

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS, CAMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



Gabriel Oliveira Barbosa

**Análise Comparativa dos Indicadores de Desempenho em Sistemas
Fotovoltaicos Conectados à Rede**

**ITUMBIARA/GO
2026**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gabriel Oliveira Barbosa

Matrícula: 20142040070205

Título do Trabalho: Análise Comparativa dos Indicadores de Desempenho em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 04/02/2026.

Local Data



Documento assinado digitalmente

GABRIEL OLIVEIRA BARBOSA

Data: 04/02/2026 10:40:00-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Gabriel Oliveira Barbosa

Análise Comparativa dos Indicadores de Desempenho em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Trabalho de conclusão de curso apresentado a banca avaliadora, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Orientador: Prof.^a Thaissa de Melo Cesar

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B238a Barbosa, Gabriel Oliveira
 Análise comparativa dos indicadores de desempenho em sistemas fotovoltaicos
 conectados à rede. / Gabriel Oliveira Barbosa. – Itumbiara, 2026.
 78 p. : il.

 Trabalho de conclusão do curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) -
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara,
 2026.
 Orientadora: Prof^a. Ma. Thaissa de Melo César.

 1. Energia solar. 2. Sistema de energia fotovoltaica. 3. Eficiência industrial. I.
 Título. II. César, Thaissa de Melo. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e
 Tecnologia de Goiás.

CDD 621.47

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus
Itumbiara Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima
CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Gabriel Oliveira Barbosa

Análise Comparativa dos Indicadores de Desempenho em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 29 de janeiro de 2026, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. MSc. Thaissa de Melo Cesar - Orientadora

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. DSc. Victor Regis Bernadeli - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. DSc. Marcos Antônio Arantes de Freitas - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

2026

Documento assinado eletronicamente por:

- **Victor Regis Bernardeli**, CHEFE - CD4 - ITU-DAA, em 02/02/2026 15:42:03.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/02/2026 15:22:28.
- **Thaissa de Melo Cesar**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/02/2026 15:20:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/01/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 740364

Código de Autenticação: d1801fca99



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

Dedico está monografia a minha família, meus pais e meus irmãos, os quais sempre estiveram do meu lado me dando apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de dedicar este trabalho à minha família, em especial meus pais, Gilberto de Oliveira e Maria Deuserina, cujo amor, apoio e incentivo foram a força motriz por trás de cada passo nesta jornada. Obrigado por acreditarem em mim, por me inspirarem a perseguir meus objetivos e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, agradeço a parceria, a colaboração, e pelos inúmeros momentos de aprendizado compartilhados. Todos esses momentos ajudaram a tornar possível atravessar por todos os desafios enfrentados na graduação, e cada conquista alcançada foi mais significativa na companhia de vocês.

Agradeço também ao Instituto Federal, Campus Itumbiara, e a todos os professores da instituição, que contribuíram para a minha formação acadêmica dentro e fora de sala de aula, compartilhando conhecimento, experiência, e inspirando a evolução intelectual e pensamento crítico.

*"A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original."*

Albert Einstein

RESUMO

Avaliações precisas e consistentes do desempenho dos sistemas fotovoltaicos são essenciais para o desenvolvimento contínuo do setor elétrico e para o mercado de energia renovável de um país. Os resultados obtidos nesse estudo visam fomentar o desenvolvimento e a confiabilidade do setor, assim como gerar ferramentas para orientar decisões do mercado e identificar necessidades futuras. É mediante pesquisas de qualidade e desempenho que se obtêm indicativos acerca da configuração ideal de um sistema fotovoltaico, e alerta quanto à correta instalação e manutenção dos sistemas. De maneira geral, o trabalho busca diminuir as perdas provocadas por mau dimensionamento, instalação ou manutenção das usinas solares, assim como normalizar parâmetros de desempenho médio para a região. Com esse intuito, o trabalho aborda a análise e comparação dos índices de desempenho de cinco sistemas fotovoltaicos conectados à rede, instalados nas cidades de Itumbiara, Aparecida de Goiânia, Araporã e Cachoeira Dourada. São três sistemas fotovoltaicos com potência CA de 20 kW, e outras duas usinas com potência CA de aproximadamente 33 kW. Devido à grande variação nas características dos sistemas fotovoltaicos estudados, em relação a configuração, tecnologia e localização geográfica, se faz necessário o uso de indicadores normalizados, que possibilitam a comparação dos sistemas. Portanto, foram escolhidos alguns dos principais indicadores, como taxa de desempenho, fator capacidade, rendimentos de referência e específico, e eficiência global do sistema. Os dados dos sistemas foram obtidos por meio do monitoramento disponibilizado através do aplicativo do fabricante, enquanto as informações da configuração da usina foram fornecidas pela empresa responsável pelo dimensionamento, instalação e manutenção das mesmas.

Palavras chaves:

Energia Solar Fotovoltaica, Sistemas Fotovoltaicos, Eficiência, Índices de Desempenho.

ABSTRACT

Accurate and consistent assessments of photovoltaic system performance are essential for the continued development of a country's electricity sector and renewable energy market. The results obtained in this study aim to foster the development and reliability of the sector, as well as generate tools to guide market decisions and identify future needs. It is through quality and performance research that indicators are obtained regarding the ideal configuration of a photovoltaic system, and alerts are given regarding the correct installation and maintenance of the systems. In general, the work seeks to reduce losses caused by poor sizing, installation, or maintenance of solar plants, as well as to standardize average performance parameters for the region. To this end, the study analyzes and compares the performance indices of five grid-connected photovoltaic systems installed in the cities of Itumbiara, Aparecida de Goiânia, Araporã, and Cachoeira Dourada. There are three photovoltaic systems with an AC power of 20 kW and two other plants with an AC power of approximately 33 kW. Due to the significant variation in the characteristics of the studied photovoltaic systems, in terms of configuration, technology, and geographical location, the use of dimensionless indicators is necessary, which enable the comparison of the systems. Therefore, some of the main indicators were chosen, such as performance ratio, capacity factor, reference and specific yields, and overall system efficiency. The system data were obtained thru monitoring provided by the manufacturer's app, while the information on the plant's configuration was supplied by the company responsible for its sizing, installation, and maintenance.

Keywords:

Photovoltaic Solar Energy, Photovoltaic Systems, Efficiency, Performance Indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Síntese dos níveis de irradiação solar por região	19
Figura 2 – Comparativo das médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa (kWh/m ² . dia)	20
Figura 3 - Países que mais acrescentaram energia solar em 2022	20
Figura 4 - Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes	28
Figura 5 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício	30
Figura 6 - Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica sob condições padrão de ensaio	32
Figura 7 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C.....	34
Figura 8 – Influência da variação temperatura na célula fotovoltaica (para irradiância de 1 kW/m ²).....	34
Figura 9 – Imagem aérea do SFCR 1	44
Figura 10 – Imagem aérea do SFCR 2	46
Figura 11 – Imagem aérea do SFCR 3	49
Figura 12 – Imagem aérea do SFCR 4	51
Figura 13 – Imagem aérea do SFCR 5	54
Figura 14 - Irradiação Solar Diária no plano de cada SFCR	59
Figura 15 - Gráfico de irradiação solar no plano inclinado dos SFCR 1, 2 e 3.....	63
Figura 16 - Gráfico de geração dos SFCR 1, 2 e 3	64
Figura 17 - Gráfico da taxa de desempenho dos SFCR 1,2 e 3.....	65
Figura 18 - Gráfico do fator capacidade dos SFCR 1, 2 e 3.....	65
Figura 19 - Gráfico do rendimento específico dos SFCR 1, 2 e 3	66
Figura 20 - Gráfico da eficiência do sistema dos SFCR 1, 2 e 3.....	67
Figura 21 - Gráfico da irradiação solar no plano inclinado dos SFCR 4 e 5.....	69
Figura 22 - Gráfico da geração dos SFCR 4 e 5	69
Figura 23 - Gráfico da taxa de desempenhos dos SFCR 4 e 5.....	70
Figura 24 - Gráfico do fator capacidade dos SFCR 4 e 5.....	71
Figura 25 - Gráfico do rendimento específico dos SFCR 4 e 5	71
Figura 26 - Gráfico da eficiência do sistema dos SFCR 4 e 5.....	72
Figura 27 - Irradiação solar média estimada durante as estações do ano	73
Figura 28 - Gráfico do rendimento referência de todos os SFCR.....	74
Figura 29 - Gráfico do rendimento específico de todos os SFCR	75
Figura 30 - Gráfico da taxa de desempenho de todos os SFCR.....	76
Figura 31 - Gráfico do fator capacidade de todos os SFCR.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eficiência das células fotovoltaicas por tecnologia.....	27
Tabela 2 – Resumo dos sistemas fotovoltaicos em estudo.....	43
Tabela 3 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 1.....	45
Tabela 4 – Especificações do inversor do SFCR 1	45
Tabela 5 – Geração mensal do SFCR 1	46
Tabela 6 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 2.....	47
Tabela 7 – Especificações do inversor do SFCR 2	47
Tabela 8 – Geração mensal do SFCR 2	48
Tabela 9 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 3.....	50
Tabela 10 – Especificações do inversor do SFCR 3	50
Tabela 11 – Geração mensal do SFCR 3	51
Tabela 12 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 4.....	52
Tabela 13 – Especificações do inversor do SFCR 4	53
Tabela 14 – Geração mensal do SFCR 4	53
Tabela 15 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 5.....	54
Tabela 16 – Especificações do inversor do SFCR 5	55
Tabela 17 – Geração mensal do SFCR 5	56
Tabela 18 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Araporã-MG.....	56
Tabela 19 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Itumbiara-GO.....	57
Tabela 20 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Aparecida de Goiânia-GO	57
Tabela 21 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Cachoeira Dourada-GO	58
Tabela 22 – Irradiação solar mensal efetiva na inclinação dos sistemas fotovoltaicos	58
Tabela 23 - Resumo dos SFCR referentes à análise 1	62
Tabela 24 - Resumo dos SFCR referentes à análise 2	68
Tabela 25 - Resumo dos SFCR referentes à análise 3	73
Tabela 26 - Tabela do rendimento de referência de todos os SFCR	75
Tabela 27 - Médias dos indicadores de cada SFCR	77

LISTA DE ABREVIATURAS

FV	Fotovoltaico
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
BEN	Balanço Energético Nacional
Mtep	Tonelada equivalente de petróleo
PDE	Plano Decenal de Expansão
SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema
MME	Ministério de Minas e Energia
IEA	Agência Internacional de Energia
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
CELA	Clean Energy Latin America
GD	Geração Distribuída
GC	Geração Centralizada
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
REN	Resolução Normativa
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
HSP	Horas Sol Pleno
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito
FDI	Fator de Dimensionamento
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
LABSOL	Laboratório de Energia Solar
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LSF

Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	18
1.1.1 Pioneiros da Geração Solar Fotovoltaica no Brasil	22
1.1.2 Regulamentação da Geração Distribuída no Brasil.....	23
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO	24
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	24
1.2.2 Objetivos Específicos	25
1.3 JUSTIFICATIVA.....	25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2. FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	27
2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO	28
2.1.1 Curva Característica.....	31
2.1.2 Resistências Série e Paralelo.....	32
2.1.3 Associações de Módulos.....	33
2.1.4 Parâmetros Externos.....	33
2.2 COMPONENTES ESSENCIAIS.....	35
2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA	36
2.5 LEVANTAMENTO DO RECURSO SOLAR.....	36
3. INDICADORES DE DESEMPENHO.....	38
3.2 EFICIÊNCIA DO SISTEMA (η)	39
3.2 RENDIMENTO ESPECÍFICO (Y_f)	39
3.3 RENDIMENTO DE REFERÊNCIA (Y_r).....	39
3.4 TAXA DE DESEMPENHO (PR).....	40
3.5 FATOR CAPACIDADE (FC).....	40
4. METODOLOGIA	42
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS EM ESTUDO	42
4.1.1 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 1 (SFCR 1)	44
4.1.2 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 2 (SFCR 2)	46
4.1.3 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 3 (SFCR 3)	49
4.1.4 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 4 (SFCR 4)	51
4.1.5 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 5 (SFCR 5)	54

4.2 CORREÇÃO DA IRRADIAÇÃO INCLINADA	56
5. AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO	60
5.1 ANÁLISES COMPARATIVAS	62
5.1.1 Análise Comparativa 1	62
5.1.2 Análise Comparativa 2	68
5.1.3 Análise Comparativa 3	73
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERÊNCIAS.....	79

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um ingrediente fundamental e indispensável para o desenvolvimento tecnológico de um país, e para a qualidade de vida de seus cidadãos. Ela está enraizada em quase todas as atividades realizadas pelo ser humano, como trabalho, comodidade, conforto, lazer, comércios, indústria e, em alguns casos, deslocamento.

A quantidade de energia elétrica faturada a um consumidor está diretamente ligada à qualidade de vida e conforto que o mesmo dispõe no seu dia a dia. Quanto mais altos forem os padrões de vida de um cidadão, maior será o seu consumo. Até mesmo as práticas consumistas da sociedade, impulsionadas pelas propagandas dos grandes canais de mídia, contribuem para o aumento do consumo de energia elétrica. Juntando esses fatores ao constante crescimento populacional em todo o mundo, desencadeia-se um aumento alarmante no consumo de energia elétrica. Como consequência desse crescimento desenfreado, surgem diversos debates para discutir a energia utilizada, dentre eles o questionamento dos impactos das fontes de geração dessa energia.

A queima de combustíveis fósseis, utilizada na geração de energia elétrica em grande parte do mundo, tem causado uma série de problemas ambientais, como mudanças climáticas, aquecimento global, poluição do ar, chuva ácida, etc. Além dos efeitos negativos gerados ao planeta pela queima desses combustíveis, e as pressões para redução da emissão de gases poluentes por entidades como a ONU, por ser uma fonte finita, ainda existe uma preocupação quanto ao risco de escassez de suas reservas. Como consequência desses fatores, se intensifica a necessidade de estudar e desenvolver tecnologias que possam gerar energia de forma mais limpa e renovável para lidar com tais desafios. Nesse quesito a matriz energética brasileira é destaque no mundo, pois possui uma proporção favorável pela utilização das fontes renováveis em oposição as poluente.

A EPE, Empresa de Pesquisa Energética, elabora e publica anualmente o Balanço Energético Nacional, que tem por finalidade apresentar a contabilização relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil. No relatório síntese do BEN de 2023, que tem 2022 como ano base, revela que em 2022 a oferta interna de energia elétrica teve um crescimento de 10,9TWh, em relação a 2021, e que a participação

das fontes renováveis na matriz ficou em 87,9%. O setor elétrico brasileiro emitiu, em média, apenas 61,7kg CO₂ para produzir 1MWh, um índice muito baixo quando se estabelece comparações com Europa, EUA e China. (BEN 2023, 2024)

O Plano Decenal de Expansão 2024 (PDE 2024) adotou como uma das principais diretrizes a priorização da participação de fontes renováveis para atender ao crescimento do consumo de energia elétrica no horizonte decenal, compatibilizando esta participação com o atendimento à carga de forma segura e tendo em vista o compromisso brasileiro de manter seu crescimento econômico apoiado em uma matriz energética limpa (TOLMASQUIM, 2016).

Grande parte da energia que abastece o Brasil, incluindo a parcela de Itaipu vendida pelo Paraguai, é proveniente de hidroelétricas. Esse tipo de energia depende diretamente de condições climáticas, podendo ser maior ou menor em função da disponibilidade do recurso no ano. Em longos períodos de seca, são necessários racionamentos e até mesmo complementações de usinas termelétricas, que necessitam de combustíveis fósseis para gerar energia e são altamente onerosas. Exemplos desse problema foram os racionamentos em 2001, e o triênio de 2013 a 2015, quando as condições hidrológicas estavam desfavoráveis, e houve uma maior participação da geração termelétrica para atender a demanda de consumo no Brasil.

