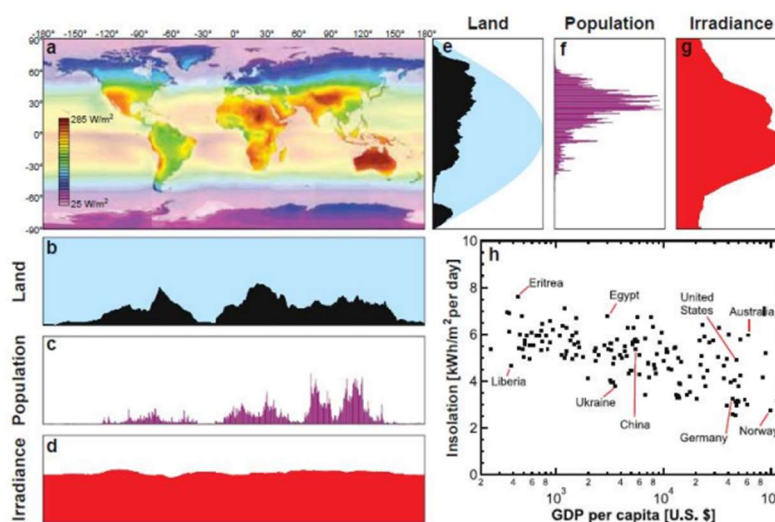
Além dos números impressionantes trazidos previamente, outro fator estratégico que impulsionou o uso da energia solar é sua distribuição geográfica. A figura 5 mostra um gráfico da média de intensidade solar ao redor do mundo, correlacionando histogramas de área terrestre e densidade populacional em relação a latitude e longitude.

Observa-se uma significativa sobreposição entre a abundância de recursos solares e as áreas densamente habitadas. Onde há concentração populacional, existe uma disponibilidade significativa de luz solar e um potencial para a exploração dessa fonte de energia. Vale ressaltar que o coeficiente de variação do recurso solar entre as áreas densamente povoadas é bastante reduzido, aproximadamente igual a três. Diferentemente de outros recursos minerais,

combustíveis fósseis ou localidades propícias para a exploração eólica e hidrelétrica, as distribuições do recurso solar são notavelmente mais consumidas (MIT, 2015)

Em virtude de características como – o vasto potencial energético e a ampla distribuição geográfica – a energia solar está bem posicionada para se tornar uma fonte de energia de extrema importância, talvez até mesmo a principal fonte geradora em âmbito global no decorrer deste século (MIT, 2015). Embora o foco principal deste trabalho seja a energia solar fotovoltaica e suas metodologias de dimensionamento, é importante salientar que existem outras formas de aproveitamento da energia solar, como o aquecimento solar e geração heliotérmica.

Figura 5: Distribuição do Recurso Solar em Âmbito Global



Fonte: MITEI, *The Future of Solar Energy* 2015

2.2.1. Desvendando os segredos da radiação solar

O conceito “radiação solar” é amplamente utilizado para descrever a energia proveniente do sol, sendo frequentemente empregado como sinônimo de “irradiação solar”. A irradiação solar refere-se à quantidade de energia solar que atinge a superfície terrestre em determinado período de tempo por unidade de área, expressada em J^2 . Outra forma de referir-se a essa energia é por meio do termo “irradiância solar”, que representa o fluxo de potência e é expressada em termos de energia por unidade de área, usualmente em W/m^2 (CPTEC, 2017).

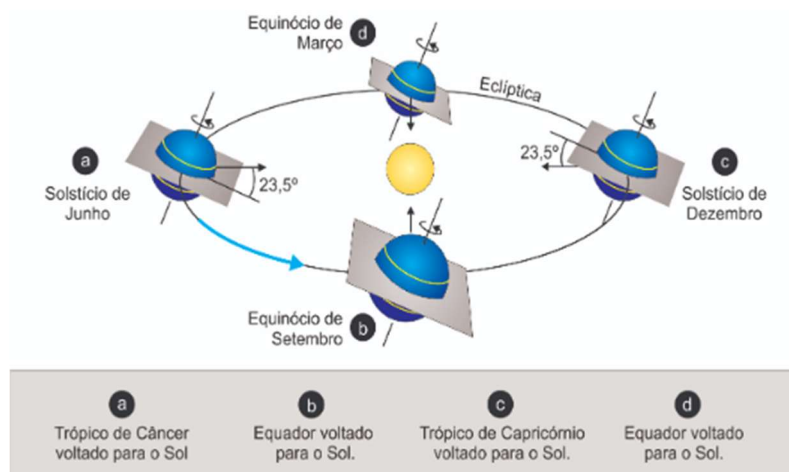
A quantidade energia solar incidente por unidade de área diretamente exposta a luz solar, no topo da atmosfera terrestre, é conhecida como irradiância solar extraterrestre. Essa

quantidade, também chamada de constante solar, possui o valor de 1.386 W/m^2 durante o equinócio (CEPEL, 2014)

O movimento de translação da terra ao redor do sol define o plano da órbita terrestre, conhecida como plano da eclíptica. Por sua vez, o movimento de rotação ocorre em torno de um eixo com uma inclinação fixa de $25,5^\circ$ em relação a perpendicular do plano de eclíptica. Essa inclinação, juntamente com o movimento de translação, é responsável pelas variações sazonais ao longo do ano (EPE, 2016)

Essas variações são perceptíveis no movimento aparente do sol. Durante o meio dia solar ao longo do ano, possível observar que o ângulo entre os raios solares e o plano do equador celeste varia entre $+23,5^\circ$ (21 de junho – solstício de inverno no hemisfério sul). A excentricidade da trajetória também resulta em flutuações sazonais na irradiância solar extraterrestre mencionada anteriormente. Esse ângulo é denominado declinação solar (δ). Nos dias 21 de setembro e 21 de março, ocorrem os equinócios de primavera e outono no hemisfério sul, respectivamente, nos quais a declinação solar é nula, indicando que os raios solares estão incidindo paralelamente ao plano do equador. A Figura 6 traz uma representação visual disso que foi falado.

Figura 6: Variações na posição Terra - sol ao longo do ano



Fonte: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS (2012)

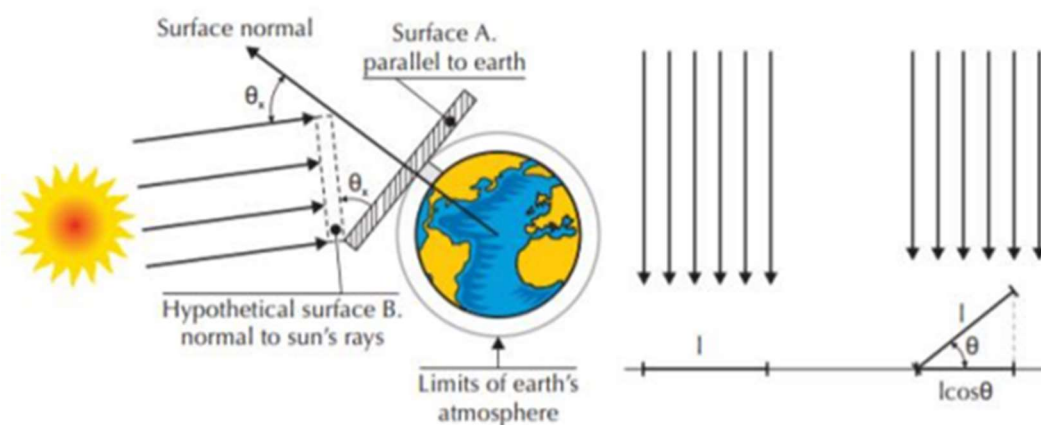
Os equinócios são momentos em que a duração do dia é igual em todos os lugares da Terra, enquanto os solstícios representam os períodos em que há a maior diferença entre a duração do dia e da noite. Durante o solstício de verão, o dia é mais longo, enquanto durante o solstício de inverno, a noite é mais longa. No entanto, nas regiões próximas ao Equador, essas

variações são praticamente inexistentes. À medida que se aumenta a latitude, essas variações se tornam mais pronunciadas.

Outro aspecto relevante para compreender a radiação solar é o efeito cosseno. Devido às proporções entre o Sol e a Terra, se pode afirmar que os raios solares atingem a Terra em feixes paralelos e com uma intensidade praticamente constante em uma superfície imaginária perpendicular aos raios, na borda da atmosfera terrestre. No entanto, devido à forma geodésica do nosso planeta, nem toda superfície na Terra é perpendicular aos raios solares, o que resulta em uma diminuição da incidência solar em um plano horizontal. As regiões que apresentam um ângulo de inclinação maior são aquelas próximas aos polos, ou seja, de maior latitude.

Isso pode ser compreendido com base na Figura 7, que ilustra um plano paralelo à superfície terrestre em uma região de latitude não nula (A) e uma superfície imaginária perfeitamente perpendicular à incidência dos raios solares (B). A quantidade de radiação solar incidente nas duas superfícies é a mesma. No entanto, a área da superfície A é maior do que a superfície B, resultando em uma menor intensidade por unidade de área (irradiância) na superfície A.

Figura 7: Efeito cosseno

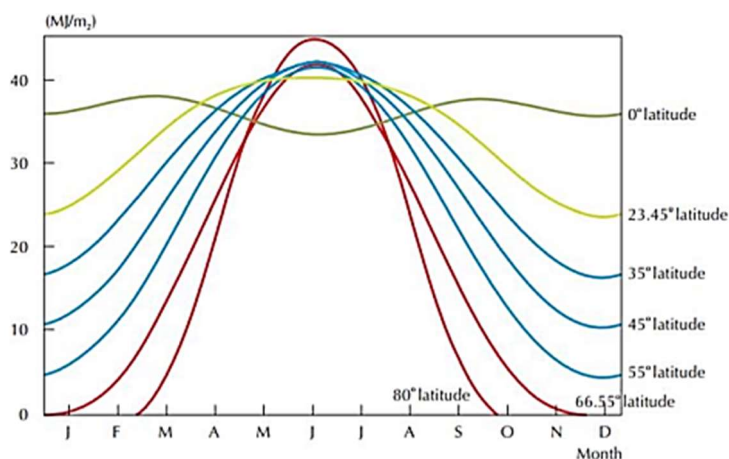


Fonte: IEA – Solar Energy Perspectives, 2011

A irradiância solar é influenciada pela posição da Terra e pelo ângulo de incidência dos raios solares. Portanto, regiões próximas à linha do equador apresentam uma variação menor na irradiação ao longo do ano, enquanto áreas localizadas em latitudes mais elevadas têm os maiores valores de irradiação durante os meses de verão, mas experimentam os menores valores durante o inverno, resultando em uma menor quantidade total de energia recebida anualmente nessas latitudes mais altas. Essa variação é ilustrada na Figura 8, na qual pode se observar tanto

os valores máximos de irradiação (ponto mais alto da curva) quanto a energia total recebida ao longo do ano (área sob a curva), considerando o hemisfério Norte.

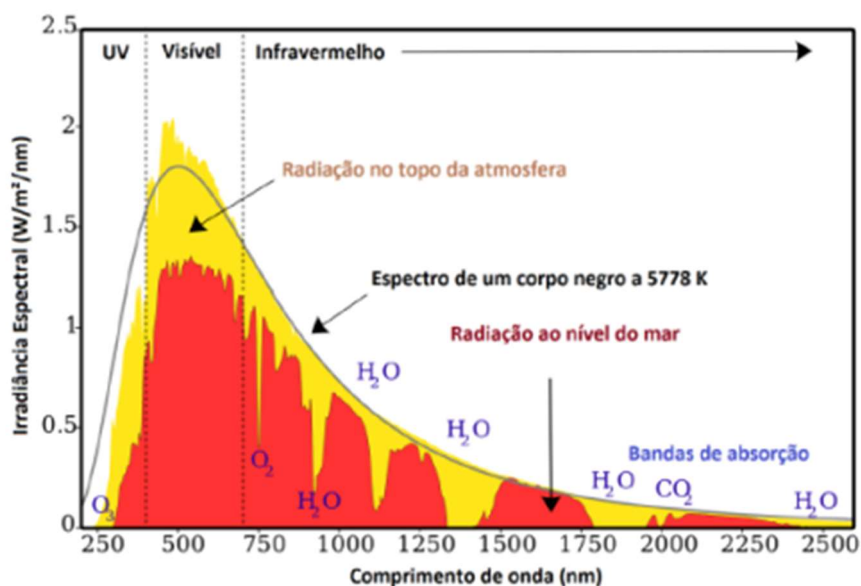
Figura 8: Análise da variação do total diário de irradiação terrestre em relação à latitude no Hemisfério Norte



Fonte: IEA - Solar Energy Perspectives, 2011

Além das flutuações sazonais resultantes dos movimentos orbitais da Terra em torno do Sol, a radiação solar incidente na superfície terrestre é influenciada pelas interações com a atmosfera. O espectro da radiação solar no topo da atmosfera terrestre, representado pela porção amarela na Figura 9, pode ser aproximado à radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura de 5.778 K. No entanto, durante sua trajetória através da atmosfera, ocorrem inúmeras interações com moléculas presentes no ar, especialmente vapor de água, dióxido de carbono e ozônio, resultando na absorção ou reflexão de parte da luz solar. Como resultado, a irradiância espectral que efetivamente atinge a superfície terrestre é reduzida, como indicado pela porção vermelha na Figura 9 (EPE, 2016).

Figura 9: :Variabilidade Espectral da Irradiação Solar



Fonte: *Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation*

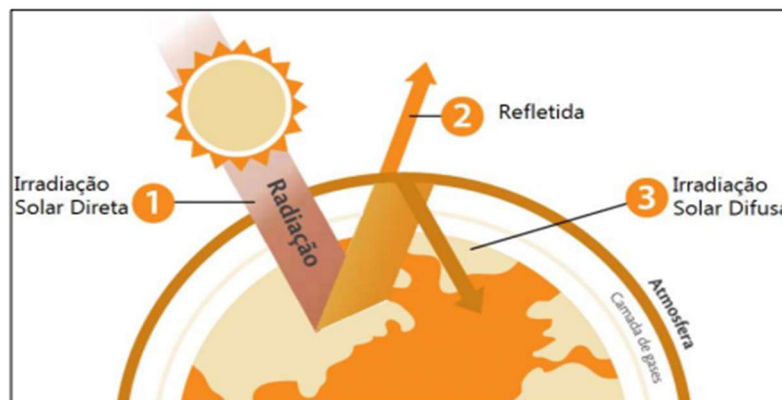
Conforme mencionado previamente nesta seção, a quantidade de energia solar incidente de forma perpendicular por unidade de área, também conhecida como constante solar, é estimada em 1.368 W/m^2 . No entanto, devido às interações dessa energia com as moléculas presentes na atmosfera terrestre, esse valor é reduzido para aproximadamente 1.000 W/m^2 , considerando uma atmosfera limpa e sem nuvens (IEA, 2011). Esse valor de referência é amplamente utilizado nos testes de módulos fotovoltaicos (conforme descrito na seção 2.6).

No contexto do aproveitamento fotovoltaico, é possível caracterizar a radiação solar que alcança a superfície terrestre em suas diversas componentes. Dentre essas, a Irradiação Global Horizontal (GHI) é de particular interesse, representando a quantidade total de radiação incidente sobre uma superfície plana horizontal ao solo, idealmente disposta de forma perpendicular aos raios solares incidentes. A GHI é composta por duas parcelas distintas: a Irradiação Direta Normal (HDIR) e a Irradiação Difusa Horizontal (HDIF).

A Irradiação Direta Normal (HDIR) corresponde à radiação solar proveniente diretamente do sol, chegando em feixes bem definidos, capazes de projetar sombras com contornos nítidos. Por outro lado, a Irradiação Difusa Horizontal (HDIF) representa a parcela dispersa e atenuada da radiação solar, resultante de reflexões em nuvens, partículas de poeira, vapor d'água e outros elementos presentes na atmosfera. Mesmo em condições de céu totalmente desobstruído, aproximadamente 20% da GHI é constituída pela HDIF (CEPEL, 2014).