Para complementar a matriz e atender ao crescimento no consumo de energia de forma segura, econômica e sustentável, o Brasil dispõe de grande potencial para fontes renováveis como a energia eólica e a energia solar. Esses sistemas são considerados como pilares da energia renovável, porém possuem baixa confiabilidade em termos de estabilidade do fornecimento de energia, uma vez que são fortemente dependentes das condições meteorológicas como irradiação solar e velocidade do vento, além de não serem despacháveis quando necessário. Porém, a flexibilidade operativa e a capacidade de armazenamento das usinas hidrelétricas viabilizam a penetração dessas fontes intermitentes, pois operando de forma interligada e combinada, conforme o melhor aproveitamento das características climáticas ofertadas em cada região do país, se justifica o investimento para uma matriz energética diversificada, sendo esse o melhor cenário para um sistema elétrico confiável e de baixo impacto ambiental.

Neste sentido, a geração solar fotovoltaica pode ser considerada também como uma medida de preservação de energia, uma vez que os geradores solares espalhados pelos solos e telhados de todo o país podem contribuir para economizar

água nas barragens das usinas hidrelétricas, aumentando a robustez e confiabilidade do sistema elétrico nacional.

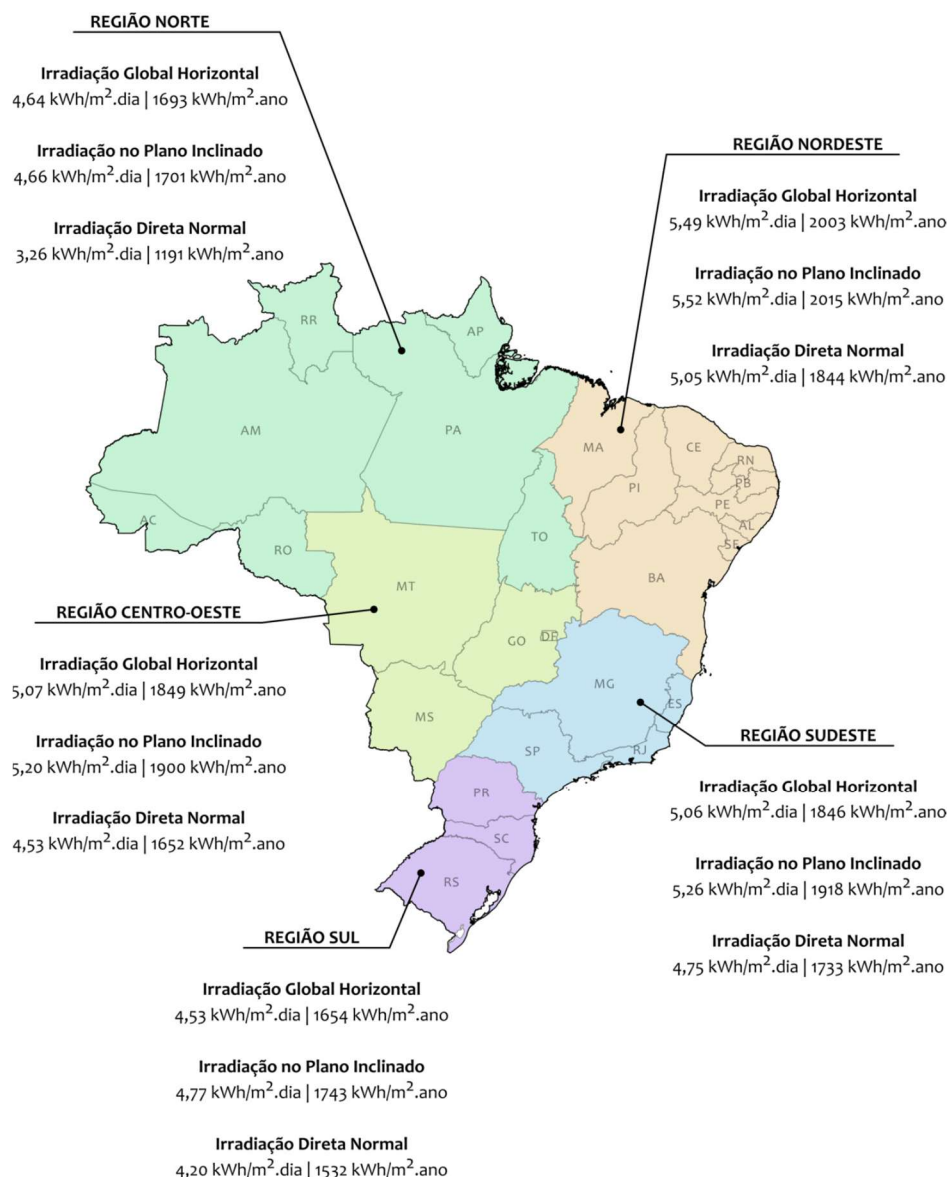
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sem peças móveis, com manutenção mínima, sem produzir ruídos ou qualquer poluição, e utilizando a energia praticamente inesgotável do sol, as usinas solares conectadas à rede vem crescendo em importância em todo mundo (PEREIRA et al, 2017). O maior problema da energia solar fotovoltaica é o custo inicial, relativamente elevado, associado à aquisição da pequena usina. Mas já existem iniciativas como o financiamento e redução de impostos dos componentes, que podem colaborar com a maior disseminação dos sistemas, fazendo com que os clientes instalem sistemas em seus telhados e usem a economia dos mesmos para pagar os custos da instalação.

Os índices de irradiação solar no Brasil se apresentam como um dos maiores no mundo, podendo ser descritos como uniformemente distribuídos e com pequena variabilidade anual, comparados com o que se observa em países onde a tecnologia já está bem estabelecida como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França.

A figura abaixo, retirada da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, edição de 2017, apresenta os valores médio anual do total diário de irradiação solar para as cinco regiões brasileiras. A média espacial da irradiação acumulada ao longo do ano também é apresentada abaixo. Nela podemos observar que os valores médios em todo o território são favoráveis para a geração solar, tendo a região nordeste como a melhor entre as demais.

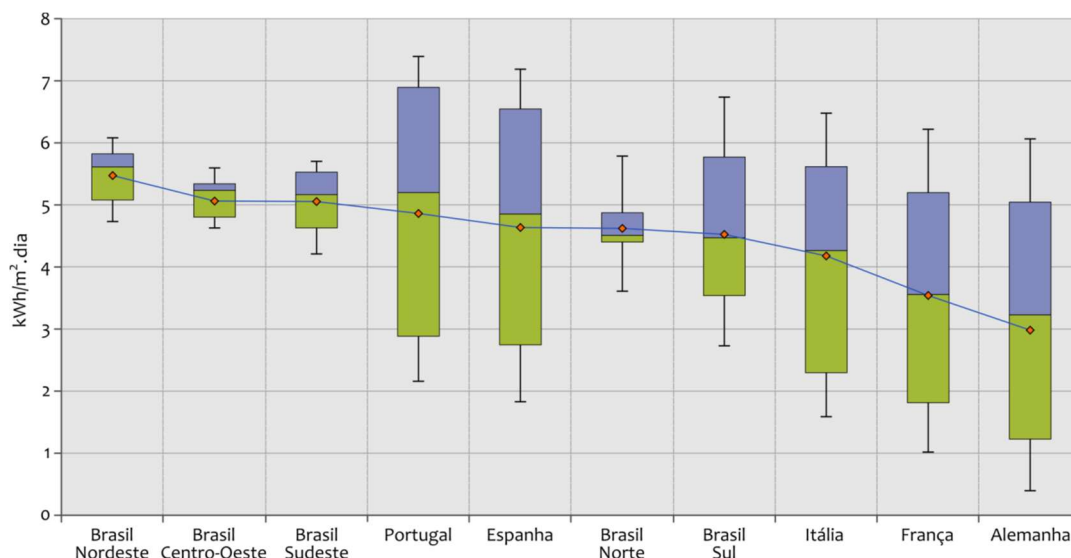
Figura 1 – Síntese dos níveis de irradiação solar por região



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª edição (PEREIRA et al., 2017).

Em uma comparação mais direta, a figura abaixo mostra a superioridade do Brasil para a geração solar fotovoltaica, em relação aos países europeus, com níveis bastante elevados de irradiação solar com uma variabilidade mensal muito mais baixa. A comparação é feita na forma de box-plot, com as caixas representando 50% dos valores, as linhas verticais os valores máximos e mínimos, e os losangos vermelhos as médias. A região nordeste do Brasil supera até mesmo os países ibéricos, enquanto a região sul apresenta características mais similares às encontradas nesses países europeus. (PEREIRA et al., 2017)

Figura 2 – Comparativo das médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa (kWh/m². dia)



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª edição (PEREIRA et al., 2017).

A partir dessa imagem é possível compreender a vantagem que o Brasil possui para implementação e desenvolvimento da energia solar fotovoltaica em relação a maioria dos demais países do mundo. Porém, mesmo com essa vantagem geográfica, o país ainda está atrás de vários países europeus.

O Brasil foi o 4º país que mais acrescentou energia solar no mundo em 2022, com 9,9 GW de potência, segundo levantamento divulgado pela IEA (Agência Internacional de Energia). Em todo o mundo, a fonte fotovoltaica cresceu 240 GW ao longo do ano, atingindo a marca dos 1,2 TW de capacidade global acumulada. A figura abaixo mostra os resultados obtidos pelos 10 países, e adiciona a União Europeia, que juntos acumularam 39GW de potência instalada. (HEIN, 2023)

Figura 3 - Países que mais acrescentaram energia solar em 2022

1		China	106 GW
(2)		European Union	38,7 GW
2		USA	18,6 GW
3		India	18,1 GW
4		Brazil	9,9 GW
5		Spain	8,1 GW
6		Germany	7,5 GW
7		Japan	6,5 GW
8		Poland	4,9 GW
9		Australia	3,9 GW
10		Netherlands	3,9 GW

Fonte: Canal Solar (HEIN, 2023)

Além de ter sido o quarto país que mais acrescentou energia solar no ano de 2022 de acordo com a IEA, o Brasil também atingiu a oitava colocação no ranking mundial de maior capacidade operacional da IRENA, Agência Internacional de Energia Renovável, estando apenas em décimo quarto no ano anterior. Superando assim países como Espanha, Grã-Bretanha, Holanda, França, Vietnã e Coreia do Sul.

Os dados levantados pela CELA, Clean Energy Latin America, mostram que o volume de financiamentos para sistemas de energia solar em 2022 superou a marca de 35,1 bilhões de reais, aumento de 78% em relação aos R\$ 19,7 bilhões em 2021. De acordo com o estudo, o valor dos financiamentos para as usinas de GC (geração centralizada) mais do que dobrou na comparação com os dois períodos analisados, saltando de R\$ 6,7 bilhões em 2021 para R\$ 13,7 bilhões em 2022. Já o aporte para sistemas de GD (geração distribuída) cresceu mais de 60% em 2022, com a injeção de R\$ 21,4 bilhões ante os R\$ 13 bilhões do ano anterior. (HEIN, 2023)

Esse crescimento natural da energia solar no Brasil se dá pelo aumento da confiança do mercado no sistema, as iniciativas de financiamento encontradas em quase todos os grandes bancos, o elevado custo da energia elétrica no país, e pela praticidade da instalação, uma vez que o cidadão pode instalar um sistema solar no telhado já existente em sua casa e assim obter economia no seu consumo durante, aproximadamente, 25 anos. Levando em conta que existem financiamentos em que você usa o valor que pagaria na sua fatura para pagar as parcelas, e, uma vez quitada a dívida do financiamento, nos meses seguintes restariam apenas a economia do sistema instalado.

Outra característica intrínseca e atraente dos sistemas fotovoltaicos é que nos meses do verão, onde a geração é máxima, coincide com os máximos de demanda registrados pelo ONS. Nesse contexto, a geração solar fotovoltaica tem um grande potencial de contribuição para a redução dos picos de demanda do SIN. Pois os efeitos do uso em larga escala são estendidos até os sistemas de transmissão, reduzindo o fluxo de potência nas linhas de transmissão e, conseqüentemente, minimizando as perdas elétricas e freando a necessidade de investimentos em novas subestações e linhas de transmissão.

Esse cenário otimista decorre do fato do Brasil possuir, além de abundância da energia radiante do sol, uma enorme extensão de áreas degradadas, ou de baixo valor econômico, para implantação de projetos de geração elétrica empregando tecnologia solar, e um sistema nacional interligado a um conjunto de hidrelétricas. Não obstante

tais vantagens, um outro grande diferencial está alicerçado na possibilidade de transformação socioeconômica da população de baixa renda do semiárido nordestino através da micro e mini geração fotovoltaica distribuída e da aplicação da tecnologia solar para dessalinização e bombeamento de água, que pode se transformar em realidade através de novas políticas públicas para promoção do desenvolvimento econômico regional e inclusão social. (PEREIRA et al., 2017)

Com isso, a geração de energia através dos sistemas fotovoltaicos se destaca entre as demais fontes renováveis, apresentando uma evolução tecnológica e competitividade econômica superior entre as demais, podendo ainda ser inserido tanto na geração centralizada quanto na geração distribuída.

1.1.1 Pioneiros da Geração Solar Fotovoltaica no Brasil

O primeiro sistema fotovoltaico integrado a uma edificação e conectado à rede foi na UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, no laboratório de energia solar fotovoltaica. Desde 16 de setembro de 1997 ele está instalado no prédio do departamento de engenharia mecânica de Florianópolis, com operação quase ininterrupta até os dias atuais. Esse gerador é uma demonstração de confiabilidade e desempenho dos sistemas fotovoltaicos, considerando que a garantia média desses sistemas é de 25 anos, fornecida pelos fabricantes dos módulos disponíveis no mercado.

O gerador fotovoltaico foi construído com 2 kWp de potência instalada em uma área total de 40m². Ao todo, foram utilizados 68 módulos de filmes finos de silício amorfo de dupla junção (módulos vidro-vidro, sem moldura) e inversores. Além disso, sensores de irradiância e de temperatura estão instalados de modo a possibilitar o monitoramento contínuo do sistema, coletando dados valiosos para avaliação de confiabilidade da tecnologia. (RIOS, 2022)

Após 11 anos de operação foram detectadas algumas poucas interrupções de geração que foram rapidamente solucionadas e o sistema foi mantido configurado como instalado, demonstrando a elevada confiabilidade de um gerador deste tipo. Já no final do ano de 2008, dois inversores que já operavam continuamente, apresentaram falhas, o que levou a uma reestruturação do sistema, pois não havia possibilidade de consertar ou substituir os inversores originais (que tinham uma eficiência de 90%), uma vez que os mesmos já não eram mais fabricados há alguns

anos. Um novo e mais moderno inversor de alta eficiência (98%), de 2,5 kW, substituiu os quatro inversores originais, de 650 W. (RIOS, 2022)

Já primeira usina solar do Brasil teve sua instalação no ano de 2011, no município de Tauá no sertão do Ceará que, além de ser considerada a primeira usina a gerar eletricidade solar no Brasil, também é a primeira na América Latina.

A usina tem 1MW de capacidade instalada, com 4.680 módulos solares em aproximadamente 12 mil metros quadrados. O projeto foi realizado pela empresa MPX, na época em que o empresário Eike Batista esteve à frente, e foram investidos cerca de 10 milhões de reais, gerando, na época, 250 empregos indiretos.

1.1.2 Regulamentação da Geração Distribuída no Brasil

Em 2010 a ANEEL promoveu a Consulta Pública nº15/2010, e em 2011 uma Audiência Pública nº42/2011, com o intuito de debater a conexão de geração distribuída ao sistema elétrico. Como resultado, em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa de número 482 foi publicada. A mesma estabeleceu as condições gerais para o acesso da micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, e criou um sistema de compensação de energia elétrica.

Após a publicação da REN 482 a ANEEL acompanhou de perto sua implementação e como foi a reação do mercado, permitindo assim identificar pontos onde era necessário melhoria.

Dessa forma, com o objetivo de reduzir os custos e o tempo para a conexão da micro e minigeração, compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010), aumentar o público alvo e melhorar as informações na fatura, a ANEEL realizou a Audiência Pública nº 26/2015, que culminou com a publicação da Resolução Normativa - REN nº 687/2015, a qual revisou a REN nº 482/2012 e a seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. (Cadernos temáticos ANEEL, 2016)

Em 2022 ocorreu o marco legal da geração distribuída, criado pela lei 14.300/2022, que regulamentou a produção de energia e compensação de créditos. Porém as mudanças só chegaram em maio de 2024, quando CNPE, Conselho Nacional de Política Energética, publica as diretrizes do cálculo de compensação que leva em conta os aspectos da transmissão, distribuição, geração, perdas e sinal

locacional. Contudo, os sistemas já existentes, ou que protocolaram a solicitação de acesso em até 12 meses após a publicação da lei, permaneceram sob a regra de paridade tarifária até 31 de dezembro de 2045.

Os projetos que se conectaram entre janeiro e julho de 2023 terão direito a uma transição até 31 de dezembro de 2030. Para as unidades consumidoras que se conectarem após 18 meses da aprovação da Lei, a transição termina em 31 de dezembro de 2028. Nesses casos, os projetos serão cobrados por alguns componentes tarifários de forma escalonada.

A nova cobrança, que se refere aos encargos pelo uso da rede elétrica, será implementada gradualmente, com o intuito de amortizar o impacto financeiro nos novos clientes e permitir que o setor se adapte ao novo modelo, sendo feita da seguinte forma:

- 15% a partir de 2023;
- 30% a partir de 2024;
- 45% a partir de 2025;
- 60% a partir de 2026;
- 75% a partir de 2027;
- 90% a partir de 2028.

Também foi alterado a classificação de minigeração distribuída para as fontes não despacháveis, que é o caso da energia solar fotovoltaica. Antes era classificado como minigeração usinas solares que possuíam potência entre 75 kW e 5 MW, agora o máximo de potência para se manter na categoria são 3 MW.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é analisar e comparar os indicadores de desempenho de cinco sistemas fotovoltaicos com configuração, tecnologia e localização geográfica diferentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

De modo a atingir o objetivo geral proposto, se estabeleceram os seguintes objetivos específicos para esse projeto:

- Caracterizar os sistemas fotovoltaicos conectados à rede que serão objetos do estudo;
- Definir os indicadores de desempenho que serão utilizados;
- Calcular os indicadores de desempenho dos cinco sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Comparar os dados obtidos dividindo em três subsistemas distintos;

1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando um mercado em fase de crescimento exponencial, o estudo sobre o desempenho dos sistemas fotovoltaicos deve auxiliar na parametrização e operação das usinas, assim como gerar ferramentas para orientar decisões do mercado e identificar necessidades futuras, sendo essencial para o aumento da maturidade e da confiabilidade desses sistemas no mercado.

É através de pesquisas de qualidade e desempenho que se obtém indicativos acerca da configuração ideal de um sistema fotovoltaico, e alerta quanto a correta instalação, operação e manutenção dos sistemas. Uma vez que a especificação de um sistema fotovoltaico é feita de forma correta, ocorre um incremento na sua eficiência, proporcionando ganhos em termos financeiros e técnicos. Enquanto os ganhos financeiros são observados principalmente no custo inicial do sistema e no tempo de retorno do investimento realizado, os ganhos técnicos se refletem nos índices de desempenho e na qualidade da energia gerada.

Portanto, o estudo em questão visa beneficiar tanto a comunidade quanto o mercado com as informações que serão obtidas através dele.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa desenvolvida neste trabalho está organizada em seis capítulos. No primeiro consta a introdução, onde são descritos tanto o panorama energético mundial quanto o uso da energia solar como fonte renovável para balancear a poluição gerada

por outras fontes no mundo. E ao decorrer do capítulo é mostrado o potencial que o Brasil possui para este tipo de geração, comparando-o com outros países em que a tecnologia é mais desenvolvida. Também é mostrada a história da energia solar fotovoltaica no Brasil e a como foi a regulamentação do setor, seguidos pelos objetivos do estudo, justificativa e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo aborda os fundamentos dos sistemas fotovoltaicos, começando com a descoberta do efeito fotovoltaico até o módulo como existe no mercado hoje, descrevendo assim o funcionamento da célula fotovoltaica, os tipos de células existentes e seus parâmetros. Também é descrito neste capítulo os demais componentes que, em conjunto com o módulo solar, compõem um sistema fotovoltaico. É feita a classificação e tipologia quanto aos tipos de sistemas fotovoltaicos existentes, e é feito o levantamento do recurso solar disponível.

No terceiro capítulo são determinados quais serão os indicadores de desempenho que serão utilizados no estudo, detalhando o que cada um avalia e como realizar o cálculo do mesmo.

O capítulo quatro aborda os cinco sistemas fotovoltaicos conectados à rede que serão objeto de estudo, trazendo todas as informações pertinentes: caracterização dos sistemas, período do estudo, localização geográfica, dados de geração do período, e os dados de irradiação solar normal e corrigidos para o plano inclinado de cada sistema.

No capítulo cinco são realizadas as comparações dos resultados dos indicadores de eficiência calculados, divididos em três subsistemas, e analisados quanto aos dados obtidos.

Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões decorrentes do desenvolvimento deste trabalho.

2. FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, quando observou que ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos que estavam imersos. 37 anos depois, em 1876, William Grylls Adams e Richard Evans Day observaram efeito similar em um dispositivo sólido fabricado com selênio, e em 1877, eles publicaram um artigo com o título de "A ação da luz no selênio". E em 1883 Charles Edgar Fritts criou a primeira célula solar fotovoltaica, fabricada com selênio, com menos de 1% de eficiência.

Na década de 1950, 110 anos após a descoberta de Becquerel, os Laboratórios Bell fabricaram a primeira célula fotovoltaicas utilizável a partir de silício cristalino. Célula essa que atingiu a eficiência de conversão de energia solar em elétrica de 6%, com potência de 5 mW em uma área de 2 cm².

Desde então, diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas vem sendo desenvolvidas, porém as células fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino, monocristalino e policristalino, ainda dominam o mercado mundial. As outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino (μ c-Si), e silício crescido em fitas (Si-fitas). Células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (DSSC) ou polímeros também estão sendo desenvolvidas.

A tabela 1 abaixo retrata a eficiência máxima dos módulos para cada uma das tecnologias de células mencionadas acima.

Tabela 1 - Eficiência das células fotovoltaicas por tecnologia

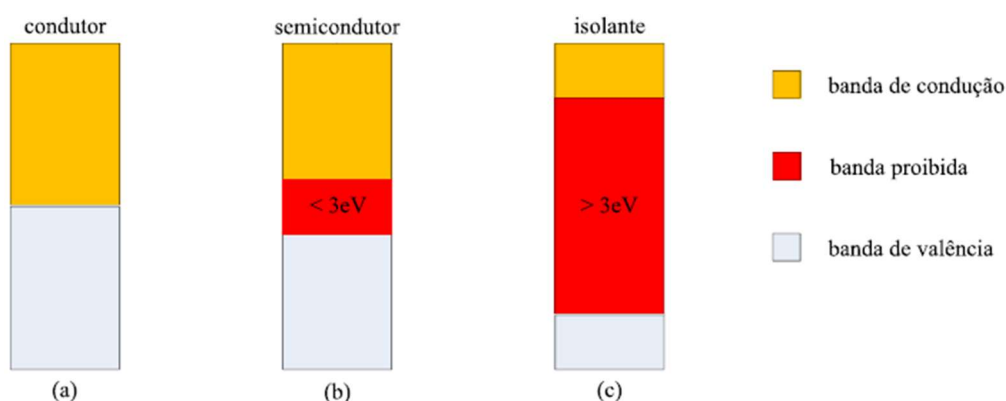
Tecnologia	Eficiência típica de módulos comerciais	Eficiência dos melhores módulos (em laboratório)
Silício cristalino		
Monocristalino	17 a 21,5%	22,9%
Policristalino	14 a 17%	18,5%
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	10,9%
Telureto de Cádmio (CdTe)	10 a 16,3%	18,2%
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	12 a 14,7%	17,5%
Concentrador fotovoltaico (CPV)	27 a 33%	38,9%

Fonte: Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica (TOLMASQUIM, 2016).

2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução “vazia” (sem elétrons) na temperatura do zero absoluto (0 K). E a separação entre essas duas bandas é denominada de gap, ou banda proibida, e representada por E_g , podendo atingir até 3 eV (elétron-volt), o que os diferencia dos materiais considerados isolantes; onde a banda proibida supera esse valor.

Figura 4 - Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO et al, 2014).

Uma característica importante dos semicondutores é o aumento da condutividade com a temperatura, por conta da excitação térmica dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando na banda de valência as lacunas, as quais constituem portadores de carga positiva, cuja mobilidade, todavia, é cerca de um terço da dos elétrons na banda de condução. Assim, para temperaturas superiores ao zero absoluto há sempre no semicondutor um certo número de elétrons ocupando a banda de condução, e o mesmo número de lacunas na banda de valência, denominados portadores intrínsecos.

A propriedade fundamental dos semicondutores, que permite a fabricação de células fotovoltaicas, é a possibilidade de que fótons incidentes sob o material com energia superior ao E_g do gap, também gerem pares elétron-lacuna. Estes elétrons e lacunas fotogerados podem mover-se dentro do material e aumentam sua

condutividade elétrica, o que é denominado como efeito fotocondutivo. Contudo, para o aproveitamento de corrente e tensão elétrica é necessário aplicar um campo elétrico, a fim de se separar os portadores, o que se consegue através da chamada junção pn. Para construir uma junção pn é necessário realizar a dopagem, ou seja, introduzir pequenas quantidades de outros elementos, denominados impurezas ou dopantes, de forma controlada no semicondutor, dessa forma, mudando drasticamente as propriedades elétricas do material intrínseco.

Os átomos de silício (Si), material semicondutor mais utilizado na fabricação das células fotovoltaica, são tetravalentes, ou seja, possuem 4 elétrons de valência que formam ligações covalentes com os átomos vizinhos, resultando em 8 elétrons compartilhados por cada átomo.

Se introduzirmos nessa estrutura um átomo pentavalente, como o Fósforo (P), haverá um elétron em excesso fracamente ligado a seu átomo de origem. Como sua energia de ligação é muito baixa, na temperatura ambiente a energia térmica é suficiente para libertar este elétron fazendo com que ele salte da banda de valência para a banda de condução, deixando seu átomo de origem com uma carga fixa positiva. Pode-se utilizar o arsênio (As) ou o antimônio (Sb), que são chamados de impurezas doadores de elétrons, ou dopantes tipo n, ou, ainda, impurezas tipo n. (PINHO et al, 2014)

Se optarmos por introduzir um átomo trivalente, como o Boro (B), ao invés de sobrar um elétron vai faltar um elétron para completar as ligações com os átomos de silício, ou seja, vai gerar uma lacuna. Na temperatura ambiente a energia térmica de um elétron de uma ligação vizinha é suficiente para fazê-lo passar a esta posição, sendo o movimento da lacuna inverso, tornando o átomo com uma carga fixa negativa. Além do Boro, podem ser usados alumínio (Al), gálio (Ga) e índio (In), que são denominados como impurezas aceitadoras de elétrons, ou dopantes tipo p. (PINHO et al, 2014)

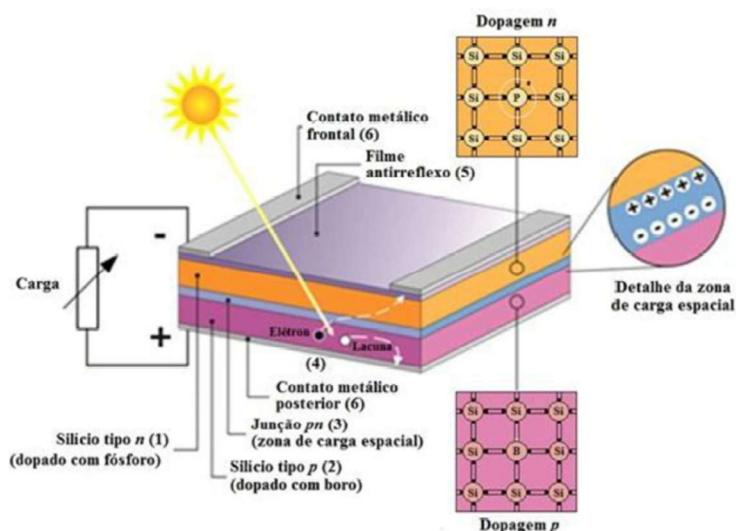
As concentrações dos dopantes são deliberadamente feitas várias ordens de grandeza superiores às dos portadores intrínsecos na temperatura ambiente, de forma a criar regiões com predominância de cargas livres negativas ou positivas, denominadas regiões tipo n e tipo p.

Por outro lado, se em uma metade de uma lâmina Si, inicialmente puro, forem introduzidos átomos de Boro (B) e na outra metade átomos de Fósforo (P), será então formada a junção pn.

Na interface entre os dois tipos de dopagem, o excesso de elétrons da região n se difunde para a região p, dando origem a uma região com cargas elétricas positivas fixas no lado n, que são íons P^+ , pois os átomos de Fósforo perdem um elétron. Os elétrons que passam do lado n para o lado p encontram as lacunas, fazendo com que esta região fique com cargas negativas fixas, que são íons B^- , pois os átomos de B recebem um elétron. Estas correntes de difusão de portadores de carga não continuam indefinidamente, porque o excesso de cargas positivas e negativas na junção das regiões n e p produz um campo elétrico que impede a passagem de elétrons do lado n para o lado p, assim como impede a passagem de lacunas da região p para n. (PINHO et al, 2014)

Estabelecido o equilíbrio, forma-se uma zona com cargas positivas e negativas, denominada de zona de carga especial ou zona de depleção, gerando um campo elétrico na junção pn e uma barreira de potencial. Através da junção pn no escuro, sem tensão externa de polarização, existe uma corrente de portadores gerados termicamente que se anula num estado de equilíbrio dinâmico. (PINHO et al, 2014)

Figura 5 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO et al, 2014).

Na prática, para se obter a junção pn, é usado uma lâmina de silício cristalino previamente dopada em sua fabricação com átomos do tipo p, e introduzido átomos do tipo n. Isto é feito através da introdução do material em um forno de alta temperatura contendo um composto de fósforo em sua forma gasosa.

Quando esse material semicondutor é exposto a fótons com energia maior que a do gap, ocorre a fotogeração de pares elétrons-lacunas assim como no material intrínseco, porém, se tais portadores de carga forem gerados no interior da região espacial, eles serão separados pelo campo elétrico, acelerando os elétrons para o lado n e as lacunas para o lado p, gerando assim a corrente elétrica através da junção no sentido da região n para a região p.

Esta separação dos portadores de carga pela junção pn dá origem ao efeito fotovoltaico, que é a conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial.

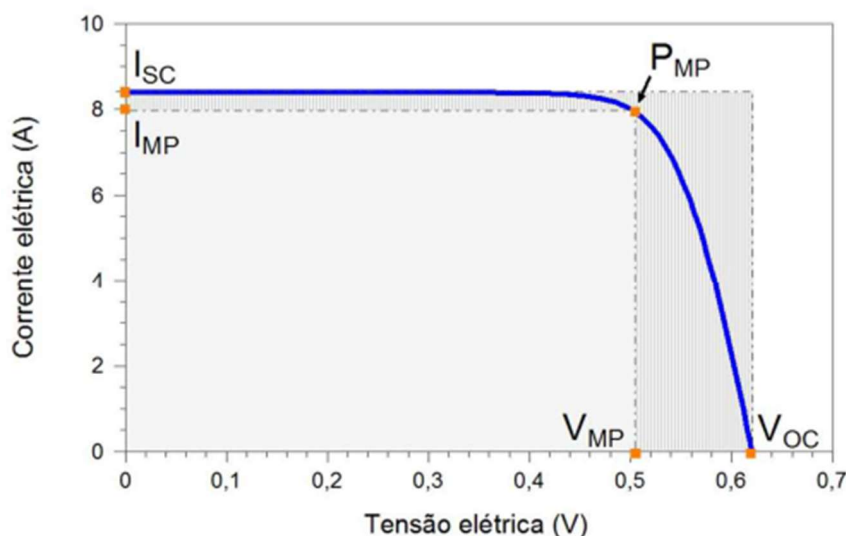
Para completar a célula fotovoltaica, são ainda necessários um contato elétrico frontal na região n, e um contato traseiro na região p. Se esses contatos forem conectados externamente por meio de um condutor haverá a circulação de elétrons.