Essas são as componentes consideradas em uma situação hipotética de uma superfície plana horizontal ao solo. Entretanto, ao se considerar uma superfície não horizontal em relação ao solo, surge uma terceira parcela significativa, relacionada às reflexões provenientes da própria superfície e dos elementos ao seu redor, representada pelo albedo na Figura 10.

Figura 10 : Representação das Componentes da Radiação Solar



Fonte: GRS Engenharia (2022)

É imprescindível mencionar, nesse contexto, o equipamento fundamentalmente utilizado para realizar medições de irradiação solar: o piranômetro. Existem dois tipos principais de piranômetro utilizados na prática: o piranômetro termelétrico e o piranômetro fotovoltaico.

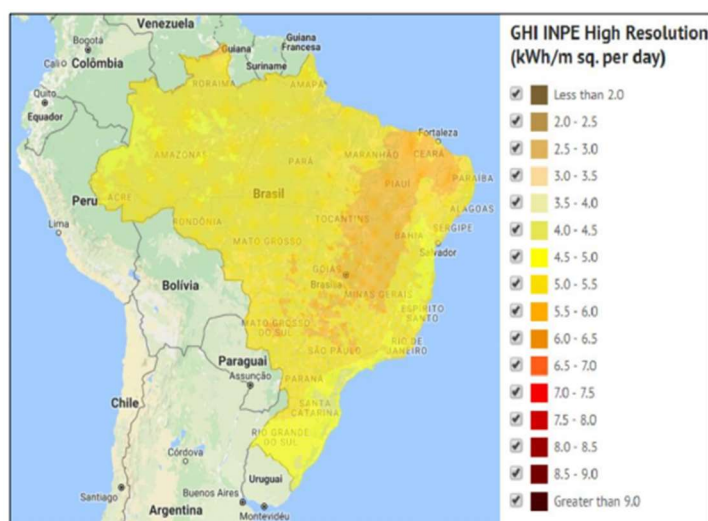
O piranômetro termelétrico se baseia na utilização de um termo pilha, que consiste em uma associação de termopares em série, como seu sensor para efetuar as medições. No campo de atuação, é necessário aguardar alguns instantes até que o processo de dilatação térmica seja concluído e, assim, o resultado das medições seja estabilizado. Apesar de ser uma tecnologia mais antiga se comparada ao modelo fotovoltaico, o piranômetro termelétrico ainda é amplamente empregado devido à sua precisão superior, sendo considerado o modelo mais confiável e utilizado para medições de irradiação solar.

Por outro lado, o piranômetro fotovoltaico é constituído por uma pequena célula fotovoltaica e apresenta vantagens, como o custo mais acessível e o tempo de resposta mais rápido. Contudo, é importante ressaltar que esse modelo não é capaz de medir a radiação solar refletida. A Figura 11 ilustra um dos modelos de piranômetro, sendo o termelétrico. O qual desempenha um papel essencial na obtenção de dados precisos relacionados à irradiação solar, auxiliando em diversos estudos e aplicações na área de energia solar.

Figura 11: Piranômetro

Fonte: UNIMETRO

Por fim, a Figura 12 apresenta a representação do recurso solar disponível no território nacional por meio da Irradiação Global Horizontal (GHI). Esses dados foram obtidos por meio de pesquisas realizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em alta resolução e foram incorporados à base de dados SWERA (*Solar and Wind Resource Assessment*), organizada pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*). Essa base de dados é uma referência importante para a avaliação do potencial solar e eólico em diferentes regiões. A Figura 12, portanto, oferece uma visualização do recurso solar disponível no país, auxiliando no planejamento e desenvolvimento de projetos relacionados à energia solar.

Figura 12: Recurso Solar Brasileiro GHI

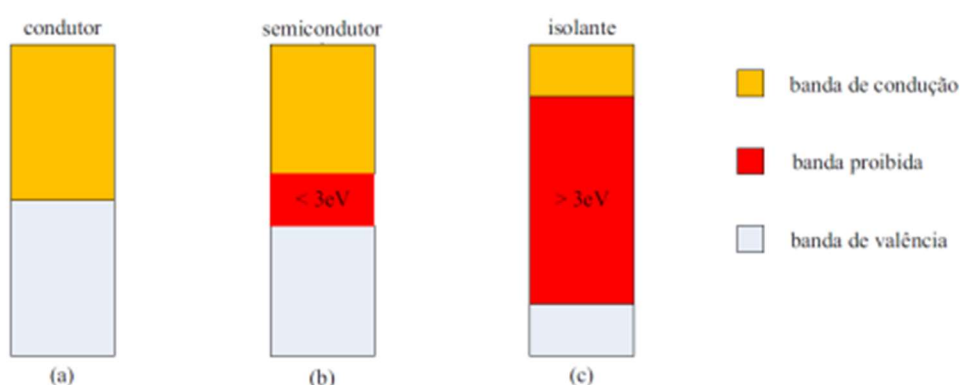
Fonte: INPE & SWERA, disponível em: <https://maps.nrel.gov/swera/>

2.2.2. Efeito Fotovoltaico

No século XIX, surgiram experimentos científicos que desafiaram o modelo ondulatório da luz. Entre esses experimentos, destacou-se um grupo fundamental relacionado ao que ficou conhecido como efeito fotovoltaico, inicialmente relatado em 1839 por Edmond Becquerel. Nesses experimentos, os cientistas observaram a ocorrência de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura feita de material semicondutor, resultante da absorção da luz.

Os materiais semicondutores possuem uma estrutura intermediária entre os materiais condutores e os isolantes. Eles apresentam bandas de energia onde elétrons (valência e condução) podem estar presentes, além de uma pequena banda vazia (gap) típica dos materiais isolantes. A Figura 13 ilustra as bandas de energia desses três tipos de materiais.

Figura 13: Bandas de Valencia, Condução e Gap



Fonte: CEPEL, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014

Na tabela periódica, os elementos semicondutores estão predominantemente localizados nos grupos 14 e 16. Além desses elementos, existem muitos compostos que também exibem propriedades semicondutoras. A zero grau Kelvin, os semicondutores apresentam a banda de valência totalmente preenchida, enquanto a banda de condução está vazia. No entanto, à temperatura ambiente, alguns elétrons são energizados o suficiente para atravessar a faixa proibida (gap) e ocupar a banda de condução. À medida que mais energia é fornecida ao material semicondutor (por exemplo, aumento de temperatura), observa-se um aumento na condutividade elétrica (CEPEL, 2006; EPE, 2016).

No entanto, a quantidade de elétrons disponíveis é limitada, sendo necessário o processo conhecido como dopagem para utilizar os semicondutores na geração de energia elétrica. Esse

processo de dopagem tem como objetivo facilitar o fluxo de elétrons, resultando na produção de eletricidade. Em uma das camadas, ocorre a liberação facilitada de elétrons, enquanto na outra camada ocorre a recepção desses elétrons.

Devido à sua ampla disponibilidade, o semicondutor mais amplamente utilizado é o silício. Os átomos de silício são tetravalentes, o que significa que eles precisam formar quatro ligações covalentes com átomos vizinhos para criar sua estrutura cristalina característica. Para facilitar a liberação de elétrons, introduz-se uma imperfeição na estrutura cristalina do silício através da incorporação de um átomo penta valente como impureza substitucional. Nesse caso, um elétron em excesso estará fracamente ligado ao seu átomo de origem e requer apenas uma pequena quantidade de energia para ser movido para a banda de condução. Dessa forma, o fósforo é considerado um "dopante" doador de elétrons e é denominado dopante tipo N (EPE, 2016; CEPEL, 2006).

De forma semelhante, porém com o objetivo de facilitar a recepção dos elétrons, outra imperfeição do tipo impureza substitucional é introduzida em uma camada adjacente. Nesse caso, busca-se um átomo trivalente para substituir um átomo de silício em uma vacância (ou lacuna), de modo que um elétron possa ocupar essa posição. O boro é comumente utilizado para desempenhar essa função. O requisito energético para que um elétron de um sítio vizinho ocupe essa posição é baixo, resultando no deslocamento da lacuna. Portanto, o boro é denominado um "aceitador de elétrons" ou um dopante tipo P (EPE, 2016; CEPEL, 2006).

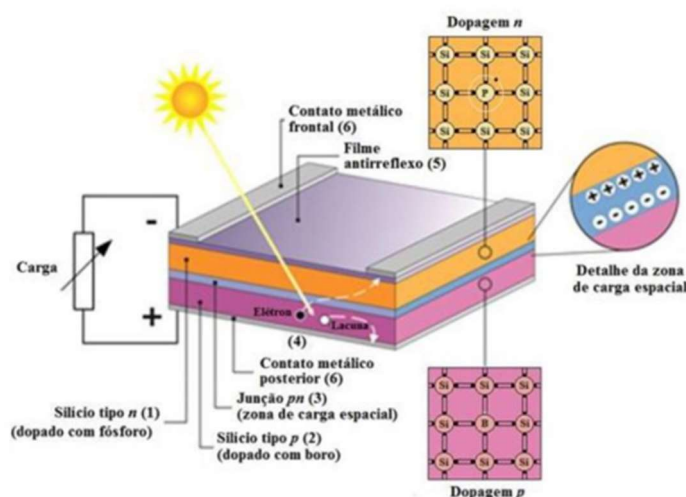
Quando átomos de boro são introduzidos em uma metade do silício com alto grau de pureza e átomos de fósforo são introduzidos na outra metade, forma-se o que é chamado de junção PN. Nessa junção, elétrons livres da região tipo N se movem em direção à região tipo P, onde existem lacunas disponíveis para serem preenchidas. Isso resulta em um acúmulo de elétrons próximos à interface, no lado P, tornando essa região carregada negativamente, e uma diminuição de elétrons na região da interface do lado N, tornando essa região eletricamente positiva (EPE, 2016).

Essas cargas acumuladas geram um campo elétrico permanente que dificulta ainda mais o movimento de elétrons do lado N para o lado P. Esse processo atinge um equilíbrio quando o campo elétrico se torna forte o suficiente para impedir o deslocamento dos elétrons livres restantes no lado N (EPE, 2016).

Quando essa junção PN é exposta a fótons com energia maior que o "gap" do material, pares elétron-lacuna são criados. Se isso ocorrer na região onde o campo elétrico é não nulo, essas cargas serão aceleradas, resultando em uma corrente. Se as duas extremidades do fragmento de silício com a dopagem PN forem conectadas por um condutor, haverá um fluxo

de elétrons em corrente contínua. Esse é o princípio fundamental de funcionamento das células fotovoltaicas, conforme ilustrado na Figura 14 (EPE, 2016).

Figura 14: Efeito Fotovoltaico e estrutura básica de célula fotovoltaica



Fonte: MOEHLECKE e ZANESCO, 2005

2.3. Atualidades da Energia Fotovoltaica no Brasil: Uma Perspectiva Atualizada

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) emitiu a Resolução Normativa nº 482/2012, que estabeleceu as diretrizes para a implementação de sistemas de geração distribuída de energia. Uma das medidas chave foi a introdução do esquema de compensação, conhecido internacionalmente como *net metering*, no qual a energia ativa gerada por unidades distribuidoras é injetada na rede elétrica e posteriormente compensada com o consumo de energia. Essa abordagem tem incentivado o crescimento de sistemas fotovoltaicos em vários países da América Latina. O México, por exemplo, já ultrapassou a marca de 100 MW de capacidade instalada até 2016, e outros países, como Costa Rica, Panamá e República Dominicana, também estão explorando ativamente a energia solar.

Ao final de cada mês, caso a geração de energia exceda o consumo, o saldo remanescente, conhecido como crédito de energia, pode ser utilizado para compensar o consumo em meses subsequentes. Como resultado, o consumidor é responsável apenas pelo pagamento da tarifa básica. As características de alimentação elétrica variam de acordo com o tipo de instalação: monofásicas 30 kWh, com capacidade de até 50 kWh para bifásicas e até 100 kWh para trifásicas. Caso o consumo exceda a geração, o consumidor será responsável por pagar a diferença entre a energia total consumida e a energia gerada.

Em 2015, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) emitiu a Resolução Normativa nº 687/2015, que introduziu benefícios adicionais para os micros geradores. Entre esses benefícios, está a possibilidade de geração distribuída conjunta, onde a energia gerada pode ser compartilhada entre várias residências dentro da mesma área de concessão, de acordo com seus interesses. Além disso, o prazo de validade dos créditos de energia foi estendido de 36 para 60 meses, a potência máxima de geração por unidade aumentou de 1 MW para 5 MW, e o processo de adesão para conectar sistemas de geração distribuída à rede de distribuição foi simplificado. Essa resolução normativa parece ter contribuído significativamente para o aumento do número de instalações de sistemas fotovoltaicos nos últimos dois anos.

Atualmente, os estados de Minas Gerais e São Paulo lideram em número de conexões à rede elétrica. No entanto, os estados da região Norte e alguns estados do Nordeste não apresentam um número significativo de usuários com sistemas fotovoltaicos conectados. A Figura 15 mostrara a matriz de capacidade já instalada.

Figura 15: Matriz de Capacidade Instalada

Fonte	Mar/2022		Mar/2023			Evolução da Capacidade Instalada Mar/2023 - Mar/2022
	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	% Capacidade Instalada	
Hidráulica	1.462	109.496	1.453	109.865	52,1%	0,3%
UHE	218	103.003,4	215	103.195,4	48,9%	0,2%
PCH	430	5.577,0	428	5.719,3	2,7%	2,6%
CGH	737	844,8	719	864,0	0,4%	2,3%
CGU	1	0,1	0	0,0	0,0%	-100,0%
CGH GD	76	70,3	91	85,9	0,0%	22,2%
Térmica	3.506	47.138	3.520	48.280	22,9%	2,4%
Gás Natural	168	16.377,9	180	17.456,8	8,3%	6,6%
Biomassa	599	15.861,5	625	16.513,6	7,8%	4,1%
Petróleo	2.319	8.950,9	2.184	8.454,8	4,0%	-5,5%
Carvão	22	3.582,8	22	3.465,8	1,6%	-3,3%
Nuclear	2	1.990,0	2	1.990,0	0,9%	0,0%
Outros Fósseis *	10	257,5	8	243,0	0,1%	-5,6%
Térmica GD	386	117,1	499	156,3	0,1%	33,5%
Eólica	902	21.603	1.007	25.222	12,0%	16,8%
Eólica (não GD)	812	21.585,9	913	25.204,6	12,0%	16,8%
Eólica GD	90	17,2	94	17,2	0,0%	0,3%
Solar	930.718	14.769	1.848.566	27.498	13,0%	86,2%
Solar (não GD)	8.586	4.878,6	16.537	8.325,2	3,9%	70,8%
Solar GD	922.132	9.890,6	1.832.029	19.173,1	9,1%	93,9%
Capacidade Total sem GD	13.904	182.910	21.833	191.433	90,8%	4,7%
Geração Distribuída - GD	922.684	10.095	1.832.713	19.433	9,2%	92,5%
Capacidade Total - Brasil	936.588	193.006	1.854.546	210.865	100,0%	9,3%

Fonte: Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico março de 2023- MME

2.4. Geração distribuída

Uma tecnologia que permite aos consumidores produzir sua própria energia por meio de sistemas de painéis solares em telhados ou grandes terrenos, estão projetadas para receber investimentos de até 70 bilhões de reais nos próximos dez anos, conforme projeção da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), uma estatal.