2.1.1 Curva Característica

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma da corrente de uma junção pn no escuro com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar.

A curva da corrente em função da tensão do dispositivo, curva I-V, ou curva característica, da célula fotovoltaica de Si, é apresentada na imagem 6 abaixo. Apesar de ser representada no primeiro quadrante, fisicamente a curva I-V se situa no quarto quadrante, por se tratar de um gerador onde, conforme já mencionado, a corrente tem sentido inverso. As condições padrões de ensaio, ou teste, são a irradiância de 1.000 W/m², índice de massa de ar AM1,5 e temperatura da célula de 25°C.

Figura 6 - Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica sob condições padrão de ensaio



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO et al, 2014).

A partir da curva I - V podem ser determinados alguns dos parâmetros elétricos que caracterizam os módulos fotovoltaicos, como:

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): é a tensão entre os terminais de uma célula quando não há corrente circulando, e é a máxima tensão que uma célula pode produzir.
- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): é a máxima corrente que se pode obter e é medida quando a tensão em seus terminais é igual a zero.
- Fator de forma (FF): é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto.
- Eficiência (η): é o parâmetro que define o quão efetivo é a conversão de energia solar em elétrica.

2.1.2 Resistências Série e Paralelo

As resistências série e paralelo de uma célula fotovoltaica tem influência importante na curva I - V da célula, contribuindo ambas para reduzir o fator forma, e, portanto, sua eficiência. (PINHO et al, 2014)

A resistência série (R_s) se origina na resistência do próprio material semicondutor, nos contatos metálicos e na junção metal-semicondutor. Ela contribui

para reduzir a corrente de curto circuito e o fator forma, mas não afeta a tensão de circuito aberto. (PINHO et al, 2014)

A resistência paralela (R_p) reduz a tensão de circuito aberto, e o fator forma, sem influenciar na corrente de curto circuito. Essa resistência é causada por impurezas e defeitos na estrutura, que produzem um caminho interno para a corrente de fuga, reduzindo a corrente efetiva produzida pelo dispositivo. (PINHO et al, 2014)

2.1.3 Associações de Módulos

Os módulos solares podem ser associados em série ou paralelo dependendo de sua aplicação. Através da escolha dessas características é possível variar os níveis de tensão e corrente desejados.

Associação em Série: nessa conexão, o terminal positivo de um módulo é conectado ao negativo do próximo, e assim por diante. Dessa forma, para módulos idênticos, as tensões são somadas e a corrente é preservada. No caso de associar dispositivos em série com diferentes correntes de curto circuito, a corrente de associação será limitada pela menor corrente, porém, na prática, não é recomendado esse tipo de associação pelo perigo de ocorrer superaquecimento.

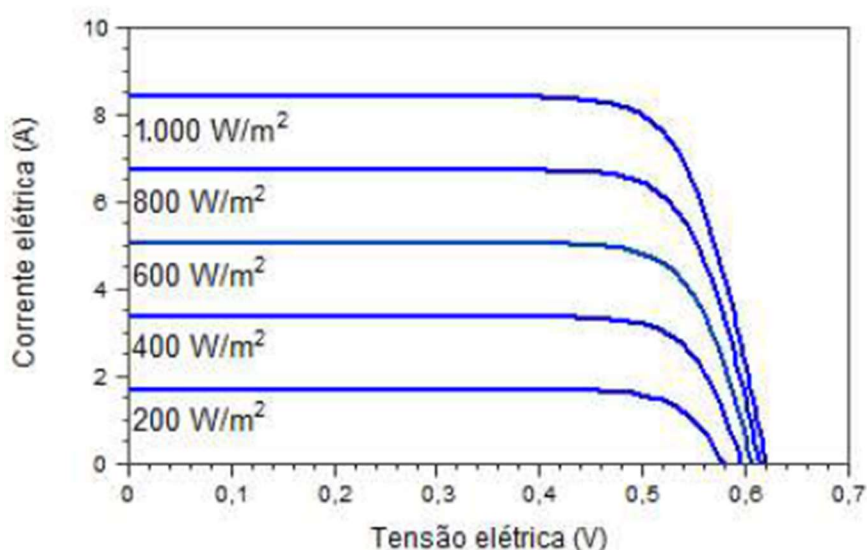
Associação em Paralelo: nessa conexão, os terminais positivos são interligados entre si, e da mesma forma os negativos. Dessa forma, para módulos idênticos, a tensão se mantém inalterada e as correntes são somadas.

2.1.4 Parâmetros Externos

O desempenho das células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância incidente sobre a célula e pela temperatura de operação.

A figura 7 abaixo revela como a irradiância solar incidente afeta a curva I-V de um módulo solar, mantido a 25°C. A corrente gerada aumenta linearmente com o aumento da irradiância, enquanto a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica.

Figura 7 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C

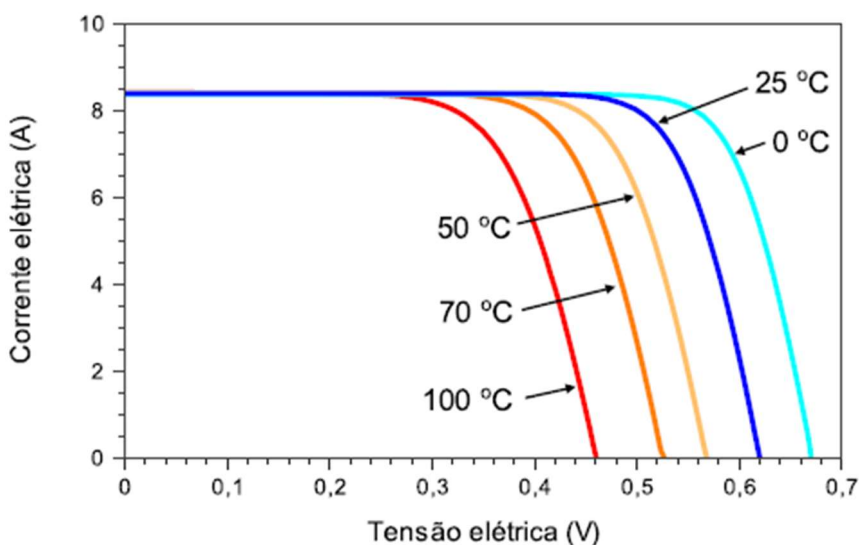


Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO et al, 2014).

O aumento da irradiância incidente e/ou temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula, gerando uma redução de sua eficiência. Isso se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível.

O gráfico da figura 8 mostra as curvas I-V para diversas temperaturas de células fotovoltaicas, mantendo a irradiância de 1.000 W/m².

Figura 8 – Influência da variação temperatura na célula fotovoltaica (para irradiância de 1 kW/m²)



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO et al, 2014).

2.2 COMPONENTES ESSENCIAIS

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos pelos módulos, inversor, cabeamentos, proteções CA e CC, controlador de carga e banco de baterias, quando se trata de um sistema híbrido ou isolado. Dessa forma, segue abaixo a descrição de cada um desses elementos.

- **Inversor:** É um dispositivo fundamental que converte a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), que é o tipo de eletricidade usada na maioria das residências e empresas, e que é compatível com a rede elétrica pública. Os inversores modernos também ajustam o ponto de operação para maximizar a captação de energia (rastreamento do ponto de máxima potência - MPP) e podem registrar dados de funcionamento.
- **Cabos e Proteções Elétricas:** São vitais para conduzir a eletricidade de forma segura e eficiente, minimizando perdas. Incluem disjuntores, fusíveis, dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e aterramento, que garantem a segurança da instalação contra sobrecargas, curtos-circuitos e descargas atmosféricas.
- **Controlador de Carga (para sistemas autônomos):** Em sistemas que utilizam baterias, o controlador de carga é responsável por gerenciar o fluxo de energia para as baterias, protegendo-as contra sobrecarga e descarga excessiva, o que prolonga sua vida útil.
- **Baterias/Acumuladores (para sistemas autônomos):** São usadas para armazenar a energia elétrica gerada pelos módulos e garantir o fornecimento contínuo de energia durante a noite ou em dias nublados, quando não há produção solar suficiente. As baterias de chumbo-ácido são as mais comuns em instalações solares, devido à sua boa relação custo-eficiência. A densidade do eletrólito e a profundidade de descarga são fatores importantes que afetam o desempenho e a vida útil dessas baterias.

2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA

Os sistemas fotovoltaicos são divididos em três categorias: sistemas conectados à rede, sistemas isolados ou sistemas híbridos. Todos os tipos geram energia de forma similar, porém diferem no caminho restante.

Os sistemas conectados à rede (SFCR) funcionam em conjunto com a rede elétrica pública e não utilizam de baterias para armazenamento de energia. A eletricidade gerada é primeiramente consumida no próprio local e o excedente é injetado na rede elétrica. Em períodos de pouca geração, a eletricidade que falta é consumida da rede.

Os sistemas autônomos, ou isolados, são projetados para locais que não possuem acesso à rede elétrica, pois esses sistemas utilizam baterias para armazenar a energia gerada e garantir o fornecimento contínuo à carga. São comumente utilizados em aplicações remotas, como telecomunicações, sinalização marítima ou fornecimento de água potável. A dimensão do gerador fotovoltaico nestes sistemas é calculada com base na demanda diária de energia e em fatores como localização e estação do ano.

Os sistemas híbridos combinam a energia solar fotovoltaica com outras fontes de energia, como geradores a diesel ou turbinas eólicas, e/ou armazenamento, para aumentar a confiabilidade e otimizar o fornecimento.

2.5 LEVANTAMENTO DO RECURSO SOLAR

A rigor, a energia proveniente do Sol não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra. A taxa de energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante há bilhões de anos com uma potência atual da ordem de $3,86 \times 10^{26} W$. (PEREIRA et al, 2017)

A disponibilidade do recurso energético proveniente do sol e sua variabilidade anual são características intrínsecas relacionadas a órbita do planeta terra em relação ao sol. Ao longo do ano a distância entre a terra e o sol varia, e como consequência, a quantidade de radiação solar (irradiância solar) que atinge o solo oscila. No entanto, além da variabilidade anual a radiação solar também sofre uma atenuação antes de atingir o solo, pois ao entrar na atmosfera ela interage com os gases presentes e sofre os processos de absorção e reflexão.

A irradiância solar (W/m^2) que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera. (PEREIRA et al, 2017)

A integral da irradiância no tempo é definida como irradiação solar, ou energia solar incidente acumulada em um intervalo de tempo, geralmente de uma hora ou um dia, e é medida em kWh/m^2 . Um parâmetro útil que relaciona essas duas grandezas é o número de horas de sol pleno (HSP), que reflete o número de horas em que a radiação solar deveria permanecer constante e igual a 1kW/m^2 para que a energia resultante fosse equivalente à energia acumulada (irradiação) no local em questão.

Em essência, enquanto a irradiância mede a potência instantânea por unidade de área que o sol fornece, a irradiação mede a quantidade total de energia que foi entregue durante um período de tempo, sendo assim o fator mais relevante que influencia a produção de energia em sistemas fotovoltaicos, pois a quantidade de energia produzida por um painel é diretamente proporcional à irradiação solar incidente sobre ele.

3. INDICADORES DE DESEMPENHO

Os indicadores de desempenho, também chamados de métricas de desempenho ou parâmetros de avaliação, são ferramentas cruciais para analisar a qualidade operacional e produção de energia dos sistemas fotovoltaicos. Além de fornecer uma avaliação precisa se a usina foi projetada e instalada de forma a extrair o máximo que a região oferece, eles permitem avaliar e comparar sistemas instalados em diferentes localidades.

A análise dos indicadores é de suma importância tanto para os investidores quanto para os fabricantes dos equipamentos e as distribuidoras de energia. Esse tipo de análise fornece aos fabricantes um feedback necessário quanto à qualidade de seus equipamentos, e uma base de dados para futuras pesquisas e melhorias. Fornece aos usuários e investidores informações para a seleção de seus equipamentos, buscando melhor qualidade e eficiência, e permite avaliar se o sistema atende aos critérios de desempenho contratual. Às redes de distribuição e transmissão, oferece informações necessárias para o planejamento da produção e transmissão dessa energia, e o fluxo de potência nas redes.

Os parâmetros para sua análise têm sido bastante estudados, porém não há proposição de apenas um indicador de desempenho, pois tal grandeza é avaliada segundo diversas perspectivas, pois o perfil de potência de um sistema fotovoltaico é influenciado por fatores climáticos, meteorológicos e geográficos, entre outros fatores.

Existem várias normas internacionais em relação ao monitoramento do desempenho das usinas de energia solar, a principal delas é a IEC 61724:1 2021 - Performance de Sistemas FV – Parte 1: Monitoramento. Também temos como base outras duas normas para análise de desempenho, IEC TS 61724-2 e IEC TS 61724 - 3.

Baseados na norma internacional IEC 61724, que determina os equipamentos, métodos e terminologia de desempenho, monitoramento e análise dos sistemas fotovoltaicos, e nos estudos de Markovic, Almeida, Benedito, Konzen e Quaglia, sobre os indicadores usados para monitoramento e análise de desempenho, foram escolhidos os seguintes indicadores: Eficiência do Sistema, Rendimento Específico, Rendimento de Referência, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade.

3.2 EFICIÊNCIA DO SISTEMA (η)

Também chamado de eficiência global do sistema, essa métrica expressa, em porcentagem, a relação entre a energia elétrica obtida pela planta versus a irradiância solar que incide sobre a mesma, no mesmo período de análise. Este indicador avalia o desempenho do sistema fotovoltaico quantificando a eficiência do processo de conversão da energia solar em energia elétrica, sendo calculado através da equação 1, onde E_{ACout} é a energia gerada pelo sistema, em kWh, A é a área dos módulos solares que compõe o sistema, em m^2 , e G_I representa a irradiação solar no plano do arranjo, em kWh/m^2 , no período considerado.

$$\eta = \frac{E_{ACout}}{A * G_I} * 100 [\%] \quad (1)$$

3.2 RENDIMENTO ESPECÍFICO (Y_f)

Também chamado de “Performance Especifica”, “Rendimento Final”, ou “Fator de Produção”, este indicador expressa a razão entre a energia elétrica obtida através da usina fotovoltaica, durante um certo intervalo de tempo, e a potência máxima total instalada na usina. Em outras palavras, ele permite a comparação entre o desempenho de diferentes usinas, seja em localização, tecnologia, potência, ou outro fator.

O Y_f é calculado através da equação 2, onde E_{ACout} representa a energia gerada pelo sistema, em kWh, e P_{max} representa a potência CC nominal do sistema, em kWp.

$$Y_f = \frac{E_{ACout}}{P_{max}} \left[\frac{kWh}{kWp} \right] \quad (2)$$

3.3 RENDIMENTO DE REFERÊNCIA (Y_r)

O rendimento de referência (Y_r), mais conhecido como horas sol pico, representa a razão entre a energia total da radiação solar global (G_I) que incidiu sobre

os módulos em relação ao pico de irradiância solar, que corresponde a 1.000 W/m², durante um determinado período.

$$Y_r = \frac{G_I}{1 \frac{kW}{m^2}} \quad (3)$$

3.4 TAXA DE DESEMPENHO (PR)

Também denominada de “Performance Ratio”, ela representa a relação entre o rendimento específico (Y_f) e o rendimento referencial (Y_r). É um indicador que não depende da localização e reflete, indiretamente, as perdas totais dos sistemas fotovoltaicos, que são consequência da degradação, aquecimento e poluição dos módulos fotovoltaicos, bem como das perdas durante a conversão nos inversores e nos cabos de instalação. Portanto, representa a real capacidade de um sistema fotovoltaico em converter a energia solar disponível em eletricidade após descontadas as perdas, e é calculada através da equação descrita abaixo.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (4)$$

O PR é um indicador de qualidade adimensional, sendo geralmente representado na forma de fração ou de porcentagem. Seu valor representa um forte indicativo do quão bem projetada e executada foi uma usina fotovoltaica, e permite a comparação entre diferentes usinas de diferentes localidades.

3.5 FATOR CAPACIDADE (FC)

O fator capacidade denota a relação entre a energia elétrica real produzida pelo sistema num determinado período, e a energia elétrica que seria produzida se a usina estivesse operando todo esse tempo em potência máxima (nominal), 24 horas por dia durante o período de estudo.

Representada pela equação descrita abaixo, onde E_{ACout} é a energia gerada pelo sistema, em kWh, o P_{max} é a potência CC nominal do sistema, em kWp, e o t é o período do estudo.

$$FC = \frac{E_{ACout}}{P_{max} * t} = \frac{Y_f}{t} \quad (5)$$

Geralmente expresso como uma porcentagem, o fator capacidade varia dependendo da tecnologia de geração e da localização da usina, sendo muitas vezes usado para comparar diferentes fontes de energia, como eólica, hidrelétrica, entre outras. Por ser uma fonte intermitente, os sistemas fotovoltaicos apresentam valores de FC inferior a outras fontes, como eólica e hidrelétrica.

4. METODOLOGIA

O estudo se trata da análise dos indicadores de desempenho de 5 sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) durante um período de 36 meses, contemplando os anos de 2022, 2023 e 2024. Esses sistemas estão localizados nos municípios de Araporã, em Minas Gerais, Cachoeira Dourada, Itumbiara e Aparecida de Goiânia, em Goiás, e estão descritos mais abaixo desse capítulo.

Os dados solarimétricos de irradiação foram obtidos através do SunData v3.0, ferramenta da CRESESB destinada ao auxílio do cálculo de irradiação solar afim de apoiar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos em todo território nacional. Ele possui a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2017, que foi produzido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), e conta com 17 anos de informações de mais de 72.000 pontos em todo o território brasileiro, fornecendo dados extremamente confiáveis de irradiação solar no Brasil. (CRESESB, 2018)

Após obtenção dos dados de irradiação local pelo SunData v3.0, foi feita a correção de irradiação de superfície inclinada para chegar na irradiação real que atinge cada sistema fotovoltaico na configuração que ele se encontra, de orientação e inclinação, através do software Radasol 2.

Esse software, de uso gratuito, foi desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e utiliza modelos matemáticos avançados para calcular a intensidade da radiação solar para superfícies com diferentes inclinações e orientações, sendo assim essencial para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. (GASPARIN, 2018)

Os dados de geração do período de estudo foram obtidos através do sistema de monitoramento dos próprios inversores Sungrow instalados, que ficam disponíveis através do site ou aplicativo chamado de iSolarCloud.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS EM ESTUDO

Como já mencionado, a análise dos indicadores de desempenho foi desenvolvida no período de janeiro/2022 a dezembro/2024, em cinco usinas

fotovoltaicas reais conectadas a rede e localizadas nas cidades de Itumbiara, Aparecida de Goiânia, Araporã e Cachoeira Dourada. Em alguns casos houve meses onde a usina estava desconectada por motivos desconhecidos, portanto, nesses meses sem geração foi preenchido valores com médias de geração com base nos valores do mesmo mês de outros anos.

Cada sistema fotovoltaico conectado à rede em estudo possui inclinação e orientação distintos, pois todos foram instalados acompanhando o ângulo de inclinação e ângulo de azimute do telhado já existente no local.

Tabela 2 – Resumo dos sistemas fotovoltaicos em estudo

SFCR	Município	UF	Pcc [Wp]	Pca [kVA]	Orientação	Inclinação
1	Araporã	MG	23.760	20	30°	10°
2	Aparecida de Goiânia	GO	16.910	20	206°, 25° e 24°	10°
3	Itumbiara	GO	23.700	20	65°, 243° e 242°	10° e 8°
4	Itumbiara	GO	34.200	33	2° e 6°	15°
5	Cachoeira Dourada	GO	42.300	33,2	307°	10° e 8°

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De forma resumida, a tabela apresentada acima mostra as condições primárias de instalação de cada um dos sistemas fotovoltaicos. Podemos notar que os sistemas 1, 2 e 3 possuem a mesma potência de saída CA, de 20 kW, e os sistemas 4 e 5 possuem aproximadamente 33kW de potência CA. Outro fator comum entre elas é que os sistemas 3 e 4 estão instalados na cidade de Itumbiara.

Segue abaixo a descrição de cada um dos sistemas de forma detalhada e sistemática, contendo todas informações relevantes para o estudo dos indicadores.

4.1.1 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 1 (SFCR 1)

Figura 9 – Imagem aérea do SFCR 1



Fonte: Adaptado do Google Maps

Situado no município de Araporã em Minas Gerais, nas coordenadas 18°26'16.1" de latitude sul e 49°11'15.8" de longitude oeste, o sistema fotovoltaico 1 é composto por 72 módulos fotovoltaicos da marca BYD, modelo PHK-36-SERIES-5BB, e com potência máxima de 330 Wp, totalizando 23,76 kWp de capacidade instalada. Os módulos são feitos da tecnologia de silício policristalino (p-Si) e possuem as dimensões 1992mm×992mm×35mm com área equivalente a 1,98 m², com isso cobrindo uma área total de 142,56 m².

Segue abaixo alguns dos dados técnicos informados no datasheet do fabricante dos módulos solares.

Tabela 3 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 1

Dados dos Módulos Fotovoltaicos	
Fabricante	BYD
Modelo	PHK-36-SERIES-5BB
Tecnologia	Silício Policristalino (p-Si)
Potência Máxima em STC ($P_{m\acute{a}x}$)	330 Wp
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	45.19 V
Tensão Máxima de Operação (V_{mp})	37.83 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{SC})	9.2 A
Corrente Máxima de Operação (I_{mp})	8.72 A
Eficiência do Módulo	16.7 %
Área do Módulo	1,98 m ²

Fonte: Adaptado do Datasheet BYD

O arranjo solar foi instalado no telhado de uma empresa, seguindo a inclinação de 10° em relação a linha horizontal e uma orientação de 30° em relação ao norte geográfico. Ele fornece energia para um inversor da marca Sungrow, modelo SG20KTL-M, e possui potência nominal de 20 kW.

Os dados técnicos referentes ao inversor, que são fornecidos pelo fabricante no datasheet, estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 4 – Especificações do inversor do SFCR 1

Dados do Inversor	
Fabricante	Sungrow
Modelo	SG20KTL-M
Potência Nominal	20.000 VA
Faixa de Tensão de Operação	270 – 480 V
Corrente Nominal	31,9 A
Fator de Potência	> 0,99
Rendimento	98,60%
Frequência de Operação	60 Hz
Monitoramento	Integrado

Fonte: Adaptado do Datasheet da Sungrow

O desempenho real do sistema fotovoltaico foi obtido através de relatórios provenientes do sistema de monitoramento online do inversor, chamado de iSolarCloud, e disponibilizados pela empresa responsável pelo dimensionamento, instalação e gerenciamento.

Segue abaixo a tabela do desempenho real do sistema fotovoltaico, em kWh, registrado pelo inversor no período de janeiro de 2022 até dezembro de 2024.

Tabela 5 – Geração mensal do SFCR 1

	2022	2023	2024
Janeiro	3.104,50	2.764,10	2.932,50
Fevereiro	2.699,20	2.714,10	2.889,70
Março	3.319,50	2.566,70	2.654,30
Abril	2.899,10	2.306,30	2.664,60
Mai	2.703,90	2.452,30	2.211,20
Junho	1.927,30	1.434,40	1.590,60
Julho	2.684,70	1.426,00	2.481,10
Agosto	2.278,40	1.854,60	2.829,10
Setembro	2.094,20	2.658,70	2.928,30
Outubro	2.935,20	2.860,40	3.032,40
Novembro	3.097,90	2.695,90	2.981,00
Dezembro	2.800,50	3.071,40	2.777,40
TOTAL	32.544,40	28.804,90	31.972,20

Fonte: Adaptado do iSolarCloud, software de monitoramento da Sungrow

4.1.2 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 2 (SFCR 2)

Figura 10 – Imagem aérea do SFCR 2



Fonte: Adaptado do Google Maps

Situado no município de Aparecida de Goiânia–GO, nas coordenadas 16°48'49.4" de latitude sul e 49°14'43.2" de longitude oeste, o sistema fotovoltaico 2 é composto por 38 módulos fotovoltaicos da marca JA Solar, do modelo JAM78S10-445/MR, com potência máxima de 445 Wp, totalizando 16,91 kWp de capacidade instalada. Os módulos são feitos de silício monocristalino (m-Si) e possuem as

dimensões 2180x996x40mm, com área de 2,17 m², somando uma área total de 82,46 m².

Segue abaixo alguns dados técnicos fornecidos pelo fabricante no datasheet referente aos módulos instalados.

Tabela 6 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 2

Dados dos Módulos Fotovoltaicos	
Fabricante	JA Solar
Modelo	JAM78S10-445/MR
Tecnologia	Silício Monocristalino (m-Si)
Potência Máxima em STC ($P_{máx}$)	445 Wp
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	53,31 V
Tensão Máxima de Operação (V_{mp})	45,18 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	10,48 A
Corrente Máxima de Operação (I_{mp})	9,85 A
Eficiência do Módulo	20,50 %
Área do Módulo	2,17 m ²

Fonte: Adaptado do Datasheet do Fabricante JA Solar

O arranjo solar foi instalado no telhado de um comércio com uma inclinação de 10° em relação a linha horizontal, e foi dividido entre orientações de 206°, 25° e 24° em relação ao norte geográfico. Ele fornece energia para um inversor da marca Sungrow, modelo SG20KTL-M, que possui potência nominal de 20 kW.

Alguns dados técnicos referentes ao inversor, que estão disponíveis no datasheet do fabricante, estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 7 – Especificações do inversor do SFCR 2

Dados do Inversor	
Fabricante	Sungrow
Modelo	SG20KTL-M
Potência Nominal	20.000 VA
Faixa de Tensão de Operação	270 – 480 V
Corrente Nominal	31,9 A
Fator de Potência	> 0,99
Rendimento	98,60 %
Frequência de Operação	60 Hz
Monitoramento	Integrado

Fonte: Adaptado do Datasheet do Fabricante Sungrow

O desempenho real do sistema fotovoltaico foi obtido através de relatórios provenientes do sistema de monitoramento online do inversor, chamado de iSolarCloud, e disponibilizados pela empresa responsável pelo dimensionamento, instalação e gerenciamento.

Segue abaixo a tabela do desempenho real do sistema fotovoltaico, em kWh, registrado pelo inversor no período de janeiro de 2022 até dezembro de 2024.

Tabela 8 – Geração mensal do SFCR 2

	2022	2023	2024
Janeiro	2.047,40	1.895,50	1.960,60
Fevereiro	1.771,20	1.918,10	1.962,20
Março	2.148,90	1.694,60	1.907,60
Abril	1.864,90	1.518,40	1.841,70
Mai	1.548,00	1.391,20	1.634,30
Junho	1.225,50	1.019,60	1.263,20
Julho	1.291,40	1.542,10	1.644,00
Agosto	1.539,90	1.621,90	1.958,20
Setembro	1.595,50	1.837,40	1.997,00
Outubro	2.061,80	1.899,43	2.011,30
Novembro	1.988,00	1.960,20	1.922,40
Dezembro	1.854,90	1.970,97	1.772,20
TOTAL	20.937,40	20.269,40	21.874,70

Fonte: Adaptado do iSolarCloud, software de monitoramento da Sungrow

4.1.3 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 3 (SFCR 3)

Figura 11 – Imagem aérea do SFCR 3



Fonte: Adaptado do Google Maps

Situado no município de Itumbiara, em Goiás, nas coordenadas 18°25'19.7" de latitude sul e 49°13'25.5" de longitude oeste, o sistema fotovoltaico 3 é composto por 60 módulos fotovoltaicos da marca Trina Solar, modelo Vertex S TSM-DE09.08, de potência máxima equivalente a 395 Wp, totalizando 23,70 kWp de capacidade instalada. Os módulos são feitos de silício monocristalino (m-Si) e possuem as dimensões 1754x1096x30mm, com área equivalente a 1,92m², com isso cobrindo uma área total de 115,20m².

Segue abaixo alguns dados técnicos referente aos módulos, que foram retirados do datasheet fornecido pelo fabricante.

Tabela 9 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 3

Dados dos Módulos Fotovoltaicos	
Fabricante	Trina Solar
Modelo	Vertex S TSM-DE09.08
Tecnologia	Silício Monocristalino (m-Si)
Potência Máxima em STC ($P_{m\acute{a}x}$)	395 Wp
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	41 V
Tensão Máxima de Operação (V_{mp})	34 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	12,21 A
Corrente Máxima de Operação (I_{mp})	11,62 A
Eficiência do Módulo	20,50 %
Área do Módulo	1,92 m ²

Fonte: Adaptado do Datasheet da Fabricante Trina Solar

O arranjo solar foi instalado em um telhado de múltiplos níveis acima de um comércio, com inclinações de 8° e 10° em relação a linha horizontal, e nas orientações de 65°, 243° e 242° em relação ao norte geográfico. E esse arranjo solar fornece energia para um único inversor da marca Sungrow, modelo SG20RT, que possui potência nominal de 20 kW.

Alguns dos dados disponíveis no datasheet do fabricante do inversor estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 10 – Especificações do inversor do SFCR 3

Dados do Inversor	
Fabricante	Sungrow
Modelo	SG20RT
Potência Nominal	20.000 VA
Faixa de Tensão de Operação	311 V – 478 V
Corrente Nominal	31,9 A
Fator de Potência	> 0,99
Rendimento	98,50 %
Frequência de Operação	60 Hz
Monitoramento	Integrado

Fonte: Adaptado do Datasheet do Fabricante Sungrow

O desempenho real do sistema fotovoltaico foi obtido através de relatórios provenientes do sistema de monitoramento online do inversor, chamado de iSolarCloud, e disponibilizados pela empresa responsável pelo dimensionamento, instalação e gerenciamento.

Segue abaixo a tabela do desempenho real do sistema fotovoltaico, em kWh, registrado pelo inversor no período de janeiro de 2022 até dezembro de 2024.

Tabela 11 – Geração mensal do SFCR 3

	2022	2023	2024
Janeiro	2.910,87	2.962,30	2.847,20
Fevereiro	2.838,92	2.824,50	2.789,20
Março	3.572,10	2.628,00	2.457,30
Abril	3.088,00	2.365,00	2.404,30
Mai	2.141,00	2.285,40	2.169,00
Junho	1.291,90	1.673,40	1.672,70
Julho	2.269,50	1.862,40	1.892,20
Agosto	2.282,33	2.027,80	2.326,50
Setembro	2.416,60	2.448,50	2.478,70
Outubro	3.184,90	2.694,40	2.659,50
Novembro	3.319,60	2.658,20	2.765,30
Dezembro	2.887,10	2.967,70	2.690,20
TOTAL	32.202,82	29.397,60	29.152,10

Fonte: Adaptado do iSolarCloud, software de monitoramento da Sungrow

4.1.4 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 4 (SFCR 4)

Figura 12 – Imagem aérea do SFCR 4



Fonte: Adaptado do Google Maps

Situado no município de Itumbiara em Goiás, nas coordenadas 18°24'46.5" de latitude sul e 49°12'14.8" de longitude oeste, o sistema fotovoltaico 4 é composto por 76 módulos fotovoltaicos da marca Trina Solar, do modelo Tallmax TSM-DE17M, com potência máxima de 450 Wp, totalizando 34,20 kWp de capacidade instalada.

Os módulos são feitos de silício monocristalino (m-Si) e possuem dimensões de 2102x1040x35mm com área equivalente a 2,18m², com isso cobrindo uma área total de 165,68m².

Segue abaixo alguns dados técnicos retirados do datasheet do fabricante dos módulos solares.