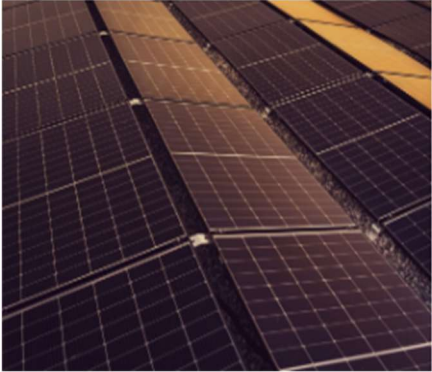
Nesse cenário, a capacidade instalada desses sistemas poderia alcançar 24,5 Gigawatts até 2030, desde que as regras atuais de remuneração da energia gerada permaneçam sem grandes mudanças, como indicou a EPE em um estudo divulgado recentemente.

Essa previsão é significativamente mais otimista do que o cenário apresentado pela EPE no ano anterior, no seu Plano Decenal 2029, que apontava para uma capacidade de 11,4 gigawatts em geração distribuída ao final do período de dez anos, com investimentos de quase 50 bilhões de reais.

Atualmente, as instalações de geração distribuída (conhecidas como GD) somam aproximadamente 3,66 gigawatts de capacidade no Brasil, conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

O setor de energia solar no Brasil apresenta um crescimento constante. Em 2019, houve um aumento de mais de 212% na capacidade instalada de energia solar, totalizando 2,4 GW (ANEEL, 2021). No ano seguinte, em novembro de 2020, o país atingiu a marca de aproximadamente 715.000 sistemas fotovoltaicos instalados (ABSOLAR, 2021). Para acompanhar o crescimento desse mercado, este trabalho foi desenvolvido com uma abordagem didática, servindo como um manual destinado a instaladores e projetistas. A tabela 1 busca ilustrar os componentes de um sistema solar fotovoltaico.

Tabela 1: Principais componentes de um sistema solar fotovoltaico

	Painéis Solares (Módulos Fotovoltaicos): Os painéis solares são responsáveis por capturar a luz solar e transformá-la em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Eles são compostos por células fotovoltaicas feitas de material semicondutor, geralmente silício, que convertem a energia solar em corrente contínua.
	Estrutura de Suporte: A estrutura de suporte é utilizada para fixar os painéis solares em locais adequados, como telhados, terrenos ou estruturas específicas. Essa estrutura deve ser resistente e garantir a segurança dos painéis.
	Inversor: O inversor é responsável por converter a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, que é a forma de eletricidade utilizada na maioria das residências e empresas. Ele também é responsável por controlar e monitorar o sistema.
	Sistema de Armazenamento (Baterias): Em alguns sistemas fotovoltaicos, especialmente aqueles que operam fora da rede elétrica convencional, podem ser utilizadas baterias para armazenar o excesso de energia gerada durante o dia para uso posterior, quando não há luz solar suficiente.

	Controladores de Carga: Os controladores de carga são dispositivos que controlam o fluxo de energia entre os painéis solares, as baterias (se presentes) e o inversor. Eles garantem que a carga das baterias seja adequada e protegem o sistema contra sobrecarga ou descarga excessiva.
	Sistema de Monitoramento: Um sistema de monitoramento é usado para acompanhar o desempenho do sistema fotovoltaico, fornecendo informações sobre a produção de energia, consumo, eficiência e possíveis falhas ou problemas.
	Cabos e Conectores: Os cabos e conectores são utilizados para interligar os componentes do sistema, garantindo a condução segura da eletricidade gerada pelos painéis solares.
	Disjuntores e Dispositivos de Proteção: Esses dispositivos são responsáveis por proteger o sistema fotovoltaico contra sobrecargas, curtos-circuitos e outras falhas elétricas, garantindo a segurança do sistema e dos usuários.

Fonte: Pixabay, disponível em: <https://pixabay.com/pt/photos/search/cabos%20e%20fios%20conectores/>

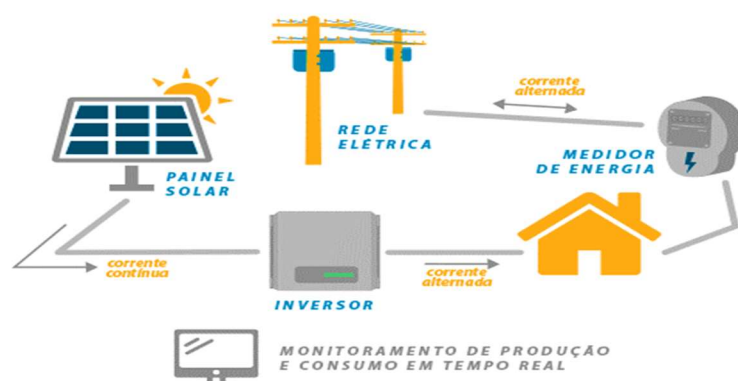
2.5. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede dispensam a necessidade de sistemas acumuladores de energia, como bancos de baterias, que são frequentemente usados em instalações solares fotovoltaicas isoladas. Essa dispensa resulta em uma considerável redução nos custos totais de instalação. Além disso, esses sistemas têm a vantagem de contar com a rede elétrica como backup em momentos em que a demanda excede a geração de energia solar. Isso elimina a necessidade de superdimensionar o sistema para atender a demanda durante períodos prolongados de baixa incidência solar (RÜTHER, 2004).

No processo de dimensionamento da potência do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR), é crucial compreender o sistema de compensação regulamentado na região, considerar questões tarifárias e levar em conta os aspectos tributários (PINHO; GALDINO, 2014). Se a energia gerada for superior à energia consumida, a distribuidora de energia elétrica cobrará um valor relacionado ao custo de disponibilidade ou à demanda contratada. Portanto, para otimizar o dimensionamento do gerador, é essencial calcular o consumo médio diário anual do edifício (Wh/dia) e subtrair o valor da disponibilidade mínima de energia.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede apresentam um significativo potencial para serem instalados em ambientes urbanos, permitindo a geração de energia próxima ao ponto de consumo, o que minimiza custos e perdas decorrentes da transmissão de energia. Essas instalações podem variar em tamanho, podendo ser tanto de grande como de pequeno porte, conforme ilustrado na Figura 16:

Figura 16: Representação de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Orbita Solar, disponível em: <https://www.orbitalsolar.com.br/sistemas-conectados-a-rede/>

2.6. Estimativa do recurso solar

No sistema fotovoltaico conectado à rede, a média da irradiação solar diária é utilizada como base para o cálculo do dimensionamento dos painéis solares e inversores. Quando é possível instalar os painéis nas condições ideais para aproveitar a máxima exposição aos raios solares (com uma inclinação igual à latitude e voltados para o Norte), a irradiação solar média anual pode ser obtida diretamente do banco de dados do plano inclinado disponível no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

No entanto, se for necessário instalar os painéis em uma inclinação ou direção diferentes das condições ótimas, será preciso estimar a irradiação solar no plano desejado. Isso pode ser feito utilizando programas de simulação, como o *PVsyst* ou o SAM. Esses programas são capazes de calcular a irradiação solar para diferentes ângulos de inclinação e desvio azimutal, a partir dos valores de irradiação solar no plano horizontal global (disponíveis no banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar).

Portanto, ao dimensionar um sistema fotovoltaico conectado à rede e considerando diferentes condições de instalação dos painéis solares, é importante utilizar ferramentas de simulação como o *PVsyst* ou o SAM para estimar com precisão a irradiação solar e otimizar o aproveitamento da energia solar disponível. Isso contribui para um dimensionamento mais eficiente e preciso do sistema fotovoltaico.

2.6.1. Efeito Sombreamento

De acordo com Villalva (2012), é crucial compreender que um módulo fotovoltaico pode deixar de produzir energia quando está sujeito à sombra causada por um obstáculo. A intensidade da corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar que incide sobre ela. Quando um módulo fotovoltaico é submetido a condições de pouca ou nenhuma luz solar, a corrente elétrica gerada pela célula torna-se significativamente reduzida, podendo mesmo atingir valores nulos.

O efeito de sombreamento ocorre quando uma ou mais células fotovoltaicas recebem uma quantidade insuficiente de luz solar, o que impede a passagem adequada da corrente elétrica de uma célula para outra. A Figura 19, fornece uma representação visual clara dessas afirmações, ilustrando de forma gráfica como a sombra afeta a produção de energia em um módulo fotovoltaico.

Figura 17: Efeito sombreamento



Fonte: Brasil Solar, 2018

3. METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO

No contexto do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, a habilidade de calcular com precisão a quantidade de energia gerada diariamente por um módulo fotovoltaico é de extrema importância. Segundo as orientações de Villalva (2012), o autor nos apresenta duas equações viáveis que desempenham um papel crucial na facilitação desse processo. No entanto, para realizar esse cálculo de maneira eficaz, é essencial adquirir um entendimento profundo das condições climáticas específicas de irradiação solar no local em questão. Além disso, é imperativo ter conhecimento detalhado das características intrínsecas do módulo fotovoltaico que será utilizado no sistema.

A irradiação solar varia significativamente de acordo com a localização geográfica e as condições climáticas sazonais. Portanto, ter acesso a dados precisos de insolação é crucial para estimar a energia que o módulo será capaz de gerar em um dia típico. Isso inclui informações sobre a intensidade e duração da luz solar ao longo do ano.

Por outro lado, as características específicas do módulo, como sua eficiência, capacidade nominal e coeficiente de temperatura, são fundamentais para determinar sua capacidade de conversão de luz solar em eletricidade. Essas características variam entre diferentes modelos de módulos, o que torna importante a seleção do módulo apropriado para o sistema em questão.

Assim, ao combinar informações climáticas locais com detalhes sobre o módulo fotovoltaico, pode-se utilizar as metodologias propostas por Villalva (2012) e calcular de forma precisa a produção diária de energia do sistema. Isso é essencial para o dimensionamento adequado do sistema fotovoltaico, garantindo que ele atenda às necessidades de consumo de energia e seja uma fonte confiável e eficiente de eletricidade a partir da luz solar.

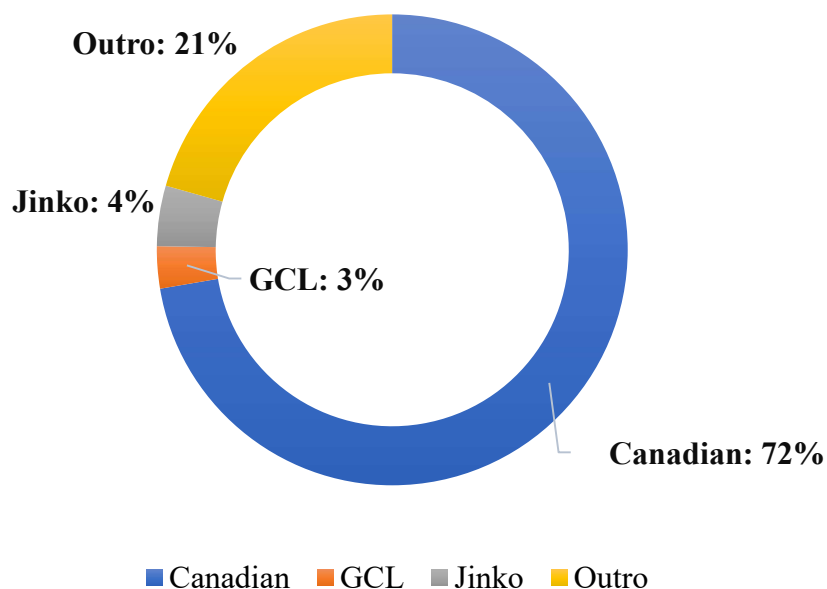
3.1. Elementos do Sistema de Geração de Energia

Em consonância com o objetivo de padronizar os parâmetros de dimensionamento como os principais determinantes de variações no desempenho, todos os métodos adotarão o mesmo modelo de painel solar, estabelecendo, assim, uma característica comum a todos os projetos.

A escolha por esse fabricante, baseia-se nos resultados obtidos em uma breve Análise do Mercado Fotovoltaico. A Figura 17 ilustra qual fabricante é preferencialmente adotado pelas empresas integradoras do setor fotovoltaico. Embora isso não represente necessariamente uma

participação de mercado (*Market Share*), é um indicativo claro da forte presença da marca no mercado brasileiro.

Figura 18: Preferência por fabricantes de painéis solares



Fonte: Adaptado de *Greener* – Análise do Mercado Fotovoltaico, 2º semestre de 2021

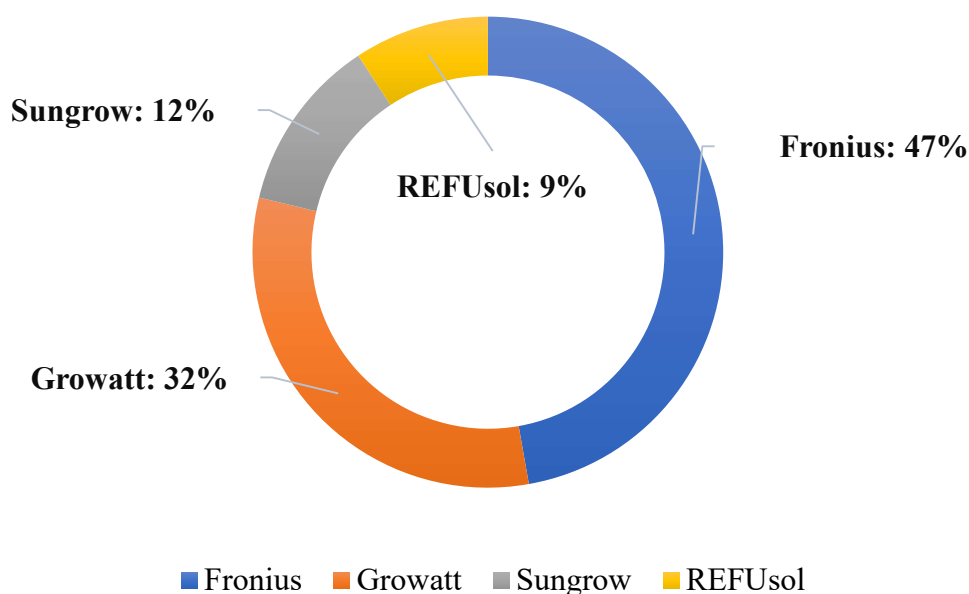
Dentre a ampla gama de modelos da Canadian Solar disponíveis no Brasil, a escolha recaiu sobre o modelo Ku5 *canadian*, principalmente devido à sua notável relação entre potência e área, bem como ao custo acessível por watt-pico (Wp) adquirido. Conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Características do módulo escolhido

	Ku5 Canadian
	CS3S: 2168 x 996 x 35 mm
	Faixa de potência: 430~450 W
	Tamanho do painel de 158+ mm
	Potência de módulo de até 450 W
	Eficiência do módulo 20.8 %

Fonte: Produção própria com base na ficha técnica do equipamento

Outro componente de suma importância em um sistema fotovoltaico é o inversor, cuja seleção deve ser cuidadosamente realizada dentre os diversos modelos disponíveis no mercado. A Figura 18 apresenta as preferências relativas ao fabricante de inversores no contexto em questão.

Figura 19: Preferência por fabricantes de inversores

Fonte: Greener – Análise do Mercado Fotovoltaico 2º semestre de 2021

O mesmo critério foi adotado para a escolha do inversor para o sistema, O inversor selecionado para este dimensionamento é o *Fronius Galvo 3.1-1*. Os dados essenciais e uma imagem ilustrativa desse modelo estão apresentados na Tabela 3. Agora, resta avaliar se ele satisfaz todas as exigências e necessidades do sistema em questão.

Tabela 3: Características do inversor escolhido

	<i>Fronius Galvo 3.1-1</i>	
	Potência nominal (kWc.a)	3100W
	Potência FV recomendada (kWp)	4,1 Wp
	Corrente de entrada máxima (Icc máx)	20,7 A
	Tensão de entrada máxima (Vcc máx)	550 V
	Faixa de SPPM (Vcc)	440 V
	Máxima eficiência	96,1 %

Fonte: Produção própria com base na ficha técnica do equipamento

O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos do CEPEL destaca a importância do FDI (Fator de Dimensionamento de Inversores) como um parâmetro fundamental para a escolha do inversor apropriado. O FDI é definido como a relação entre a potência nominal em corrente alternada do inversor e a potência instalada pico do arranjo de painéis solares. De acordo com o documento, a revisão da literatura sugere que os valores recomendados por fabricantes e instaladores geralmente se situam entre 0,75 e 0,85, enquanto o limite superior aceitável é de 1,05.

3.2. Método 1: Insolação média

O método de cálculo da energia produzida baseia-se nas informações de insolação disponíveis, expressas em (Wh/m²/dia). De acordo com as recomendações de Villalva (2012), o método da insolação solar para o cálculo da energia produzida pelo módulo fotovoltaico é particularmente válido quando se considera o uso de controladores de carga. Ao utilizar o valor da energia solar disponível diariamente como base para o cálculo, a expectativa é maximizar a extração dessa valiosa fonte de energia solar.

O valor de insolação encontrado nos mapas solar métricos é a soma das insolações diárias ao longo do ano, podendo ser representado em uma base anual ou até mesmo em uma escala mensal. Para realizar esse cálculo, utiliza-se a seguinte Equação (1):

$$E_p = E_S \times A_M \times n_M \quad (1)$$

onde:

E_p – Energia produzida pelo modulo diariamente (Wh);

E_S – Insolação diária (Wh/m²/dia);

A_M – Area da superfície do modulo (m²);

n_M – Eficiência do modulo.

Villalva (2012), sugere a seguinte forma de calcular a quantidade de painéis necessários para cada sistema, por meio da seguinte Equação (2):

$$Np = \frac{E_S}{E_M} \quad (2)$$

onde:

Np – Número de módulos da instalação;

E_S – Energia produzida pelo sistema (kWh);

E_M – Energia produzida por um módulo (kWh).

3.3. Método 2: Aplicação De Ferramentas Computacionais

A aplicação de ferramentas computacionais no projeto de sistemas fotovoltaicos é uma abordagem altamente vantajosa, respaldada por diversos autores e especialistas na área. Essas ferramentas oferecem inúmeras contribuições significativas para o desenvolvimento eficiente e preciso desses sistemas, justificando seu uso no processo de projeto.

De acordo com Rocha (2018), a utilização de ferramentas computacionais no projeto de sistemas fotovoltaicos permite realizar simulações detalhadas, considerando variáveis como consumo de energia, perfil de irradiação e características dos componentes. Isso resulta em dimensionamentos mais precisos e otimizados, evitando problemas de super ou subdimensionamento.

Nesse sentido, as ferramentas computacionais possibilitam a análise de diversos cenários e a modelagem de diferentes condições operacionais, como destacado por Rodrigues (2020), que afirmam que essas ferramentas permitem avaliar o impacto de sombreamento, inclinação dos painéis e variações sazonais, proporcionando uma visão abrangente do desempenho esperado do sistema.

Portanto, a incorporação de ferramentas computacionais no projeto de sistemas fotovoltaicos se justifica pela capacidade de otimizar o dimensionamento, analisar cenários variados e aprimorar o desempenho geral do sistema, como enfatizado por diversos estudos na área.

3.3.1. RETScreen expert

O *Renewable Energy Techniques Screen*, também conhecido como *RETScreen Expert* (Versão 6.0.7.55), é uma ferramenta direcionada para a implementação de projetos relacionados a energia renovável, não renovável e eficiência energética. Essa ferramenta desempenha um papel crucial na redução dos custos associados aos estudos de viabilidade previa.

O programa é projetado para avaliar diversos aspectos de projetos, incluindo a produção de energia, os custos ao longo de sua vida útil e o impacto na redução das emissões de gases de efeito estufa. Sua aplicação abrange uma variedade de áreas, com foco na realização de estudos preliminares. No contexto da energia fotovoltaica, ele é capaz de calcular os custos de produção de energia e a redução das emissões de gases para os três tipos básicos de aplicações: sistemas conectados à rede, sistemas isolados e sistemas de bombeamento de água. Além disso, também oferece a capacidade de configurar sistemas híbridos simples.

Uma característica valiosa desse software é a sua extensa base de dados, que inclui informações de radiação solar para mais de 1000 localidades em todo o mundo. Isso permite uma análise precisa e abrangente, mesmo em locais remotos, através de dados obtidos de satélites.

De maneira geral, esse software desempenha um papel crucial na avaliação de projetos de energia limpa, incluindo sistemas fotovoltaicos. Ele desempenha um papel essencial na visualização da viabilidade desses projetos, ajudando a analisar gastos financeiros, recursos humanos e outros fatores. Dessa forma, o *RETScreen Expert* é uma ferramenta valiosa para evitar possíveis frustrações e otimizar o sucesso dos projetos quando são colocados em prática.

3.3.2. *PVsyst*

O *PVsyst* é um *software* amplamente utilizado para estudos, dimensionamento e análise de sistemas fotovoltaicos (Sharma, 2018). O programa oferece um procedimento rápido e simplificado para o projeto do sistema, permitindo especificar a potência desejada e a área disponível. Com base nessas informações, o *software* seleciona os módulos fotovoltaicos e inversores apropriados do banco de dados interno. Além disso, o *PVsyst* possibilita propor uma configuração de matriz que conduza a uma simulação preliminar.

O *software* proporciona uma visualização 3D da unidade consumidora com o sistema fotovoltaico instalado, permitindo a importação de arquivos de *softwares* de desenho técnico (*AutoCAD*, *SketchUp*, *Helios3D*, etc.) e realizando simulações do movimento aparente do Sol ao longo do dia. Isso permite projetar sombreamento de todos os objetos do desenho e verificar a presença de sombras nos arranjos fotovoltaicos.

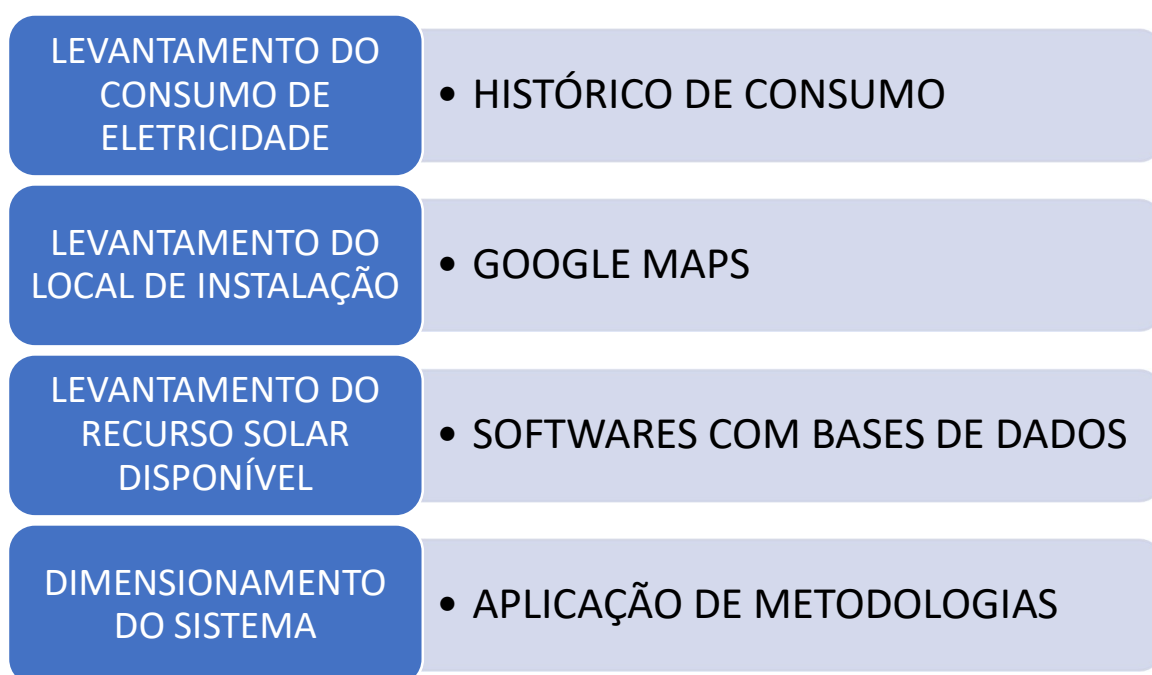
Os resultados das simulações são apresentados em um relatório completo, contendo informações sobre a análise de perdas do sistema, análise financeira, desempenho e a potência total gerada (Wh/ano) pelo sistema fotovoltaico projetado. É importante mencionar que o *PVsyst* possui um dos bancos de dados mais utilizados, o *Meteonorm* (*PVsyst*, 2021), o que reforça a confiabilidade e precisão das análises realizadas pelo *software*.

4. METODOLOGIA

4.1. Energia Solar: Metodologia e Melhores Práticas

Com o objetivo de estruturar e simplificar as etapas a serem consideradas no cálculo de dimensionamento do gerador fotovoltaico, bem como na seleção de todos os componentes essenciais para o funcionamento do sistema, será apresentado um guia passo a passo recomendado para a elaboração do projeto, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20: fluxograma metodológico



4.1.1. Levantamento do consumo de eletricidade

A etapa inicial no processo de dimensionamento do sistema fotovoltaico envolve a análise do consumo de energia elétrica da residência. A abordagem ideal consiste em examinar as faturas de energia elétrica ao longo de, no mínimo, 12 meses e calcular a média mensal de consumo ao longo do ano. No entanto, existe uma alternativa para estimar o consumo médio.

4.1.2. Levantamento do local de instalação

A instalação de sistemas fotovoltaicos geralmente ocorre nos telhados ou terraços de residências, uma vez que essas áreas recebem uma maior incidência de radiação solar. No

entanto, com o avanço das tecnologias, também é possível implementar sistemas fotovoltaicos em outras superfícies, como janelas de vidro e telhas integradas com painéis fotovoltaicos, ou até mesmo no solo, quando há espaço disponível. A escolha do local de instalação tem um impacto significativo no desempenho do sistema, uma vez que a quantidade de radiação solar recebida e a ocorrência de sombreamento afetam diretamente a eficiência do sistema.

4.1.3. Levantamento do recurso solar disponível

É possível realizar o levantamento do recurso solar por meio de softwares disponíveis gratuitamente ou mediante aquisição, que utilizam bases de dados com informações de medições de irradiação solar em pontos específicos. Esses softwares são altamente avançados e permitem uma ampla gama de análises, como avaliação de viabilidade econômica, dimensionamento de sistemas, simulação do projeto, curvas de carga, cálculo de cabeamento e fornecimento de dados detalhados sobre a irradiação solar, entre outros aspectos.

Alguns programas notáveis incluem o *Homer*, *PVsyst*, *SAM*, *PV-Sol* e *SunData* (CRESESB). Como será demonstrado em nosso estudo de caso, o método desenvolvido pelo CRESESB fará uso de uma ferramenta computacional, para obter certos parâmetros necessários para o arranjo do sistema.

4.1.4. Dimensionamento do Sistema

Para garantir a eficiência e maximizar a utilização dos componentes de um sistema fotovoltaico, é crucial realizar um dimensionamento adequado. Nesse sentido, existem dois métodos amplamente utilizados para calcular o dimensionamento do gerador fotovoltaico. Esses métodos visam determinar a capacidade necessária do sistema para atender à demanda de energia elétrica de forma eficiente.

Ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens, e a escolha do mais adequado dependerá das características específicas do projeto e das necessidades do consumidor. É recomendável contar com a assistência de um profissional especializado em energia solar para realizar o dimensionamento correto do sistema fotovoltaico, levando em consideração todas as variáveis envolvidas e garantindo a eficiência e o melhor aproveitamento dos componentes do sistema.

4.2. Identificação do Local de Estudo

Segundo estudos de Machado (2015), o clima na região semiárida do Nordeste é caracterizado por altas temperaturas e chuvas irregulares ao longo do ano. O clima é marcado por altas temperaturas ao longo do ano, com médias anuais que frequentemente superam os 30 graus Celsius. Além disso, a precipitação de chuvas na maior parte do estado é irregular, concentrando-se em um período limitado do ano, geralmente durante o verão. A região enfrenta desafios significativos relacionados à escassez de água, especialmente durante as secas prolongadas.

Uma das cidades a ser estudada é a cidade Mossoró no interior do Rio Grande do Norte, nesse caso será abordado uma usina residencial. De acordo com Oliveira (2018), Mossoró apresenta um dos maiores potenciais solares do Brasil, com uma média de horas de sol intensas significativamente alta. A cidade é conhecida por seu potencial solar significativo, com uma grande quantidade de dias ensolarados ao longo do ano. Isso a torna um local propício para a implementação de sistemas de geração de energia fotovoltaica. Mossoró tem buscado ativamente diversificar suas fontes de energia e aproveitar o potencial solar para suprir parte de sua demanda por eletricidade. A usina que será analisada nesta ocasião é uma instalação de geração de energia projetada e destinada exclusivamente para atender às necessidades de uma residência familiar, estando em operação desde o ano de 2020, tendo como local de instalação o telhado dessa residência, sua capacidade nominal é de 2,8kWp, o que a torna capaz de executar com êxito a sua função de abastecimento elétrico a essa residência.

Outra cidade onde estudou-se as condições climáticas é a cidade de Caraúbas, nesse caso aborda se uma das usinas da UFERSA, ela enfrenta os mesmos desafios relacionados à irregularidade das chuvas e à necessidade de buscar fontes alternativas de energia elétrica. A energia solar tem se destacado como uma opção atraente para Caraúbas, não apenas para atender às demandas locais, mas também para contribuir para a resiliência energética da região. De acordo Santos (2019), a busca por fontes de energia mais confiáveis é crucial para cidades como Caraúbas, que frequentemente enfrentam problemas de fornecimento de água e eletricidade durante estiagens. A usina estudada nesse caso, é uma das 5 usinas instaladas na universidade até a data do fim deste de estudo, será abordada a usina de número de 3. Tendo sua instalação no telhado bloco central de aulas 2, sua capacidade nominal instalada é de 33kWp.

Na Figura 21 está o mapa do estado do Rio Grande do Norte, com intuito de localizar onde estão localizadas a cidades abordadas nesse trabalho.

Figura 21: Ponto de localização

Fonte: Google Maps

4.2.1. Irradiação na região local e entorno

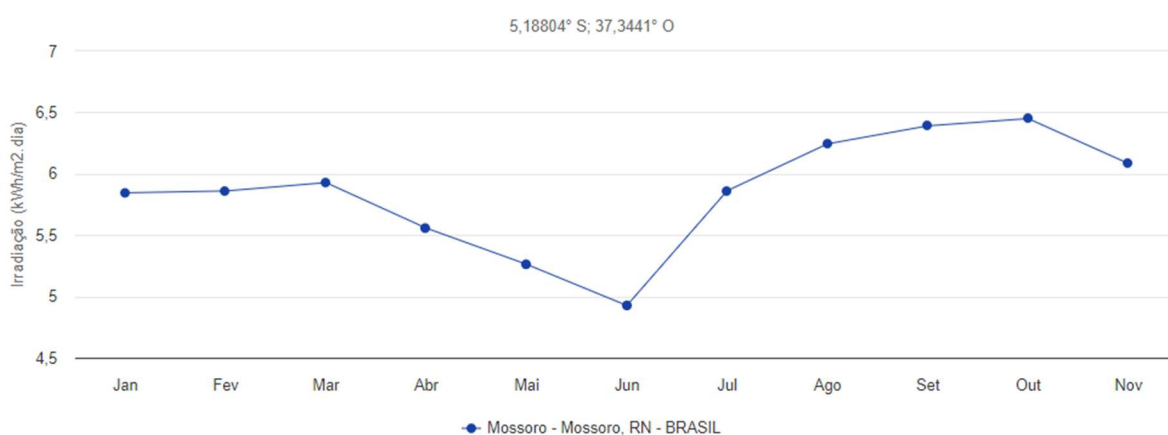
A utilização das Horas de Sol Pleno (HSP) como uma métrica para expressar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia é uma abordagem bastante conveniente e prática. Esse conceito reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a 1 kWh/m^2 para que a energia resultante seja equivalente à energia acumulada para o dia e a localização específica em questão. Essa métrica é útil para quantificar a disponibilidade de energia solar em uma determinada região ao longo do ano. Para obter os dados de irradiação solar em um local específico, o uso da ferramenta SUNDATA, que é fornecida pela CRESESB e disponibilizada no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). Essa ferramenta é valiosa para engenheiros e pesquisadores que desejam avaliar a viabilidade e o potencial de sistemas de energia solar em uma região específica.