Tabela 12 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 4

Dados dos Módulos Fotovoltaicos	
Fabricante	Trina Solar
Modelo	Tallmax TSM-DE17M
Tecnologia	Silício Monocristalino (m-Si)
Potência Máxima em STC ($P_{m\acute{a}x}$)	450 Wp
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	49,60 V
Tensão Máxima de Operação (V_{mp})	41,00 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	11,53 A
Corrente Máxima de Operação (I_{mp})	10,98 A
Eficiência do Módulo	20,60 %
Área do Módulo	2,18 m ²

Fonte: Adaptado do Datasheet da Fabricante Trina Solar

O arranjo solar foi instalado no telhado de um restaurante com uma inclinação de 15° em relação a linha horizontal, e orientações de 2° e 6° em relação ao norte geográfico. Ele fornece energia para um inversor da marca Sungrow modelo SG33CX, que possui potência nominal de 33 kW.

Os dados técnicos pertinentes, retirados do datasheet do fabricante do inversor, estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 13 – Especificações do inversor do SFCR 4

Especificações do Inversor	
Fabricante	Sungrow
Modelo	SG33CX
Potência Nominal	33.000 VA
Faixa de Tensão de Operação	312 – 528 V
Corrente Nominal	55,20 A
Fator de Potência	> 0,99
Rendimento	98,60 %
Frequência de Operação	60 Hz
Monitoramento	Integrado

Fonte: Adaptado do Datasheet do Fabricante Sungrow

O desempenho real do sistema fotovoltaico foi obtido através de relatórios provenientes do sistema de monitoramento online do inversor, chamado de iSolarCloud, e disponibilizados pela empresa responsável pelo dimensionamento, instalação e gerenciamento.

Segue abaixo a tabela do desempenho real do sistema fotovoltaico, em kWh, registrado pelo inversor no período de janeiro de 2022 até dezembro de 2024.

Tabela 14 – Geração mensal do SFCR 4

	2022	2023	2024
Janeiro	3.011,10	2.675,40	3.715,38
Fevereiro	3.287,80	2.563,50	3.454,00
Março	4.138,30	2.513,20	2.973,50
Abril	3.594,00	3.457,00	3.955,10
Mai	3.302,00	3.938,20	4.417,80
Junho	3.180,70	3.767,20	4.138,00
Julho	4.017,50	4.038,10	4.510,30
Agosto	3.565,00	4.093,50	4.672,10
Setembro	3.400,10	4.291,70	4.548,20
Outubro	4.135,10	4.239,40	3.815,40
Novembro	3.688,60	3.972,20	3.307,30
Dezembro	2.755,00	4.254,50	3.244,57
TOTAL	42.075,20	43.803,90	46.751,65

Fonte: Adaptado do iSolarCloud, software de monitoramento da Sungrow

4.1.5 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede 5 (SFCR 5)

Figura 13 – Imagem aérea do SFCR 5



Fonte: Adaptado do Google Maps

Situado no município de Cachoeira Dourada no estado de Goiás, nas coordenadas 18°31'49.6" de latitude sul e 49°32'46.1" de longitude oeste, o sistema fotovoltaico 5 é composto por 94 módulos fotovoltaicos da marca Trina Solar, modelo Tallmax TSM-DE17M, com potência de 450 Wp, totalizando 42,30 kWp de capacidade instalada.

Os módulos são feitos de silício monocristalino (m-Si) e possuem dimensões de 2102x1040x35mm, com área equivalente a 2,18m², com isso cobrindo uma área total de 204,92m².

Segue abaixo alguns dados técnicos referente aos módulos em questão.

Tabela 15 – Especificações dos módulos fotovoltaicos do SFCR 5

Dados dos Módulos Fotovoltaicos	
Fabricante	Trina Solar
Modelo	Tallmax TSM-DE17M
Tecnologia	Silício Monocristalino (m-Si)
Potência Máxima em STC ($P_{m\acute{a}x}$)	450 Wp
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	49,60 V
Tensão Máxima de Operação (V_{mp})	41,00 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	11,53 A
Corrente Máxima de Operação (I_{mp})	10,98 A
Eficiência do Módulo	20,60 %
Área do Módulo	2,18 m ²

Fonte: Adaptado do Datasheet da Fabricante Trina Solar

O arranjo solar foi instalado no telhado de um rancho, com inclinações de 8° e 10° em relação a linha horizontal, e uma orientação de 307° em relação ao norte geográfico. Ele fornece energia para 4 inversores da marca Sungrow modelo SG8k3-D, que somados atingem potência nominal de 33,2 kW.

Descritos na tabela abaixo estão alguns dados técnicos do inversor que foram retirados do datasheet fornecido pelo fabricante.

Tabela 16 – Especificações do inversor do SFCR 5

Dados do Inversor	
Fabricante	Sungrow
Modelo	SG8K3-D
Potência Nominal	8.300 VA
Faixa de Tensão de Operação	176 – 276 V
Corrente Nominal	36,10 A
Fator de Potência	> 0,99
Rendimento	98,50 %
Frequência de Operação	60 Hz
Monitoramento	Integrado

Fonte: Adaptado do Datasheet do Fabricante Sungrow

O desempenho real do sistema fotovoltaico foi obtido através de relatórios provenientes do sistema de monitoramento online do inversor, chamado de iSolarCloud, e disponibilizados pela empresa responsável pelo dimensionamento, instalação e gerenciamento.

Segue abaixo a tabela do desempenho real do sistema fotovoltaico, em kWh, registrado pelo inversor no período de janeiro de 2022 até dezembro de 2024.

Tabela 17 – Geração mensal do SFCR 5

	2022	2023	2024
Janeiro	5.740,15	4.047,78	5.683,50
Fevereiro	5.357,85	3.855,50	4.826,10
Março	5.910,90	3.993,50	4.368,20
Abril	5.308,70	4.787,90	4.369,10
Mai	5.117,60	4.765,00	4.313,50
Junho	4.181,50	3.551,60	3.944,30
Julho	4.394,00	3.860,00	4.430,60
Agosto	4.853,50	3.735,10	3.977,50
Setembro	4.541,10	4.555,20	3.899,50
Outubro	5.397,40	4.699,80	5.181,90
Novembro	5.256,97	5.194,55	5.015,63
Dezembro	4.300,10	5.161,30	5.295,83
TOTAL	60.356,77	52.207,23	55.305,66

Fonte: Adaptado do iSolarCloud, software de monitoramento da Sungrow

4.2 CORREÇÃO DA IRRADIAÇÃO INCLINADA

Afim de determinar a irradiação solar que atinge os sistemas fotovoltaicos em estudo e permitir o estudo dos indicadores de desempenho, foram extraídos os dados das quatro cidades do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito (CRESESB). Esses dados estão descritos nas tabelas abaixo, mostrando os dados anuais de cada cidade.

Para a cidade de Araporã, onde se encontra o SFCR 1, o CRESESB oferece dados solarimétricos de uma estação a 5,8 km de distância, como mostra a tabela 18 abaixo.

Tabela 18 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Araporã-MG

Estação: Arapora
Município: Arapora, MG - BRASIL
Latitude: 18,401° S
Longitude: 49,149° O
Distância do ponto de ref. (18,437818° S; 49,187726° O): 5,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Piano Horizontal	0° N	5,62	5,81	5,21	5,05	4,63	4,35	4,53	5,41	5,29	5,64	5,68	5,80	5,25	1,45
✓	Ângulo igual a latitude	18° N	5,17	5,56	5,29	5,55	5,48	5,36	5,48	6,18	5,54	5,51	5,27	5,26	5,47	1,01
✓	Maior média anual	19° N	5,13	5,54	5,28	5,57	5,51	5,40	5,52	6,21	5,54	5,49	5,24	5,22	5,47	1,08
✓	Maior mínimo mensal	16° N	5,23	5,61	5,30	5,52	5,40	5,26	5,39	6,12	5,53	5,54	5,34	5,33	5,47	,88

Fonte: CRESESB SunData v3.0

Para a cidade de Itumbiara, onde se encontram o SFCR 3 e SFCR 4, o CRESESB oferece os dados solarimétricos de uma estação a 3,6 e 4,9 km de distância, respectivamente, como mostra a tabela 19 abaixo.

Tabela 19 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Itumbiara-GO

Estação: Itumbiara
Município: Itumbiara, GO - BRASIL

Latitude: 18,401° S

Longitude: 49,249° O

Distância do ponto de ref. (18,422147° S; 49,223747° O): 3,6 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,59	5,70	5,18	5,06	4,62	4,39	4,57	5,55	5,31	5,58	5,60	5,78	5,24	1,39
✓	Ângulo igual a latitude	18° N	5,14	5,46	5,26	5,56	5,47	5,40	5,54	6,36	5,56	5,45	5,20	5,24	5,47	1,22
✓	Maior média anual	20° N	5,07	5,41	5,25	5,59	5,54	5,49	5,62	6,42	5,56	5,41	5,13	5,16	5,47	1,35
✓	Maior mínimo mensal	15° N	5,23	5,52	5,27	5,51	5,36	5,26	5,40	6,26	5,54	5,50	5,29	5,35	5,46	1,02

Fonte: CRESESB SunData v3.0

Para a cidade de Aparecida de Goiânia, onde se encontra o SFCR 2, o CRESESB oferece dados solarimétricos de uma estação a 1,5 km de distância, como mostra a tabela 20 abaixo.

Tabela 20 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Aparecida de Goiânia-GO

Estação: Aparecida de Goiania

Município: Aparecida de Goiania, GO - BRASIL

Latitude: 16,801° S

Longitude: 49,249° O

Distância do ponto de ref. (16,813721° S; 49,245328° O): 1,5 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,46	5,56	5,17	5,06	4,74	4,53	4,75	5,63	5,57	5,62	5,42	5,56	5,26	1,11
✓	Ângulo igual a latitude	17° N	5,03	5,32	5,22	5,50	5,52	5,47	5,66	6,37	5,80	5,47	5,04	5,06	5,46	1,34
✓	Maior média anual	18° N	5,00	5,30	5,22	5,51	5,55	5,52	5,71	6,40	5,80	5,45	5,01	5,03	5,46	1,40
✓	Maior mínimo mensal	12° N	5,19	5,43	5,24	5,41	5,32	5,23	5,43	6,20	5,77	5,55	5,18	5,24	5,43	1,01

Fonte: CRESESB SunData v3.0

Para a cidade de Cachoeira Dourada, onde se encontra o SFCR 5, o CRESESB oferece dados solarimétricos de uma estação a 3,4 km de distância, como mostra a tabela 21 abaixo.

Tabela 21 - Dados de irradiação solar da estação solarimétrica da CRESESB, em Cachoeira Dourada-GO

Estação: Cachoeira Dourada
Município: Cachoeira Dourada , GO - BRASIL

Latitude: 18,5° S

Longitude: 49,549° O

Distância do ponto de ref. (18,530432° S; 49,546124° O) :3,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Piano Horizontal	0° N	5,62	5,76	5,24	5,07	4,60	4,30	4,55	5,46	5,25	5,57	5,71	5,79	5,24	1,49
✓	Ângulo igual a latitude	19° N	5,13	5,50	5,32	5,59	5,48	5,33	5,56	6,28	5,50	5,42	5,26	5,22	5,46	1,15
✓	Maior média anual	19° N	5,13	5,50	5,32	5,59	5,48	5,33	5,56	6,28	5,50	5,42	5,26	5,22	5,46	1,15
✓	Maior mínimo mensal	16° N	5,23	5,57	5,33	5,53	5,37	5,20	5,43	6,18	5,49	5,47	5,36	5,33	5,46	,98

Fonte: CRESESB SunData v3.0

Após a obtenção de todos os dados solarimétricos de irradiação fornecidos pelo CRESESB, foi alimentado o software Radiasol com as informações de orientação e inclinação de cada um dos sistemas fotovoltaicos para chegar no valor final de irradiação inclinada que atinge o plano dos módulos.

Portanto, o valor final efetivo de irradiação solar mensal obtido para cada um dos casos está descrito na tabela 22.

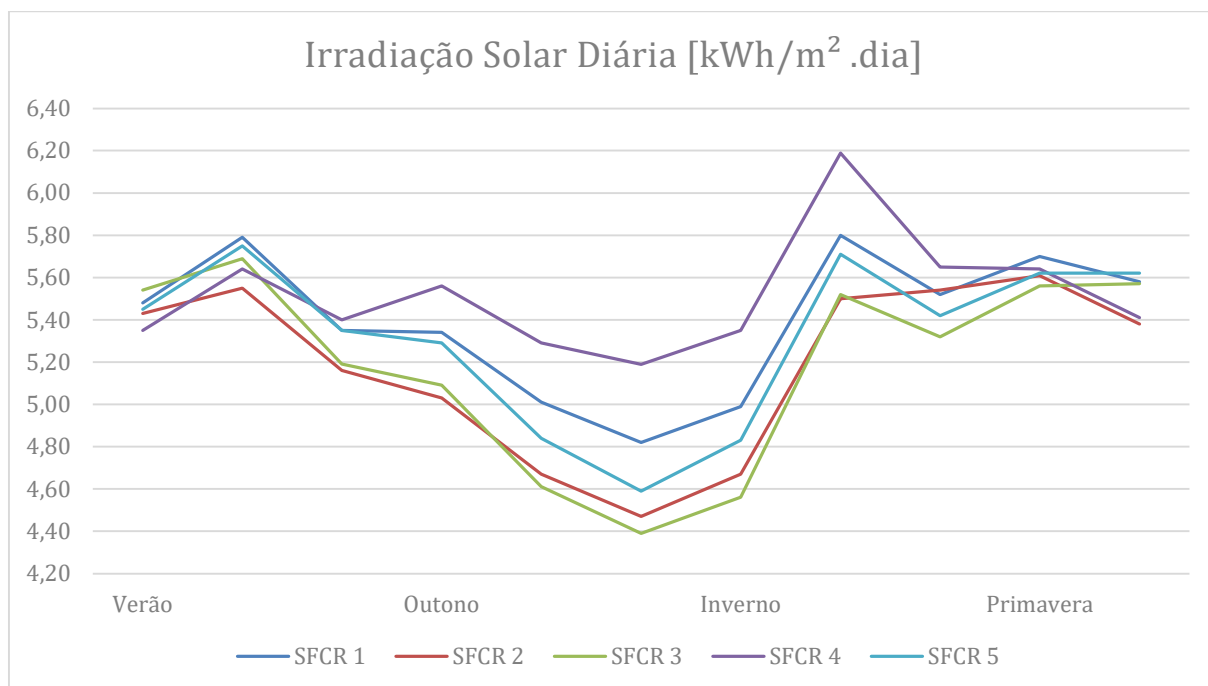
Tabela 22 – Irradiação solar mensal efetiva na inclinação dos sistemas fotovoltaicos

	SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3	SFCR 4	SFCR 5
Janeiro	5,48	5,43	5,54	5,35	5,45
Fevereiro	5,79	5,55	5,69	5,64	5,75
Março	5,35	5,16	5,19	5,40	5,35
Abril	5,34	5,03	5,09	5,56	5,29
Maio	5,01	4,67	4,61	5,29	4,84
Junho	4,82	4,47	4,39	5,19	4,59
Julho	4,99	4,67	4,56	5,35	4,83
Agosto	5,8	5,50	5,52	6,19	5,71
Setembro	5,52	5,54	5,32	5,65	5,42
Outubro	5,7	5,61	5,56	5,64	5,62
Novembro	5,58	5,38	5,57	5,41	5,62
Dezembro	5,62	5,51	5,72	5,48	5,64

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Se analisarmos o gráfico da figura 14, que mostra a quantidade de irradiação solar que incide sobre os sistemas fotovoltaico após as devidas correções de orientação e inclinação de cada um, podemos observar como as estações do ano causam um efeito sazonal em seus valores.

Figura 14 - Irradiação Solar Diária no plano de cada SFCR



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

É possível notar também, que os valores de irradiação solar que incidem sobre um painel dependem diretamente de sua localização geográfica, estação do ano, e das condições em que esse painel foi instalado: orientação e inclinação.

5. AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

Nesse capítulo são mostrados os resultados obtidos através do cálculo dos indicadores de desempenho dos cinco sistemas fotovoltaicos conectados à rede, e são feitas as comparações da seguinte forma:

1. Análise Comparativa 1: Comparação feita entre os sistemas fotovoltaicos 1, 2 e 3, que possuem a mesma potência CA instalada, de 20 kW, porém condições meteorológicas, geográficas, de tecnologia, orientação e inclinação diferentes. Estando instaladas nas cidades de Araporã, Aparecida de Goiânia e Itumbiara.
2. Análise Comparativa 2: Comparação feita entre os sistemas fotovoltaicos 4 e 5, que possuem potências CA próximas, porém condições meteorológicas, geográficas, orientação e inclinação diferentes. Estando instaladas nas cidades de Itumbiara e Cachoeira Dourada.
3. Análise Comparativa 3: Comparação feita entre todos os sistemas fotovoltaicos do estudo.

A fim de aumentar a confiabilidade do estudo, através da absorção das informações obtidas em outros estudos sobre os valores médios dos indicadores calculados no Brasil, foram consultados e usados como referência os dados obtidos nos estudos de Almeida (2012), Benedito (2009), Konzen (2014), Quaglia (2010), Oliveira (2002) e Salamoni (2009).

O estudo de Quaglia (2010) estimou a produtividade final média e o fator de capacidade médio para cada região do país, concluindo que na região centro-oeste os valores são de 1.460 kWh/kWp e 16,6%, respectivamente. Contudo, esses valores não foram obtidos através de estudos de casos reais, são valores que se apoiam apenas na literatura e aproximações de outros trabalhos. Portanto, seu estudo nos guia em uma direção mais assertiva, mas não define valores objetivos que devam ser levados como via de regra.

O estudo de Benedito (2009) já aborda casos reais, e com isso, obtém valores menores em seus indicadores. Estudando instalações espalhadas em todo Brasil, ele define que o fator capacidade varia entre 12,3% e 14,7%, e a produtividade final anual é em média 1.259 kWh/kWp. E, apesar de obter valores de PR entre 70 e 80%,

ressalta o que Almeida (2012) e vários outros concluíram em seus estudos, que em sistemas reais o PR varia em torno de 60% e 80%. Já que os sistemas instalados por todo Brasil, nos telhados de comércios e residências, geralmente aproveitam a instalação civil já existente, com orientações e inclinações dos módulos sendo distantes do ideal para melhor aproveitamento da região.

Konzen (2014) estima de forma teórica, via simulações, o rendimento final por concessionária em todo território brasileiro. Considerando em seus cálculos uma taxa de desempenho de 75%, e utilizando os dados de irradiação solar no plano inclinado do Atlas Brasileiro de Energia Solar, para um sistema voltado para o norte e com inclinação igual a latitude, ele determina que em Goiás o rendimento é em média 1.571 kWh/kWp.

O estudo de Salamoni (2009) foi baseado em pesquisa documental, informações obtidas por meio de órgãos públicos, pesquisas bibliográficas em periódicos indexados, e bibliotecas virtuais associadas ao setor energético e à estatística social e econômica desses países. Ele se apoia em condições similares as de Quaglia e Konzen, utilizando valores de irradiação para superfícies posicionadas para o norte e com inclinação igual a latitude. Com isso, ela conclui em seu estudo que o rendimento final médio no Brasil é de 1.500 kWh/kWp.

Por fim, o estudo de Oliveira (2009), que se baseou em um sistema real instalado no laboratório de sistemas fotovoltaicos da USP sob condições de instalação ideais, orientação para o norte geográfico e inclinação igual a latitude, obteve um PR média de 81,4%, fator de capacidade variando entre 15,20% e 18,30%, e um rendimento final médio de 1.429 kWh/kWp.

Com essa vasta base de informações acerca dos indicadores de desempenho em território brasileiro, através dos estudos práticos e teóricos acima citados, podemos enfim dar seguimento ao estudo dos cinco sistemas fotovoltaicos mencionados e descritos nos capítulos anteriores, que são o alvo do trabalho em questão.

5.1 ANÁLISES COMPARATIVAS

5.1.1 Análise Comparativa 1

A primeira análise compara os sistemas fotovoltaicos conectados à rede 1, 2 e 3, que estão instalados nas cidades de Araporã, em Minas Gerais, Aparecida de Goiânia e Itumbiara, em Goiás. Eles possuem um relativo distanciamento geográfico, diferentes tecnologias em uso, e as configurações de instalação são diferentes em todos os casos.

A tabela 23 conta com um resumo prático das informações gerais da configuração dos sistemas em comparação nessa primeira análise.

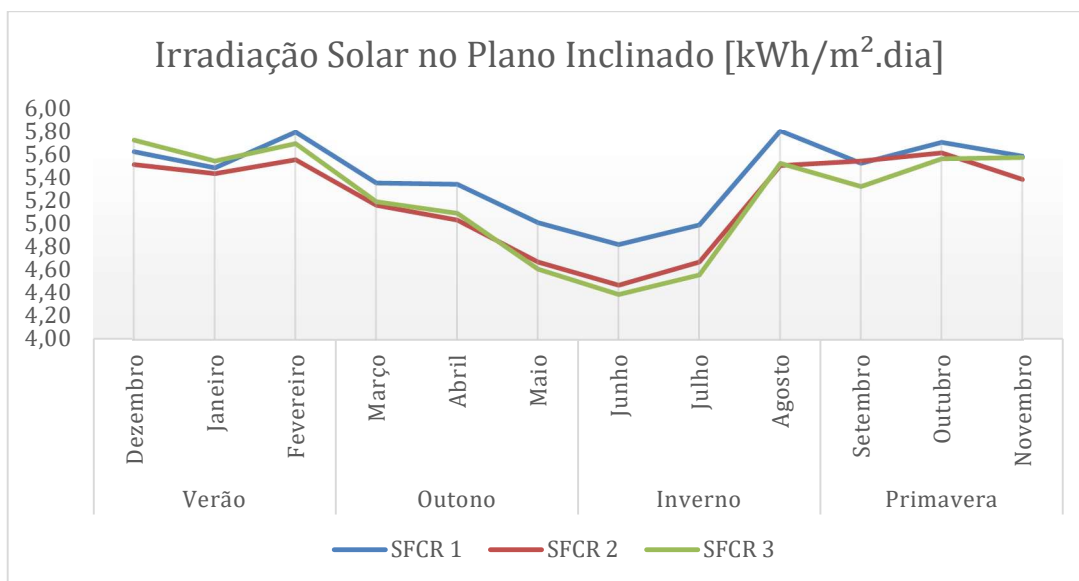
Tabela 23 - Resumo dos SFCR referentes à análise 1

SFCR	Latitude	Módulos Solares			Potência CA	Azimute	Inclinação
		Quantidade	Área Total	Potência CC			
1	18°	72	142,56 m ²	23,76 kWp	20 kW	30°	10°
2	16°	38	82,46 m ²	16,91 kWp	20 kW	18 módulos em 206°	10°
						02 módulos em 25°	
						18 módulos em 24°	
3	18°	60	115,20 m ²	23,70 kWp	20 kW	40 módulos em 65°	10°
						12 módulos em 243°	10°
						08 módulos em 242°	8°

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Ao analisar os valores médios de irradiação solar diária, corrigidos pelo Radiasol para o plano inclinado nas devidas configurações em que foram instalados, notamos que a variação da irradiação entre eles é baixa, porém não é nula. O SFCR 1 obteve vantagem, recebendo aproximadamente 4% a mais que o SFCR 2, e 3,57% a mais em relação ao SFCR 3. O gráfico da figura 15 mostra essa diferença mencionada, e também realça a variação sazonal da irradiação em relação as estações do ano, como já foi descrito no capítulo anterior.

Figura 15 - Gráfico de irradiação solar no plano inclinado dos SFCR 1, 2 e 3

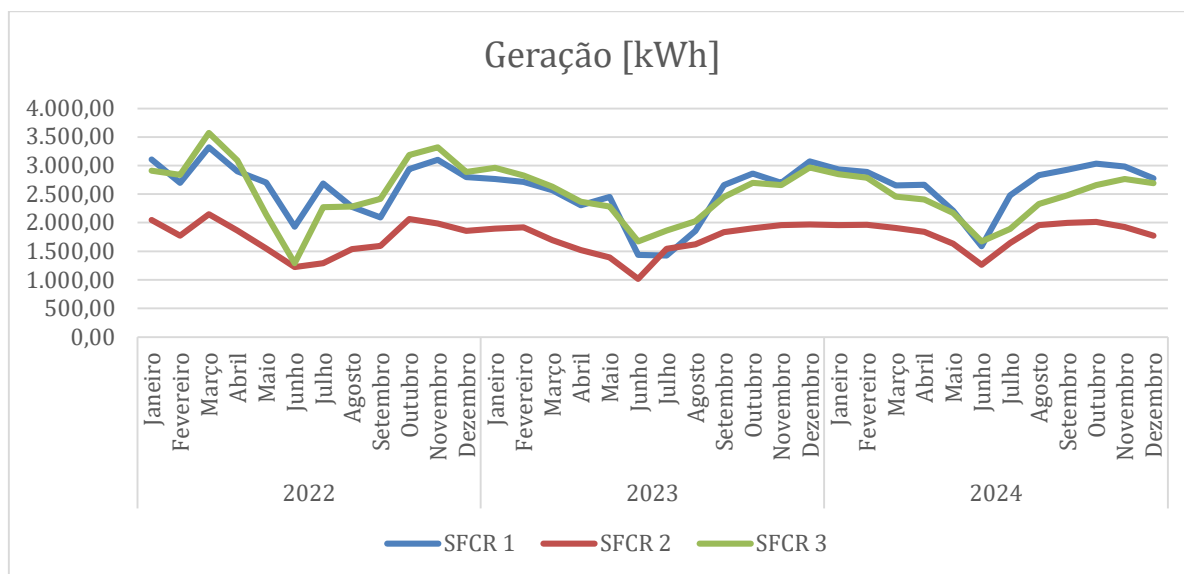


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na cidade de Araporã, na inclinação e orientação dos módulos que foram instalados no SFCR 1, a irradiação solar varia entre 4,82 e 5,80 kWh/m². dia. Já na cidade de Aparecida de Goiânia, os valores são entre 4,47 e 5,61 kWh/m². E na cidade de Itumbiara, a irradiação solar varia entre 4,39 a 5,72 kWh/m². Essa diferença se dá ao fato de que o SFCR 1 foi instalado em condições mais favoráveis que os demais, com orientação melhor direcionada para o norte geográfico e inclinação próxima da latitude.

Ao comparar a geração de energia de cada sistema, notamos que a geração dos sistemas fotovoltaicos 1 e 3 foram próximas e o sistema fotovoltaico 2 ficou bem abaixo das demais. Isso ocorreu porque a potência de entrada CC, do gerador fotovoltaico 2, é bem inferior as outras, que são bem próximas entre si. O gráfico da figura 16 explicita a diferença entre a geração de cada SFCR ao longo dos 3 anos do estudo.

Figura 16 - Gráfico de geração dos SFCR 1, 2 e 3



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Por conta de o SFCR 1 receber uma irradiação solar anual 3,57% vezes maior que o SFCR 3, sua geração foi 2.568,96 kWh maior ao longo dos 3 anos, resultando em 2,83% de energia a mais que o SFCR 3.

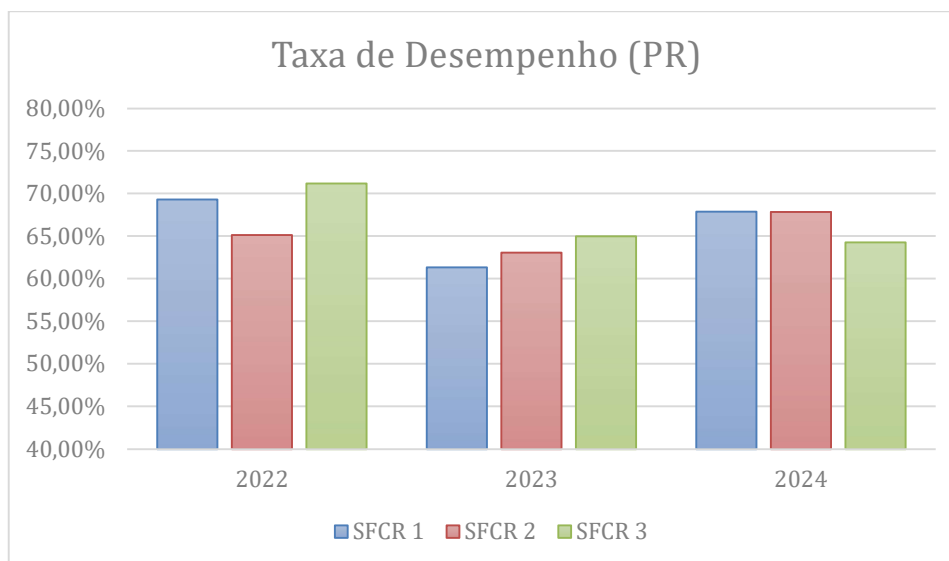
Comparando os valores anuais dos indicadores de taxa de desempenho (PR), fator capacidade e rendimento específico, notamos que todos os sistemas fotovoltaicos obtiveram resultados próximos no período de estudo.

A taxa de desempenho dos três sistemas fotovoltaicos, como mostra o gráfico da figura 17, obteve um desempenho superior a 60%, sendo a média deles 66,12%, variando entre 61,34% e 71,21%. Oliveira (2009) obteve um PR de 81,4%, porém o sistema que ele estudou estava perfeitamente direcionado para o norte e com inclinação ideal, igual a latitude. Portanto, considera-se apenas a faixa de PR que Almeida (2012) constatou que trabalham os sistemas reais, entre 60% e 80%, validando de forma satisfatória os resultados de PR obtidos.

Contudo, apesar de estar dentro da faixa esperada, observa-se que o PR do SFCR 3 decaiu de forma consecutiva durante os três anos de estudo. Possivelmente, não estão sendo feitas as manutenções regulares necessárias, aumentando assim o acúmulo de sujeira nos módulos solares, que, por sua vez, estão gerando cada vez menos energia.

Já os sistemas fotovoltaicos 1 e 2 tiveram pequenas quedas no PR de 2022, e em 2023 obtiveram melhores resultados, mantendo-se nas faixas de PR aceitáveis.

Figura 17 - Gráfico da taxa de desempenho dos SFCR 1,2 e 3

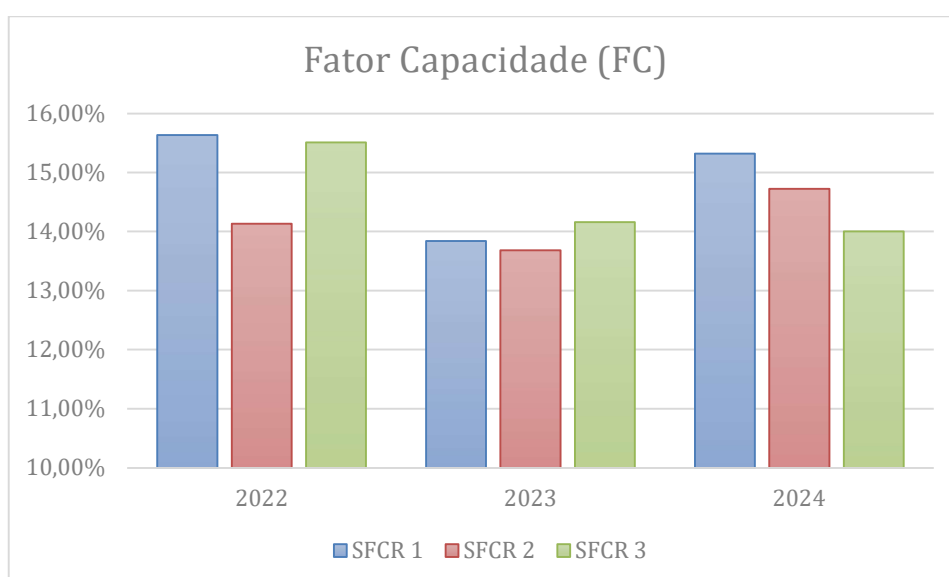


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

É possível notar que o desempenho do SFCR 3 decaiu durante os três anos de estudo, constatando que não foram feitas as manutenções regulares, ocorrendo então um aumento gradual no acúmulo de sujeira nos módulos solares, resultando em um desempenho cada vez menor.