Ao inserir as coordenadas geográficas do local de interesse no SUNDATA, é possível obter os valores de irradiação solar em $\text{kWh/m}^2\text{dia}$ correspondentes às médias mensais para os 12 meses do ano. Isso permite uma análise abrangente das variações sazonais na disponibilidade de energia solar na região e é fundamental para o dimensionamento adequado de sistemas fotovoltaicos.

Essa abordagem baseada nas Horas de Sol Pleno (HSP) e na utilização do SUNDATA é uma prática comum na engenharia elétrica e energética para avaliar a geração potencial de energia solar em um local específico e, assim, tomar decisões informadas sobre o design e a eficiência de sistemas de geração solar. Ela contribui significativamente para o planejamento de projetos de energia solar sustentável e eficiente.

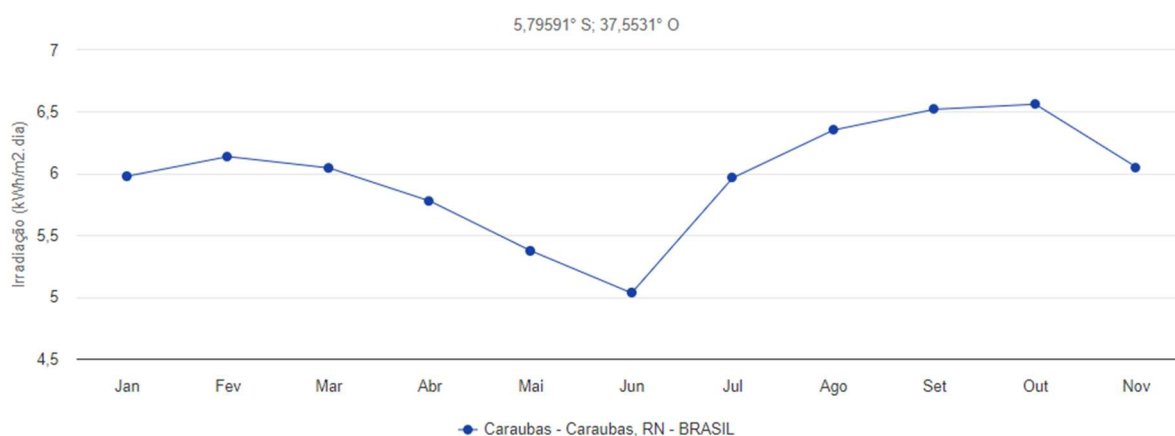
As Figuras 22 e 23 mostram gráficos das irradiações solares no plano horizontal, das suas respectivas localidades.

Figura 22: Ponto de localização 5° 11' 17" S - 37° 20' 39" O



Fonte: SUNDATA (2022)

Figura 23: Ponto de localização 5° 47' 45" S - 37° 33' 11" O



Fonte: SUNDATA (2022)

O programa retorna valores para duas regiões na Tabela 4, incluindo o município de estudo: Caraubas, Mossoró. Dados mostram que entre os meses de agosto-novembro há maiores taxas de irradiação em relação à média calculada no período de 12 (doze) meses, considerando um plano horizontal de inclinação igual a 0°.

Tabela 4: irradiações solares no plano horizontal

	Mossoró	Caraúbas
Latitude	5° 11' 17" S	5° 47' 45" S
Longitude	37° 20' 39" O	37° 33' 11" O
Janeiro	5,85	5,98
Fevereiro	5,86	6,14
Março	5,93	6,05
Abril	5,56	5,78
Maió	5,26	5,37
Junho	4,93	5,03
Julho	5,21	5,39
Agosto	5,86	5,96
Setembro	6,24	6,35
Outubro	6,39	6,52
Novembro	6,45	6,56
Dezembro	6,08	6,05
Média	5,80	5,93
Delta	1,52	1,53

Fonte: Autoria própria com base nos dados coletados (2023)

5. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

Esta seção deste estudo representa o núcleo, da pesquisa, onde a eficiência dos métodos de equacionamentos adotados será rigorosamente avaliada com base em informações concretas. O processo de coleta de dados esteve concentrado em dois locais de estudos específicos, usinas já em operação, onde detalhadamente levantou as informações sobre o consumo de energia elétrica, a localização das instalações e o recurso solar disponível.

A análise que segue contempla diversas etapas essenciais para que se compreenda a validade da abordagem metodológica e suas implicações reais de escolha.

5.1. Método 1 – Insolação média

O objetivo dessa abordagem visa otimizar a eficiência e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, garantindo que sejam dimensionados de acordo com as condições climáticas locais.

5.1.1. Usina Residencial – Mossoró

A energia gerada pelo módulo fotovoltaico pode ser calculada mediante a aplicação da Equação (1). Será realizado o cálculo de mês a mês, para que se obtenha a geração estimada mensal de modo a facilitar a comparação com a produção real, garantindo uma visualização ampla do comportamento da usina. Assim, aplicando os valores de insolação média do mês de janeiro contidos no item (4.2.1) e características do módulo expostas no item (3.1) na Equação (1), resultará no seguinte equacionamento:

$$E_p = 5850 \times 2,15 \times 20,8\% = 2616,12Wh/dia \quad (1)$$

Sabendo que esse valor encontrado está em Wh, realizou-se a seguinte manipulação para obter a energia produzida ao longo mês:

$$E_p = \frac{2616,12Wh \times 30 dias}{1000} = 78,36kWh$$

Desta forma, foi possível determinar a energia gerada por um único módulo. A abordagem deste estudo envolve uma análise e comparação de dados de uma usina já em operação. Foram coletados dados de geração ao longo de todo o ano de 2022, conforme apresentado na Tabela 5. Com esses dados em mãos, torna-se viável calcular a quantidade necessária de módulos para o sistema. É importante ressaltar que, devido à constante evolução das tecnologias de células fotovoltaicas, a quantidade de painéis encontrados pode variar em relação à realidade.

Tabela 5: Dados do histórico de consumo

Mês	Consumo (kWh/mês)
Janeiro	363
Fevereiro	290
Março	225
Abril	335
Maio	296
Junho	306
Julho	343
Agosto	329
Setembro	278
Outubro	271
Novembro	224
Dezembro	310
Total	275
Média	295,76

Fonte: Autoria própria baseada no histórico de consumo anual (2023)

Analisando os dados da Tabela 5, e considerando o que é sugerido pelo método de insolação média, que defende a adoção dos valores médios, será utilizado para equacionamento a média dos 12 meses de consumo da residência, dessa forma aplicando a Equação (2), é possível quantificar a quantidade de painéis necessário nesse caso, do seguinte modo:

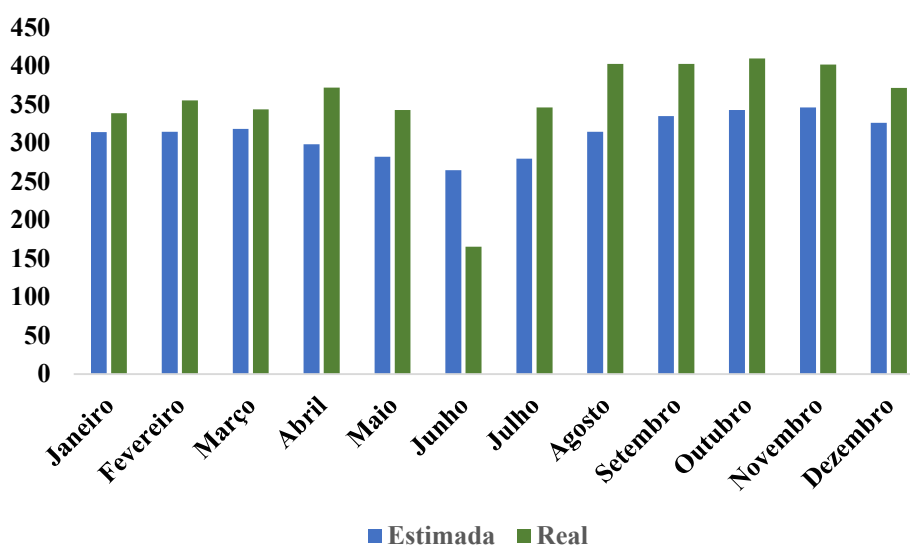
$$Np = \frac{295,76}{78,36} = 3,77 \text{ painéis} \quad (2)$$

Para atender de forma mais eficaz à demanda de eletricidade, será considerado a instalação de um total de 4 painéis solares. Isso leva em conta a possibilidade de flutuações na produção de energia devido às variações climáticas. Com base nessa premissa, pode se calcular a quantidade mensal de energia:

$$Np = 78,36 \times 4 = 313,4 \text{ kWh}$$

O mesmo cálculo para obter se a geração mensal por meio da equação (1), adotando sempre a mesma quantidade de painéis foi realizado com os demais meses do ano, assim obtendo valores encontrado na Figura 24 onde são confrontados os dados reais de consumo do sistema.

Figura 24: Geração estimada X real



Fonte: Autoria própria (2023)

Os dados fornecidos mostram a comparação entre a geração estimada e a geração real de energia fotovoltaica ao longo do ano, com base em um modelo de previsão que utiliza dados de insolação média da região. Em geral, observou-se que a geração estimada tende a ser menor na maioria dos meses. Isso sugere que o modelo de previsão com base na insolação média da região parece não atender nesse caso, visto que na maioria dos meses, não acompanha de perto a realidade da geração de energia.

No entanto, há abordagens notáveis, como o mês de junho, onde a geração estimada divergiu significativamente da geração real. Em contato com o proprietário da usina, foi

informado que a anomalia nos dados ocorreu devido a troca de roteador e consequente perda de dados do *datalog*.

Ao analisar o comportamento da geração de energia, destaca-se um ponto de interesse: nos primeiros meses do ano Janeiro, fevereiro e março, a geração estimada ficou consideravelmente próxima da real. No entanto, é importante salientar que, nos demais meses do ano, a geração real sempre superou a geração estimada, o que mesmo que haja um mecanismo de compensação ainda assim não se aplicaria para esse caso. É relevante notar que a metodologia utilizada incluía um custo de disponibilidade de 30 kWh, não faz com o que naturalmente fiquem abaixo das estimativas. Essa consideração fornece uma base sólida para avaliar a metodologia empregada e sua necessidade de aperfeiçoamento para o caso específico.

5.1.2. Usina UFERSA – Caraúbas

Aqui será aplicada a mesma forma de equacionamento que foi usada no item anterior, quando se considerou a aplicação para uma usina residencial de menor porte. Como forma de verificar se a metodologia também serve para sistema de maior capacidade.

As tratativas para a obtenção do comparativo de dados de dimensionamento x geração real para este caso serão diferentes: a usina da UFERSA não teve como base de instalação a premissa de suprimento pontual de demanda energética. E aqui, tem-se como objetivo validar a metodologia em questão. Dessa forma, o módulo Trina Solar DUOMAX Dual Glass 72 – Cell module 330 W, módulo instalado na usina, foi usado como base nos cálculos.

$$E_p = 5980 \times 1,962 \times 17,3\% = 2029,76Wh$$

Considerando que o valor obtido é expresso em Wh, foi realizada a seguinte manipulação para calcular a energia gerada ao longo do mês:

$$E_p = \frac{2029,76Wh \times 30 \text{ dias}}{1000} = 60,893kWh$$

Assim, foi possível determinar a quantidade de energia gerada por um único módulo. Como dito anteriormente a abordagem do estudo inclui uma análise e comparação de dados de uma usina já em operação, contando com 190 módulos operantes. Esta informação servirá agora para o procedimento de estimativa de geração e posterior comparação com os dados reais.

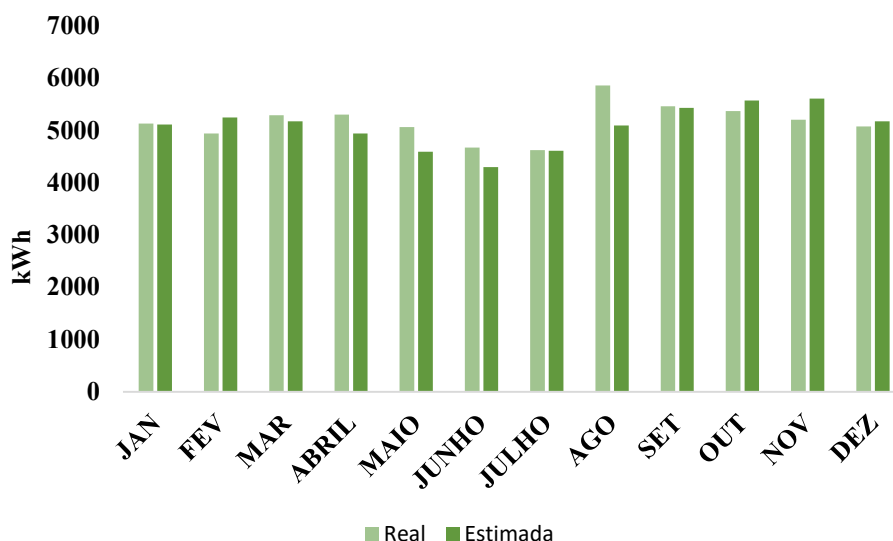
Com o objetivo de atender de maneira mais eficiente à demanda de eletricidade, será avaliada a instalação de um total de 84 painéis solares. Essa abordagem leva em consideração a possibilidade de flutuações na produção de energia devido às variações climáticas. Com base nessa premissa, é possível calcular a quantidade mensal de energia gerada usando a seguinte equação:

$$Np = 60,893 \times 84 = 5.115,01 \text{ kWh}$$

O procedimento de projeto para determinar a geração mensal, seguindo a recomendação da Equação (1) e mantendo uma quantidade constante de painéis, foi repetido durante os demais meses

do ano. Isso resultou nos valores representados na Figura 25, a qual está sendo comparado com os dados reais de consumo do sistema.

Figura 25: Geração estimada X real



Fonte: Autoria própria (2023)

Os dados apresentam uma comparação entre a Geração Estimada e a Geração Real de energia ao longo do ano. No geral, observa-se uma proximidade entre os valores estimados e reais, porém não necessariamente isso indica que o modelo de previsão utilizado seja totalmente eficaz uma vez que na maioria dos meses sua produção estimada ficando abaixo da real. No

entanto, é importante destacar que há variações notáveis, como no mês de fevereiro onde a estimativa ficou abaixo da geração real.

No entanto, é crucial sublinhar que, nos meses de fevereiro, outubro, novembro e dezembro, a geração estimada superou a geração real. É importante observar que a metodologia aplicada incorporou um custo de disponibilidade que não foi descontado do valor real. Em resumo, os dados mostram um bom desempenho do modelo, logo, é possível afirmar que a metodologia atinge com êxito aquilo que lhe foi proposto.

Essas considerações estabelecem uma base sólida para a avaliação da metodologia empregada e sua eficácia.

5.2. Método 2 – Aplicação de ferramentas computacionais

O propósito desta abordagem é realizar uma comparação entre a produção de energia elétrica efetivamente observada e estimada pela simulação. Para atingir esse objetivo, serão utilizadas ferramentas computacionais, atualizando o aprimoramento ou o dimensionamento, em contraste com uma metodologia já empregada no sistema existente. Isso deve resultar em economia de tempo e recursos.

5.2.1. Simulação PVsyst – Usina residencial

Nesta análise, tal como na análise anterior, comparando minuciosamente os dados simulados com os dados reais de produção de energia fotovoltaica. O propósito subjacente é avaliar a eficácia do modelo empreendedor no *PVsyst* e da metodologia adotada para a geração de energia elétrica. Essas informações foram registradas mês a mês ao longo de um ano. A meta é identificar semelhanças e discrepâncias entre os dois conjuntos de dados, proporcionando uma visão sobre a precisão da simulação em representar a geração de energia. A Figura 26 exibe a tela de início do software como referência visual.

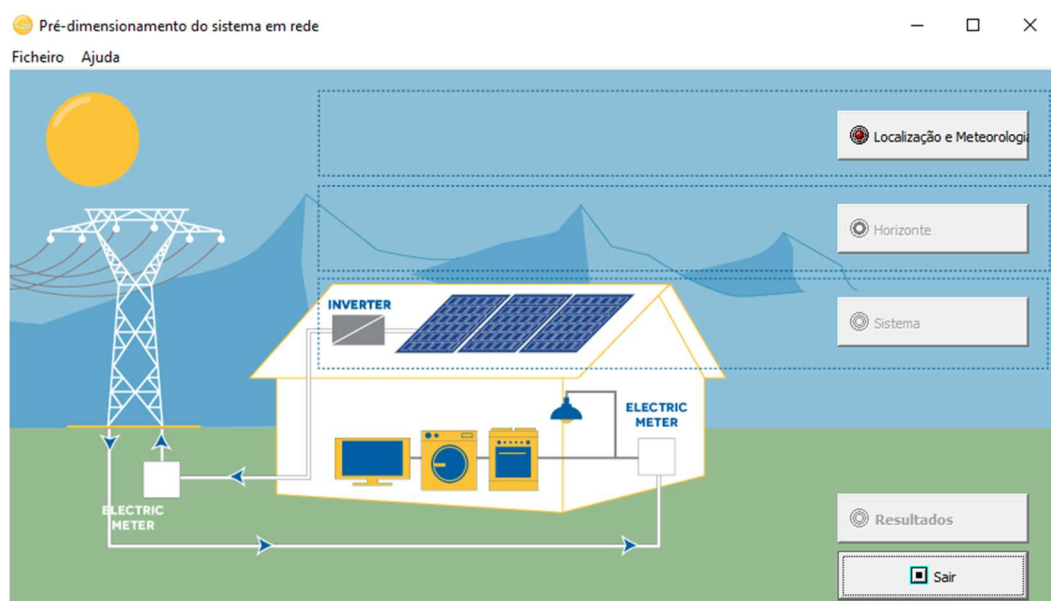
Figura 26: Tela inicial *software PVsyst*



Fonte: Adaptado do *software PVsyst* (2023)

Ao escolher o tipo de sistema que se deseja dimensionar, entre as opções disponíveis, que para este estudo, é o sistema acoplado à rede, o *software* nos encaminha para a próxima tela, onde efetivamente se inicia o processo de dimensionamento. A Figura 27 ilustra essa etapa mencionada.

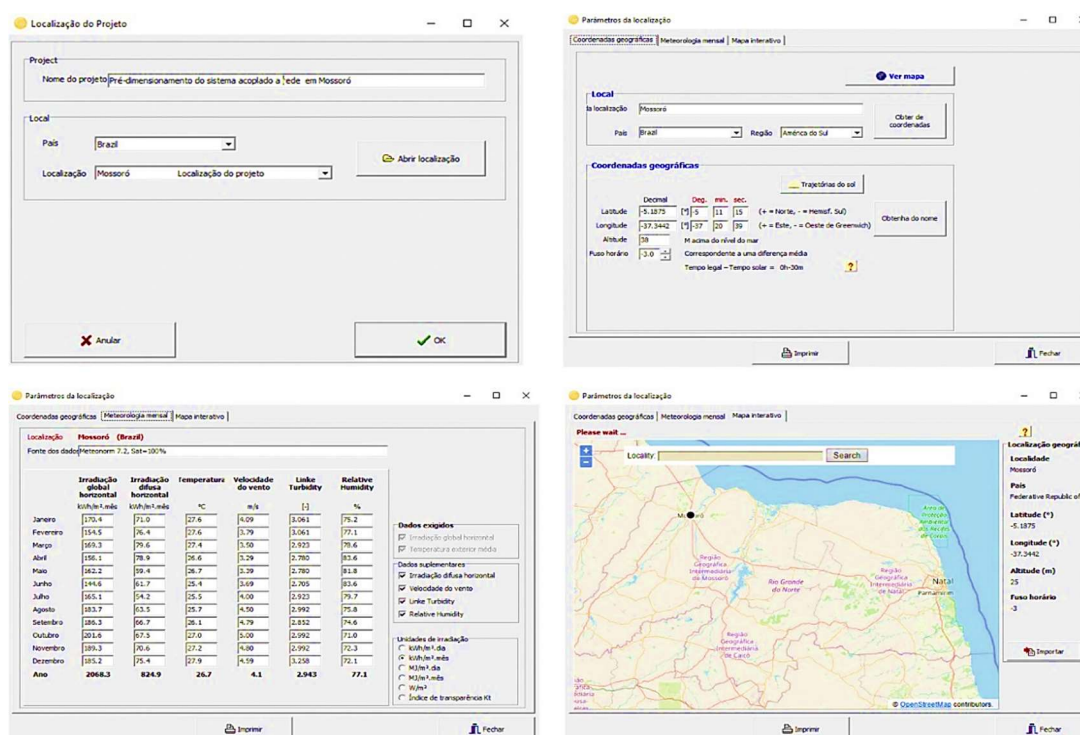
Figura 27: Tela dimensionamento acoplado a rede



Fonte: Adaptado do *software PVsyst* (2023)

Ao avançar no processo de dimensionamento através do software, bem como ao preencher os dados de localização, o programa consistentemente nos oferece múltiplas telas como uma abordagem para fornecer uma representação visual. A Figura 28 apresenta um quadro contendo a capturas dessas telas, especificamente para a configuração de localização e informações climáticas.

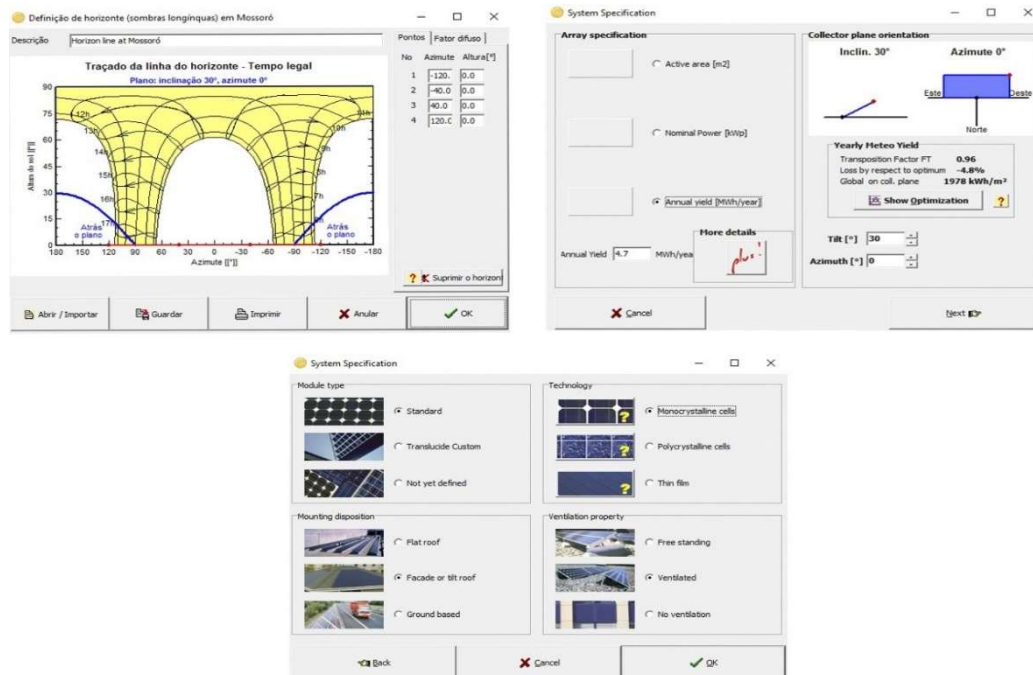
Figura 28: Tela de opções climáticas e localização



Fonte: Adaptado do *software PVSystem* (2023)

O programa também apresenta uma representação gráfica da linha do horizonte, seus pontos de azimuth e altura dos ângulos, na sequência ao preencher os dados com a capacidade nominal do sistema, e o próprio programa de acordo com os dados de localização e irradiação da região preenche automaticamente os dados de inclinação dos painéis, assim deve se selecionar somente as opções que tipificam as características dos componentes do sistema. A figura 29 apresenta uma representação visual do que foi falado.

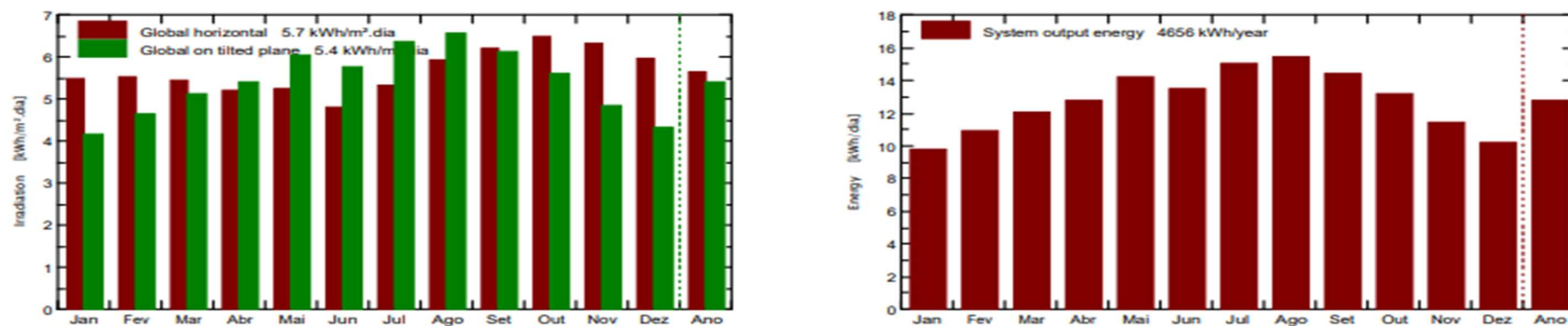
Figura 29: Tela de sombras e características técnicas



Fonte: Adaptado do *software PVSystem* (2023)

Por fim, o programa fornece os dados de dimensionamento estimados com base em todas as informações anteriores. Para visualizar esses resultados, a figura 30 apresenta capturas de tela do *software*.

Figura 30: Resultado do dimensionamento – Residencial



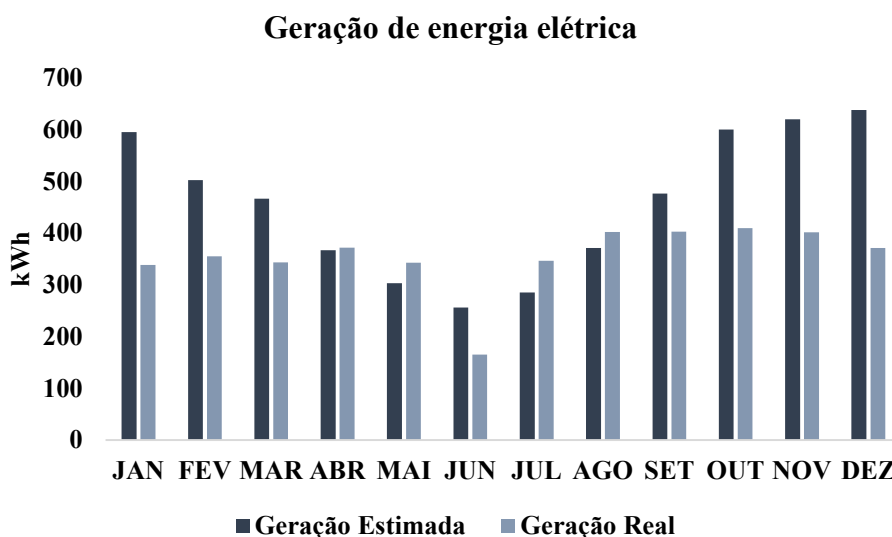
	Gl. horiz. kWh/m².dia	Coll. Plane kWh/m².dia	System output kWh/dia	System output kWh
Jan.	5.50	4.15	9.77	303
Fev.	5.52	4.64	10.92	306
Mar.	5.46	5.11	12.02	373
Abr.	5.20	5.43	12.77	383
Mai.	5.23	6.06	14.25	442
Jun.	4.82	5.75	13.53	406
Jul.	5.33	6.38	15.01	465
Ago.	5.93	6.55	15.41	478
Set.	6.21	6.11	14.39	432
Out.	6.50	5.62	13.23	410
Nov.	6.31	4.85	11.42	343
Dez.	5.97	4.35	10.23	317
Ano	5.67	5.42	12.76	4656

Fonte: Adaptado do *software PVSystem* (2023)

Uma análise desses dados revela que, em geral, a simulação apresenta resultados próximos aos dados reais, sugerindo que o modelo utilizado pelo software *PVsyst* é capaz de estimar razoavelmente bem a geração de energia fotovoltaica.

No entanto, algumas diferenças significativas foram observadas. Por exemplo, nos meses de abril, maio, julho e agosto apresentaram valores simulados abaixo dos dados reais, indicando que o modelo pode subestimar a geração de energia em condições específicas de irradiação solar. Essas discrepâncias podem ser atribuídas a várias variáveis, incluindo as especificações dos painéis solares, a inclinação e orientação do sistema, e fatores climáticos. Na Figura 31 uma comparação entre a geração real e simulada, como forma de visualização do que está sendo falado.

Figura 31: Geração estimada X real



Fonte: Autoria própria (2023)

Por outro lado, a simulação se mostrou mais precisa em outros meses, com resultados mais próximos ou acima da geração real, o que cobre os demais custos dos meses que ficaram abaixo. Isso sugere que o modelo pode ser confiável em condições típicas de irradiação solar.

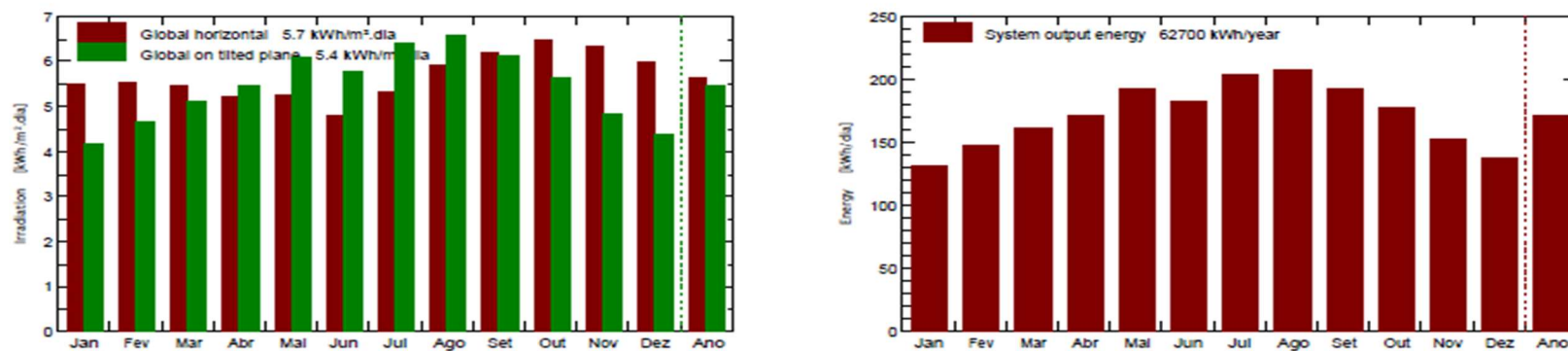
Portanto, essa análise ressalta a importância de ajustar e calibrar o modelo de simulação para melhor representar as condições locais específicas. Isso inclui considerar detalhes como a inclinação dos painéis solares, a eficiência dos inversores e as condições climáticas locais. O refinamento do modelo pode levar a previsões mais precisas da produção de energia e, por consequência, ao dimensionamento adequado de sistemas fotovoltaicos.

5.2.2. Simulação PVSyst – Usina UFERSA

Neste ponto, a simulação será realizada da mesma maneira que no tópico anterior, possibilitando um avanço mais ágil. No entanto, sempre atendendo se aos principais pontos relevantes para esta usina em particular.

O processo de dimensionamento segue o mesmo procedimento, o que torna as telas iniciais sempre semelhantes. Portanto, pode se direcionar nosso foco diretamente para o ponto em que obtivesse os dados finais do dimensionamento. A Figura 32 ilustra essa representação visual de forma mais clara.

Figura 32: Resultado do dimensionamento - UFERSA

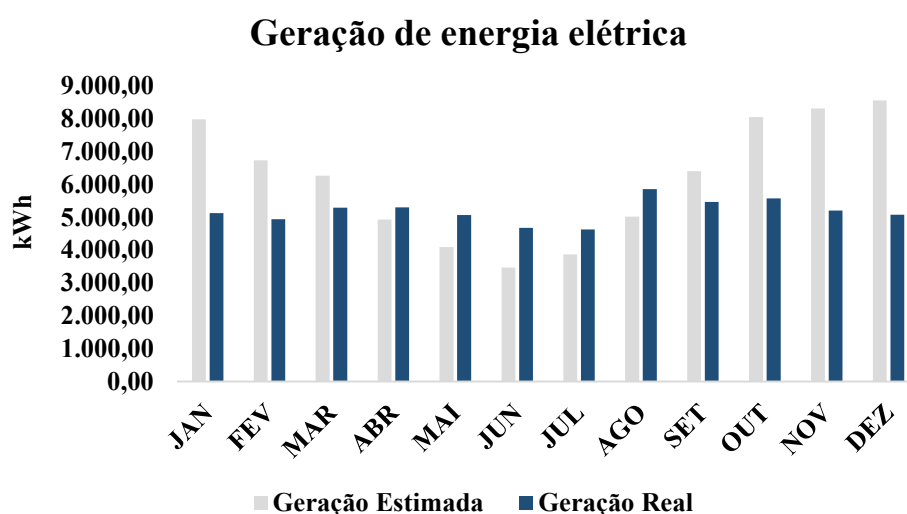


	Gl. horiz. kWh/m².dia	Coll. Plane kWh/m².dia	System output kWh/dia	System output kWh
Jan.	5.50	4.15	131.1	4063
Fev.	5.52	4.64	146.8	4109
Mar.	5.46	5.12	161.7	5014
Abr.	5.20	5.44	172.0	5159
Mai.	5.23	6.09	192.4	5966
Jun.	4.82	5.78	182.6	5478
Jul.	5.33	6.41	202.6	6281
Ago.	5.93	6.58	207.8	6442
Set.	6.21	6.13	193.8	5813
Out.	6.50	5.63	177.9	5514
Nov.	6.31	4.85	153.4	4602
Dez.	5.97	4.35	137.4	4260
Ano	5.67	5.44	171.8	62700

Fonte: Adaptado do *software PVSystem* (2023)

Assim como na simulação anterior, o resultado desta simulação atinge um padrão semelhante. É notável que, nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto do ano, os valores simulados ficaram abaixo dos dados reais, indicando que o modelo pode subestimar a geração de energia em condições específicas de irradiação solar. A representação visual dessas discrepâncias pode ser visualizada na Figura 33.

Figura 33: Geração estimada X real



Fonte: Autoria própria (2023)

5.2.3. Simulação RETScreen expert – Usina residencial

O procedimento para dimensionar no segundo software se deu da mesma forma que a anterior. O objetivo principal é avaliar a eficácia do modelo de usinas no RETScreen e da abordagem utilizada para a produção de energia elétrica. Esses dados foram registrados mensalmente ao longo de um ano. O intuito é detectar semelhanças e diferenças entre os dois conjuntos de informações, oferecendo uma visão sobre a precisão da simulação na representação da geração de energia. A Figura 34 apresenta a tela inicial do software como uma referência visual.

Figura 34: Tela inicial RETScreen



Fonte: Fonte: Adaptado do *software RETScreen* (2023)

Da mesma forma que no programa anterior, o RETScreen também fornece uma representação dos pontos de azimute e alturas dos ângulos e outras informações como temperatura do solo, graus-dias para aquecimento.

Em seguida, seguiu-se ao preenchimento dos dados relacionados à capacidade nominal do sistema. Com base nos dados de localização e irradiação da região, o próprio programa preenche automaticamente as informações referentes à inclinação dos painéis. É necessário apenas selecionar as opções que correspondem às características dos componentes do sistema. A Figura 35 ilustra visualmente o processo descrito.

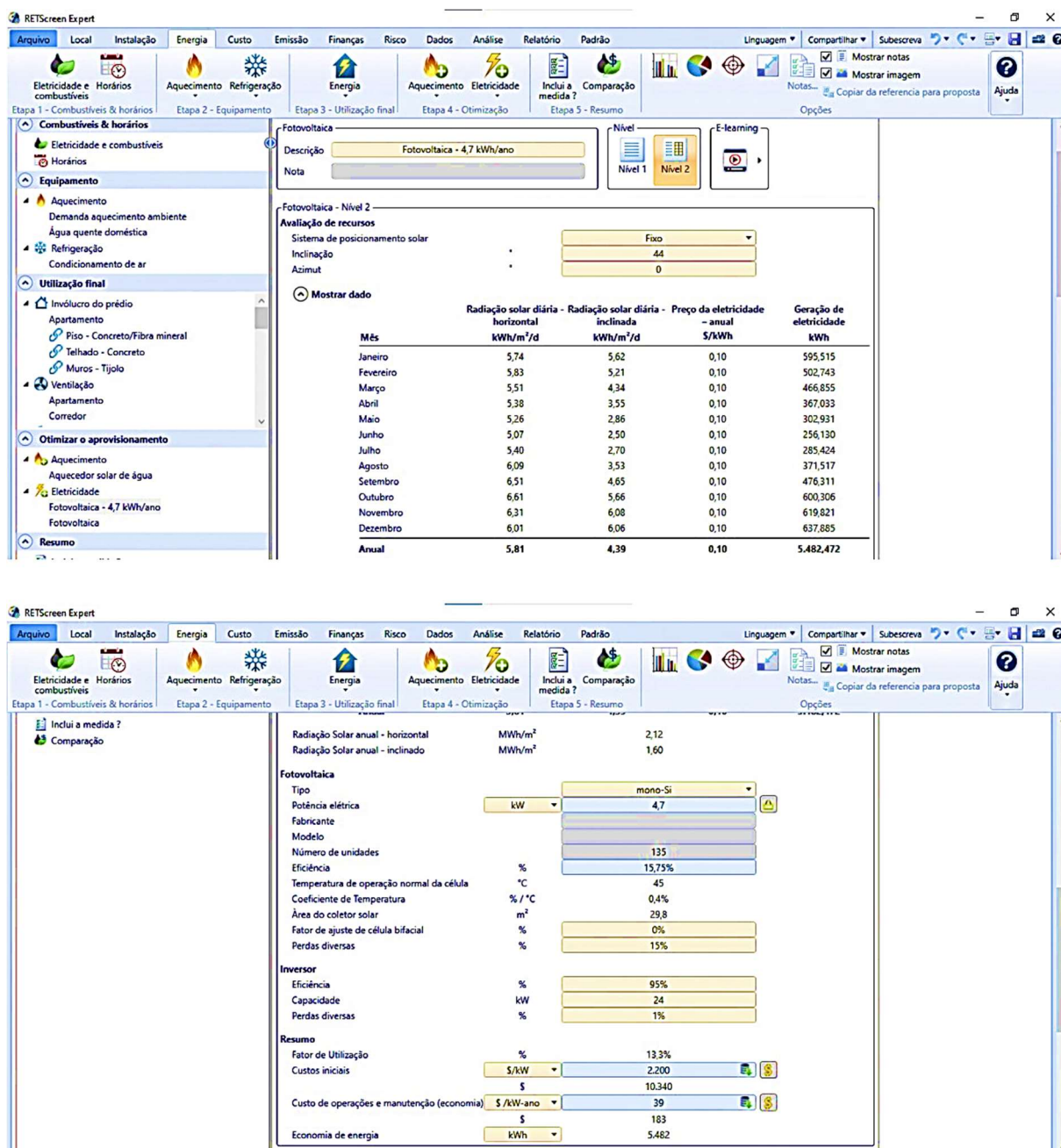
Figura 35: captura de tela – localização e características técnicas - Mossoró



Fonte: Fonte: Adaptado do *software RETScreen* (2023)

Por fim o software fornece, os resultados do dimensionamento de forma mais direta, que o programa anterior. Como mostra a Figura 36.

Figura 36: Capturas da telas - Resultado do dimensionamento - Mossoró

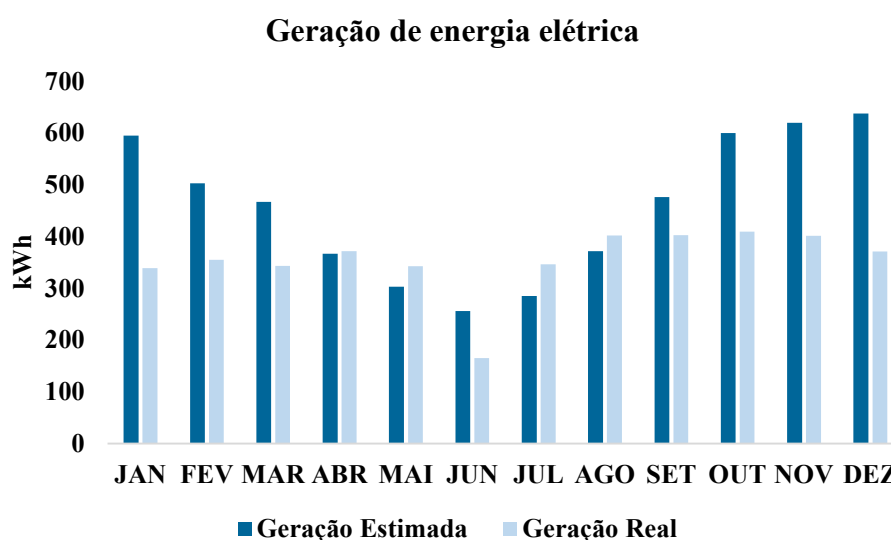


Fonte: Fonte: Adaptado do software RETScreen (2023)

Uma análise dos dados revela que, em geral, a simulação apresenta resultados nem tão próximos bastante próximos aos dados reais, indicando que o modelo utilizado pelo software RETScreen. Observa-se uma queda significativa na geração no meio do ano, tornando os

valores simulados mais próximos dos dados reais, enquanto nos meses de maio, julho e agosto, a geração fica abaixo dos valores reais. Para uma melhor compreensão do que foi mencionado, a Figura 37 apresenta uma comparação visual entre a geração real e simulada.

Figura 37: Geração estimada X Real – Mossoró



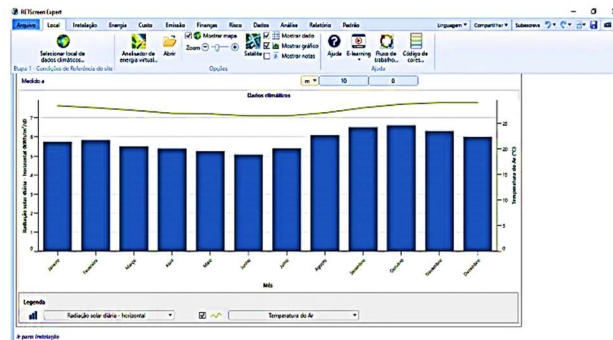
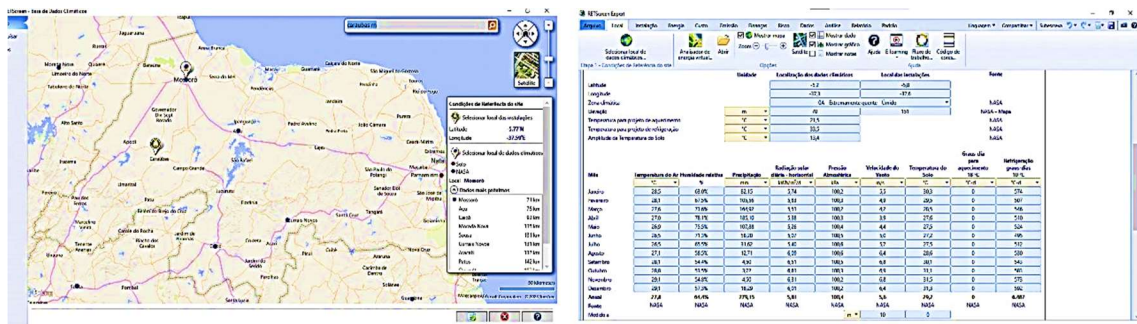
Fonte: Autoria própria (2023)

Essas discrepâncias entre a geração estimada e real ressaltam a importância de ajustar e calibrar o modelo de simulação para refletir com maior precisão as condições locais específicas. Fatores como inclinação dos painéis solares, eficiência dos inversores e condições climáticas podem influenciar significativamente os resultados. Portanto, o aperfeiçoamento do modelo é crucial para obter previsões mais confiáveis da produção de energia e, consequentemente, para o dimensionamento adequado de sistemas fotovoltaicos.

5.2.4. Simulação RETScreen expert – Usina UFERSA

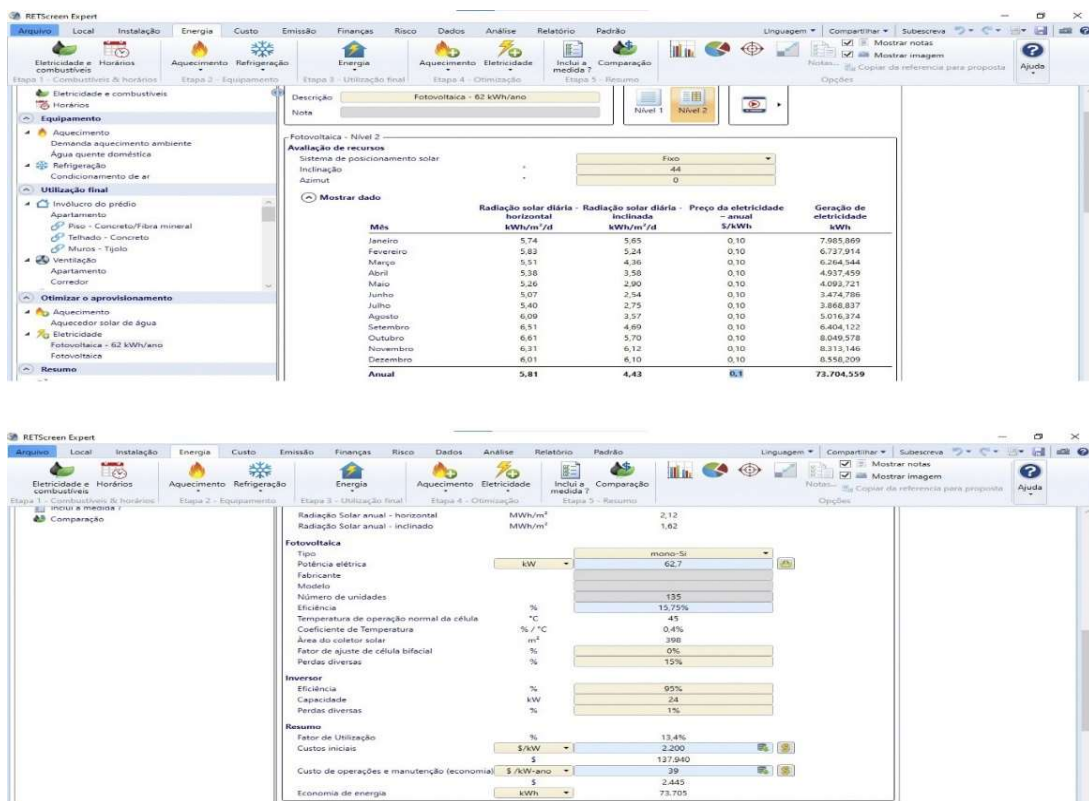
Neste momento, a simulação seguirá um procedimento semelhante ao abordado no tópico anterior, o que facilitará o progresso mais eficiente. O processo de dimensionamento continua a seguir o mesmo procedimento, mantendo as telas iniciais consistentes em sua aparência. Portanto, pode se concentrar nossa atenção diretamente no ponto em que objetivou se os resultados finais do dimensionamento. Na Figura 38 e 39, representa visualmente o que foi mencionado.

Figura 38: captura de tela – localização e características técnicas - Caraúbas



Fonte: Fonte: Adaptado do software RETScreen (2023)

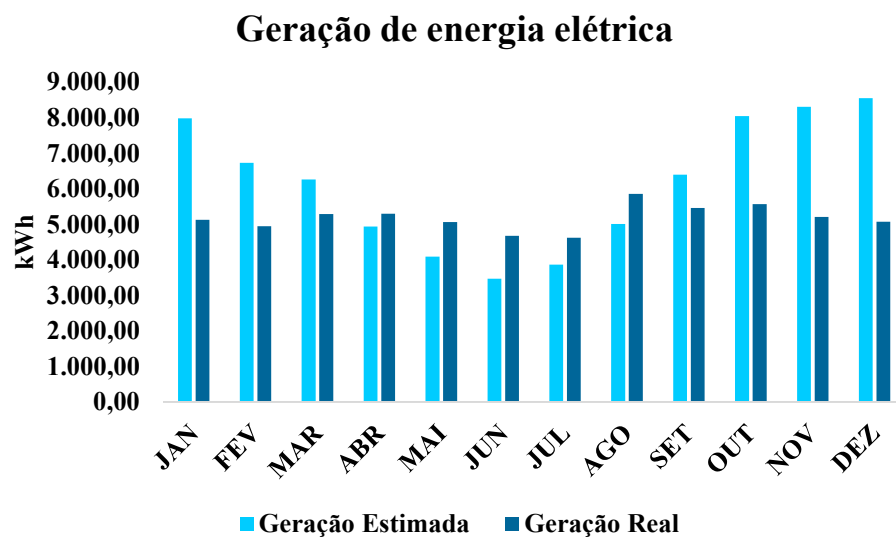
Figura 39: Capturas das telas - Resultado do dimensionamento - Caraúbas



Fonte: Fonte: Adaptado do software RETScreen (2023)

Uma análise dos dados revela que, de forma geral, a simulação apresenta resultados bastante próximos aos dados reais, sugerindo que o modelo utilizado pelo software RETScreen é tão eficaz quanto esperado. No entanto, observa-se uma queda significativa na geração no meio do ano, o que torna os valores simulados mais próximos dos dados reais, enquanto nos meses de maio, julho e agosto, a geração fica abaixo dos valores reais. Para uma melhor compreensão do que foi mencionado, a Figura 40 oferece uma comparação visual entre a geração real e a simulada.

Figura 40: Geração estimada X Real - Usina UFERSA



Fonte: Autoria própria (2023)

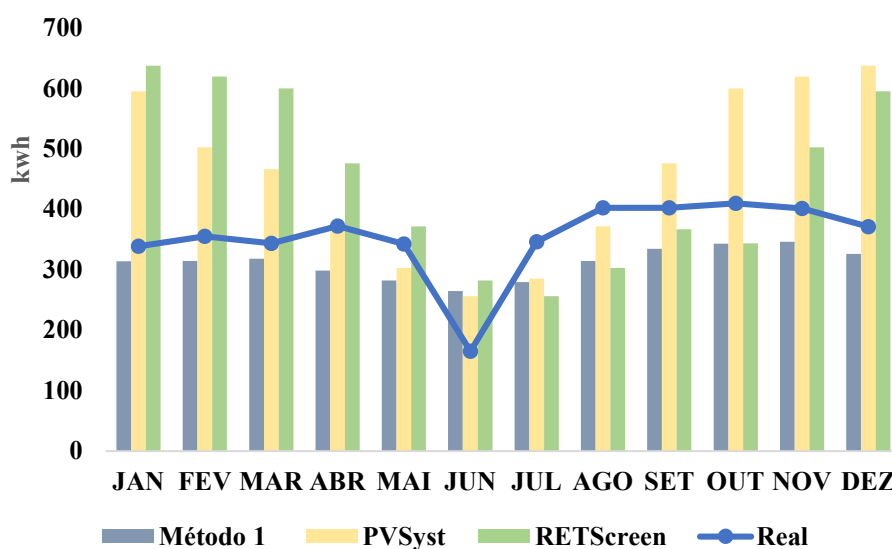
5.3 Comparativos entre metodologias

Nas figuras 41 e 42, apresenta-se uma análise detalhada das duas abordagens utilizadas para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, com o objetivo de otimizar a geração de energia solar. As duas metodologias em foco incluem uma abordagem baseada em equacionamentos com base na irradiação solar e uma segunda abordagem que se vale de simulações de software.

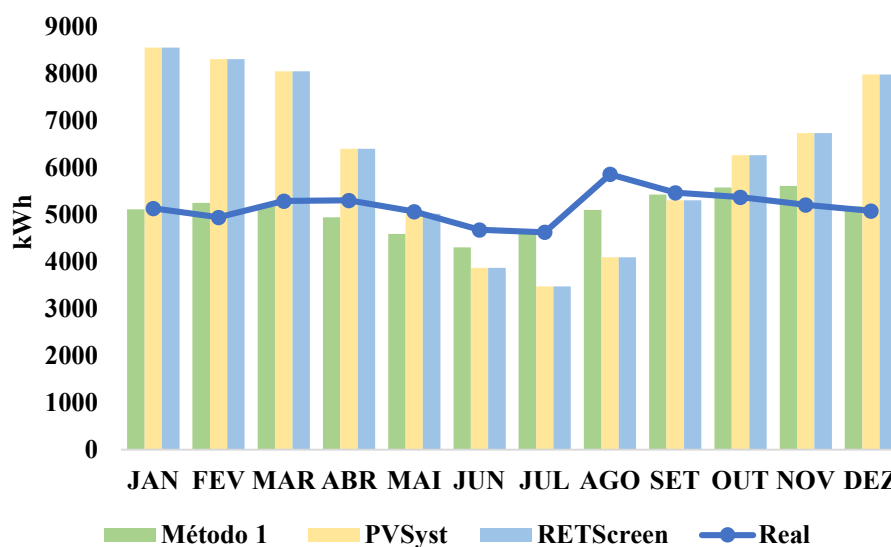
A Metodologia 1 baseia-se na estimativa teórica da geração de energia com base na irradiação solar. Observa-se que, ao longo do tempo, essa metodologia manteve-se consistentemente próxima da linha de referência que representa a geração real de energia solar. No entanto, é importante ressaltar que, em nenhum momento, ultrapassou essa linha. Isso indica que, embora essa abordagem seja confiável, não foi possível gerar mais energia do que o consumo real.

A Metodologia 2 emprega simulações de software para estimar a produção de energia solar. Os resultados obtidos com essa abordagem frequentemente ultrapassaram a linha de referência que representa a geração real. Esse fenômeno é altamente satisfatório, uma vez que demonstra a capacidade da Metodologia 2 em gerar consistentemente mais energia do que o consumo. Isso é crucial para alcançar a autossuficiência energética e, eventualmente, contribuir para a redução dos custos de energia.

Figura 41: Comparativo entre metodologias - usina Mossoró



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 42: Comparativo entre metodologias – Usina Caraúbas

Fonte: Autoria própria (2023)

Ao comparar esses dois métodos, fica evidente que a Metodologia 2, baseada em simulações de software, oferece uma vantagem significativa em termos de geração de energia solar excedente. Isso abre possibilidades para a venda de energia excedente de volta à rede ou para o armazenamento de energia para uso posterior.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias utilizadas foram cuidadosamente separadas, considerando as vantagens que cada uma pode oferecer aos usuários. Os resultados da estimativa de geração de energia fotovoltaica, baseados na insolação média da região e nas especificações dos módulos, revelaram-se altamente precisos no caso da usina de maior porte, o que difere se comparado a usina de menor porte. Isso indica que o modelo de equacionamento empregado é eficaz na previsão da produção de energia na maioria dos meses, acompanhando de perto a realidade da geração. Porém, carece de adaptações e aperfeiçoamento para atender todos os tipos de usina.

Essa precisão buscada desempenha um papel fundamental no dimensionamento adequado dos sistemas fotovoltaicos, garantindo que atendam às necessidades dos consumidores. Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para avaliar a metodologia utilizada no dimensionamento desses sistemas. Entretanto, é crucial ressaltar que os projetos devem considerar não apenas os dados médios, mas também as possíveis variações e sazonalidades que podem influenciar a geração de energia ao longo do ano.

Além disso, a constante evolução das tecnologias fotovoltaicas pode impactar positivamente a eficiência e a capacidade dos módulos. Portanto, é essencial acompanhar de perto essas inovações para garantir um desempenho consistente e maximizar os benefícios dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

No que diz respeito aos *softwares* utilizados, é importante destacar que o *PVSyst* oferece uma ampla gama de funcionalidades para o dimensionamento e avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos. Sua eficácia depende principalmente da orientação, localização meteorológica e dos componentes do sistema. O *software* realiza uma análise abrangente do desempenho dos sistemas, levando em consideração fatores como sombreamento e perdas durante a operação. Essas perdas podem ser minimizadas por meio de um planejamento cuidadoso e otimização dos componentes do sistema.

Além disso, o *PVSyst* possui uma estrutura versátil que o torna adequado para a implantação de novos projetos em diversas áreas. Ele fornece informações gráficas sobre a produção de energia, incluindo sua distribuição diária, mensal e anual. Isso oferece flexibilidade aos usuários, permitindo que adaptem o software de acordo com suas necessidades e objetivos finais de projeto.

Por outro lado, o *RETScreen Expert* tem um enfoque diferente em relação ao *PVSyst*. Sua principal finalidade é realizar uma análise mais aprofundada do desempenho financeiro dos projetos, considerando aspectos como *payback* e riscos associados à instalação. Além disso, o

RETScreen Expert permite a comparação eficiente entre diferentes tipos de energias renováveis e não-renováveis, ajudando na tomada de decisões sustentáveis.

No contexto deste trabalho, ambas

as metodologias aplicadas atenderam às expectativas. O método de equacionamento com base na insolação média se mostrou eficaz para o estudo realizado diante das ressalvas feitas. No entanto, o *software* que se destacou como mais adequado ficando mais próximo a realidade para o autor foi o *PVSyst*, devido à sua análise abrangente de dimensionamento e desempenho, fornecendo resultados confiáveis em cada etapa do projeto

Por fim, é importante ressaltar que o potencial de geração de energia a partir de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica se mostrou promissor. Isso se deve, em grande parte, aos elevados índices de radiação solar no Brasil e às inovações tecnológicas que aumentaram a eficiência dos módulos de geração.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Resolução Normativa Nº 482/2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

BARBOSA W., AZEVEDO A., 2013, **Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens**. Artigo apresentado no Segundo Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia. Acesso em 24/08/2023.

BESSO R., 2017, **Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede – Estudo de Caso no Centro de Tecnologia da UFRJ**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da UFRJ.

CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, 2004. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.

CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. (2006). **"Energia Solar - Princípio e Aplicações."** Rio de Janeiro: CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.

CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. (2014). **"Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos."** Rio de Janeiro: CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.

CHAMMA B. C. (2017). **"Projeto de uma Microgeração Fotovoltaica Aplicada a uma Residência."** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da UFRJ.

COGEN - Associação da Indústria de Cogeração de Energia. **"Geração Distribuída – Novo Ciclo de Desenvolvimento."** Acesso em 26/08/2023. Disponível em: http://www.cogen.com.br/workshop/2013/Geracao_Distribuida_Calabro_22052013.pdf.

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária, Ministério da Fazenda. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/>, acessado em 12/07/2023.

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária, Ministério da Fazenda. "**Convênio 101/1997.**" Acessado em 13/07/2023.

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária, Ministério da Fazenda. "**Convênio 06/2013.**" Acessado em 13/07/2023.

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária, Ministério da Fazenda. "**Convênio 16/2015.**" Acessado em 13/07/2023.

CPTEC – Glossário de Termos Técnicos em Radiação Atmosférica. Acessado em 15/09/2023. Disponível em: http://pyata.cptec.inpe.br/radiacao/glossar/gloss_fo.htm

Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf

EPE – Empresa de Planejamento Energético. "**Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica / Mauricio Tiomno Tolmasquim.**" EPE: Rio de Janeiro, 2016.

FARMER, J. D., LAFOND F. (2015). "**How Predictable is Technological Progress.**" **Research Policy, Volume 45.**

Greener Consultoria. (2022). "**Análise Estratégica do Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída 2º Semestre 2022.**" Acesso em: 03/07/2023. Disponível em: <http://www.greener.com.br/analise-estrategica-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-2o-semester2022/>

IDEC – Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor. Acesso em 09/07/2023. Disponível em: <http://www.idec.org.br/consultas/dicas-e-direitos/conheca-o-papel-das-agencias-reguladoras>

IEA: International Energy Agency. (2010). "**World Energy Outlook 2010.**" OECD/IEA, Paris, França.

IEA: International Energy Agency. (2011). **"Solar Energy Perspectives."** OECD/IEA, Paris, França.

IEA: International Energy Agency. (2014). **"Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy."** OECD/IEA, Paris, França.

IEA: International Energy Agency. (2017). **"Getting Wind and Sun into the Grid."** OECD/IEA, Paris, França.

INEE – Instituto Nacional de eficiência energética. **"Notas sobre Geração Distribuída."** Acesso em 26/08/2023. Disponível em: <http://www.inee.org.br/download/forum/Notas%20sobre%20GD.pdf>.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). **"The Climate System: an Overview, The Scientific Basis."** Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). **"Adoption of the Paris Agreement."** Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, Paris, 30 de novembro a 11 de dezembro de 2015.

NEOSOLAR, 2016, **"Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes"**. Disponível em: Acesso em: 17/09/2023.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A., 2014, **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar–GTES. Rio de Janeiro.

RUTHER, R., 1999, **"Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e O Trabalho do Labsolar nesta Área"**. LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar, v. 1, p. 9-26. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC.

VILLALVA, G. M., GAZOLI, J. R., 2015, **Energia solar fotovoltaica; conceitos e aplicações**, 2ª Edição. Editora Érica Ltda. São Paulo.