Analisando os valores anuais de fator capacidade obtidos, observa-se uma variação geral entre 13,68% e 15,64% ao longo dos três anos do estudo, sendo em média 14,56%, como mostra o gráfico da figura 18.

Figura 18 - Gráfico do fator capacidade dos SFCR 1, 2 e 3



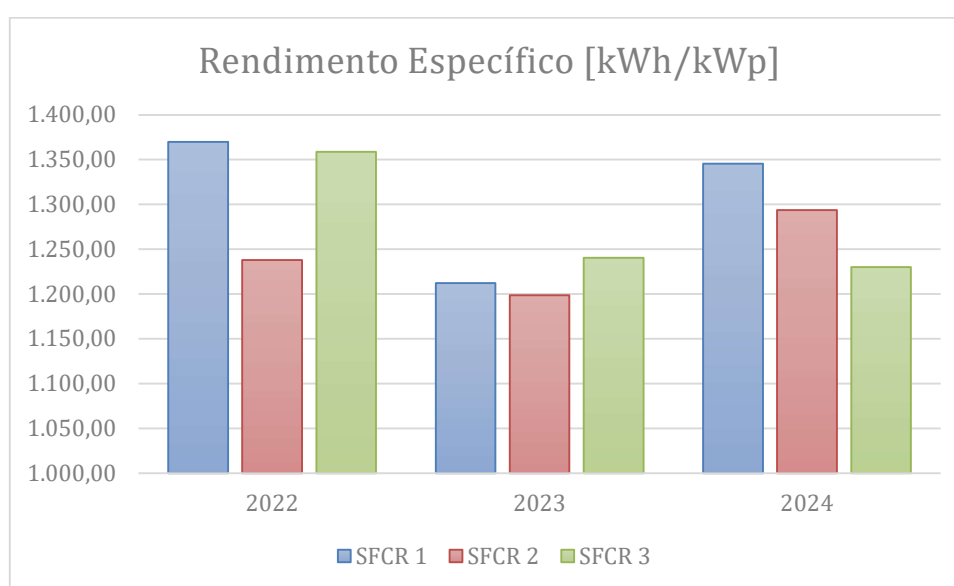
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Utilizando-se dos resultados obtidos nos estudos de Benedito (2009), Oliveira (2009), Konzen (2014) e Quaglia (2010), observa-se novamente que os estudos teóricos possuem estimativas acima do que se obtém em campo. Enquanto Quaglia diz que a média de FC em território brasileiro é de 16,6%, e Konzen varia entre 15,70% e 18,50%, nosso resultado se enquadra novamente na faixa que Benedito estipula em seus cálculos que estão os sistemas reais, entre 12% e 18%. Oliveira chega em valores próximos aos de Konzen, porém, como já mencionado, o sistema da LSF/USP está instalado em condições ideais de desempenho, algo que não se consegue com facilidade, ou baixo custo monetário, nas residências pelo Brasil.

Os valores de rendimento específico dos três sistemas fotovoltaicos ao longo dos três anos do estudo variaram entre 1.190 e 1.400 kWh/kWp, com valor médio de 1.276,37 kWh/kWp. Ficando novamente abaixo dos valores médios estimados pelos estudos teóricos, Quaglia, Konzen e Salamoni. Contudo, os estudos de ambos são teóricos, e no cálculo do rendimento foram usados um PR de 75%, valor superior à média que obtivemos em estudo.

Porém, quando olharmos para o estudo de Benedito, vemos que em seus casos o rendimento final médio é de 1.259 kWh/kWp, próximo ao valor médio que encontramos. Segue abaixo o gráfico da figura 19 contendo o rendimento específico dos três sistemas ao longo dos três anos.

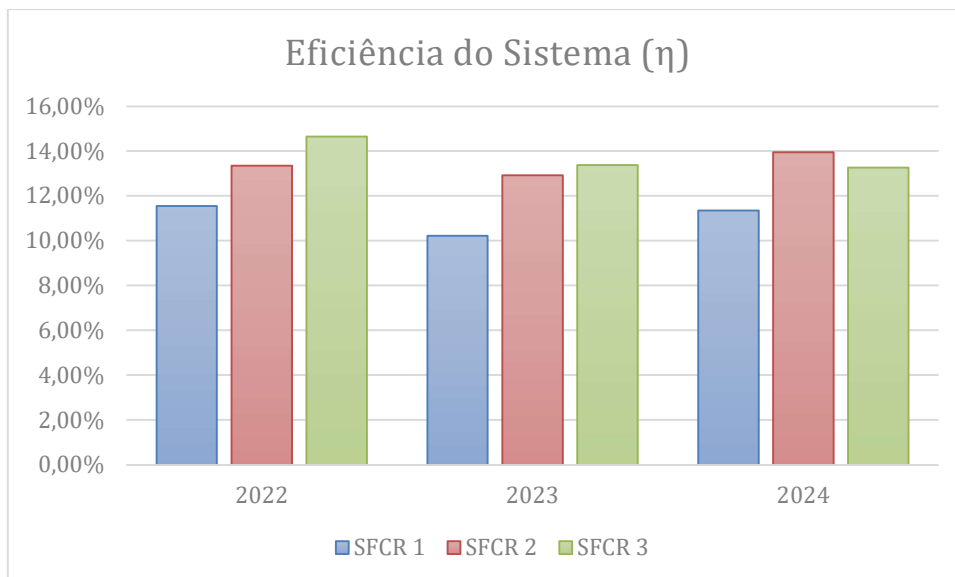
Figura 19 - Gráfico do rendimento específico dos SFCR 1, 2 e 3



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A eficiência dos três sistemas variou entre 10,22% e 14,66%, sendo o ano de 2023 o pior ano de eficiência para todos eles, como mostra o gráfico da figura 20 abaixo.

Figura 20 - Gráfico da eficiência do sistema dos SFCR 1, 2 e 3



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O SFCR 1 obteve os menores valores de eficiência durante os três anos consecutivos do estudo, variando entre 10,22% e 11,55%, enquanto o SFCR 2 variou entre 12,93% e 13,95%, e o SFCR 3 variou entre 13,27% e 14,66%, obtendo os melhores resultados entre todos.

A área dos módulos desempenhou grande influência nos resultados de eficiência, uma vez que a eficiência do sistema é inversamente proporcional a área dos módulos. Enquanto o SFCR 1 possui uma área total de 142,56 m², para uma potência cc de 23,76 kWp, o SFCR 3 possui 115,20 m², para uma potência cc quase igual ao SFCR 1, de 23,70 kWp, e o SFCR 2 com 82,46 m², para seus 16,91 kWp de potência cc.

Podemos notar que assim como ocorreu um decaimento na taxa de desempenho, também houve um decaimento na eficiência e no rendimento específico do SFCR 3 ao longo dos três anos de estudo. Sendo perfeitamente plausível a conclusão de que o sistema está acumulando sujeira em seus módulos, o que o impede de obter os melhores ganhos de energia possível.

5.1.2 Análise Comparativa 2

A segunda análise comparativa foi feita entre os sistemas fotovoltaicos conectados à rede 4 e o 5, que possuem inversores com potência nominal similar. Sendo o SFCR 4 instalado com um inversor de 33 kW, e o SFCR 5 instalado com 4 inversores de 8,3 kW, totalizando 33,20 kW. Eles estão instalados nas cidades de Itumbiara e Cachoeira Dourada, respectivamente, e estão a uma distância aproximada de 34 km. A potência instalada dos módulos do sistema 5 é consideravelmente maior que do sistema 4, contendo ao todo 8,10 kWp a mais, como mostra a tabela 24.

Tabela 24 - Resumo dos SFCR referentes à análise 2

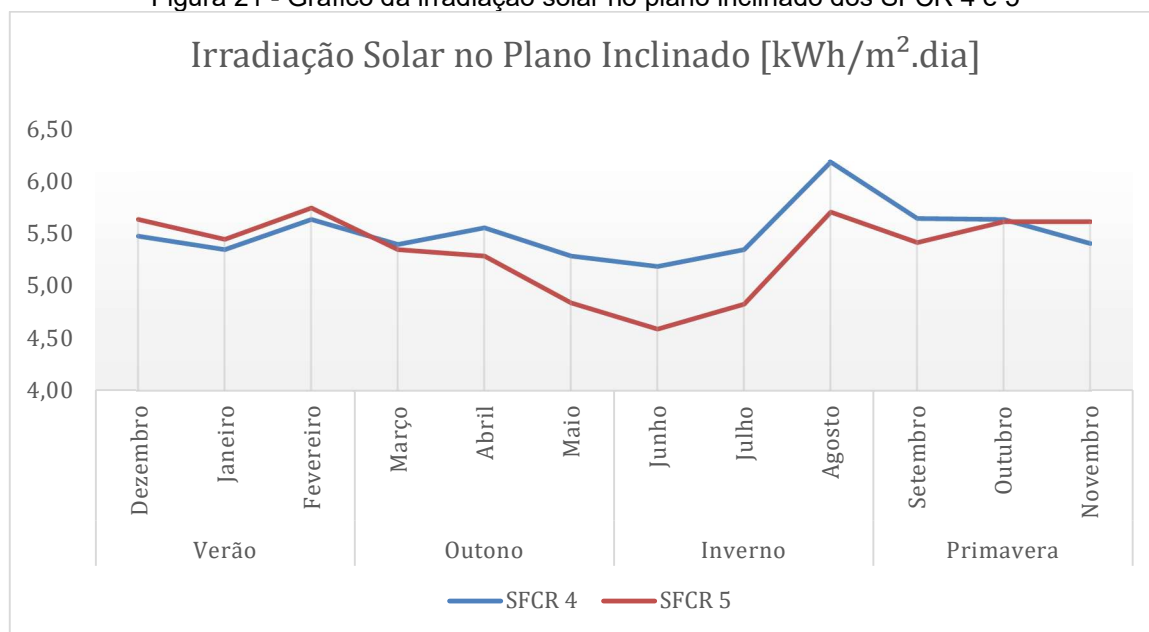
SFCR	Latitude	Módulos Solares			Potência CA	Azimute	Inclinação
		Quantidade	Área Total	Potência CC			
4	18°	76	165,68 m ²	34,20 kWp	33 kW	56 módulos em 2°	15°
						20 módulos em 6°	
5	18°	94	204,92 m ²	42,30 kWp	33,20 kW	307°	85x10°
							29x8°

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Após correção da irradiação solar no plano inclinado que atinge cada um dos dois SFCR, notamos que a variação entre as duas é relativamente baixa. Devido a melhor configuração dos módulos do o SFCR 4, voltados ao norte com azimutes de 2° e 6°, e inclinação mais próxima a latitude, ele recebe 3,18% mais irradiação solar estimada que o SFCR 5.

Enquanto o SFCR 4 recebeu entre 5,19 e 6,19 kWh/m². dia ao longo do ano, o SFCR 5 recebeu entre 4,59 e 5,75 kWh/m². dia, como mostra o gráfico da imagem 21.

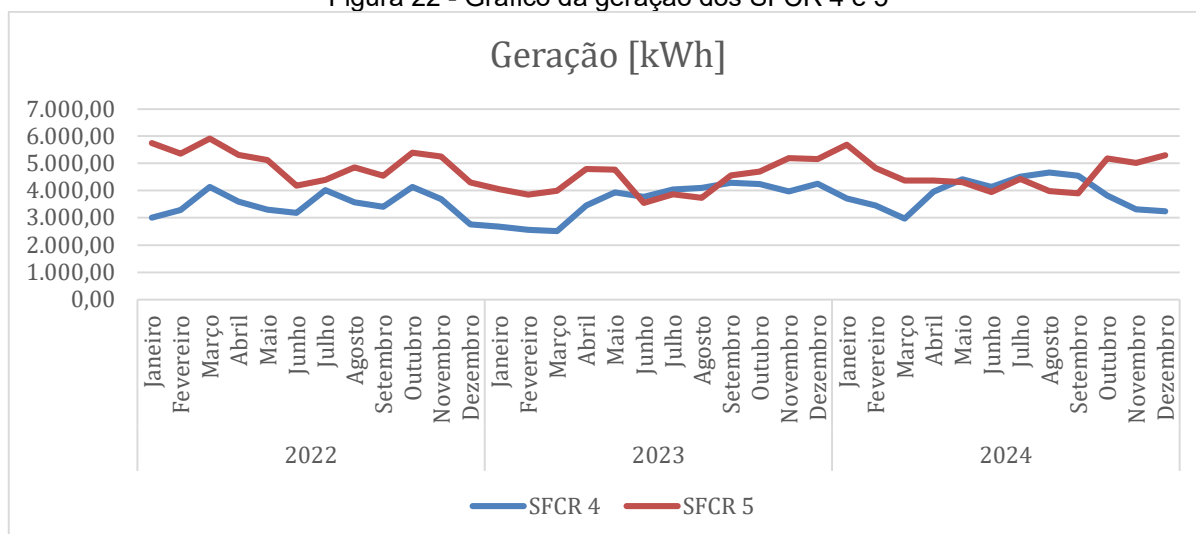
Figura 21 - Gráfico da irradiação solar no plano inclinado dos SFCR 4 e 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na geração, apesar da irradiação solar que atinge o sistema fotovoltaico 4 ser 3,18% maior, como o sistema fotovoltaico 5 tem potência pico 23,68% maior, ele gerou muito mais energia que o sistema fotovoltaico 4. Ao longo dos três anos de estudo, o sistema fotovoltaico 4 gerou 132.630,75 kWh, enquanto o sistema fotovoltaico 5 gerou 167.872,66 kWh, superando o sistema fotovoltaico 4 em 26,57%. O gráfico da figura 22 evidencia essa diferença.

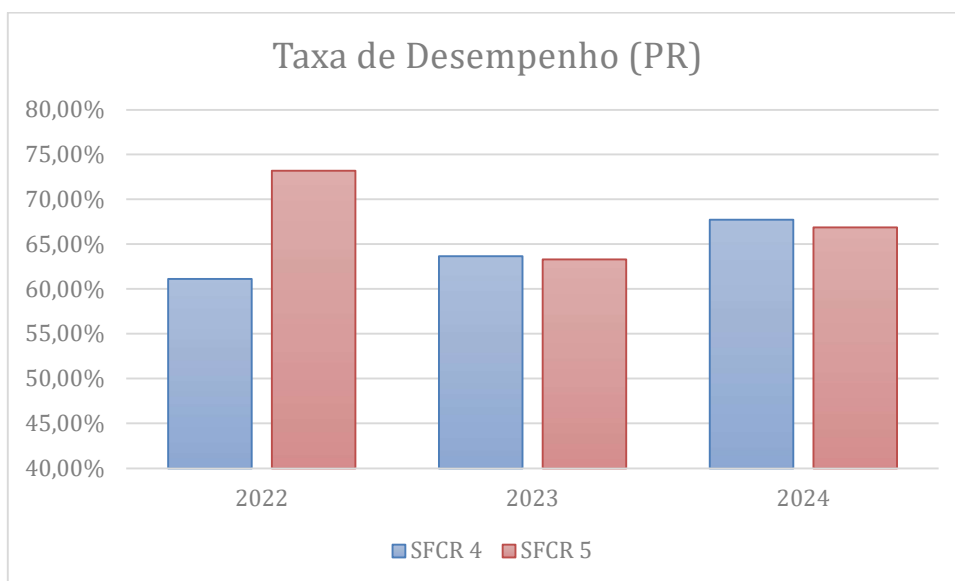
Figura 22 - Gráfico da geração dos SFCR 4 e 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Analisando anualmente a taxa de desempenho dos sistemas, a média dos sistemas foi de 65,99%, com máximo de 73,21% e mínimo de 61,15%. Comparando esses valores com os estudos de Almeida (2012), o PR alcançado está dentro do esperado em sistemas reais. Como evidencia o gráfico da figura 22, o SFCR 4 variou entre 61,15% e 67,76%, e o SFCR 5 variou entre 63,32% e 73,21%.

Figura 23 - Gráfico da taxa de desempenhos dos SFCR 4 e 5



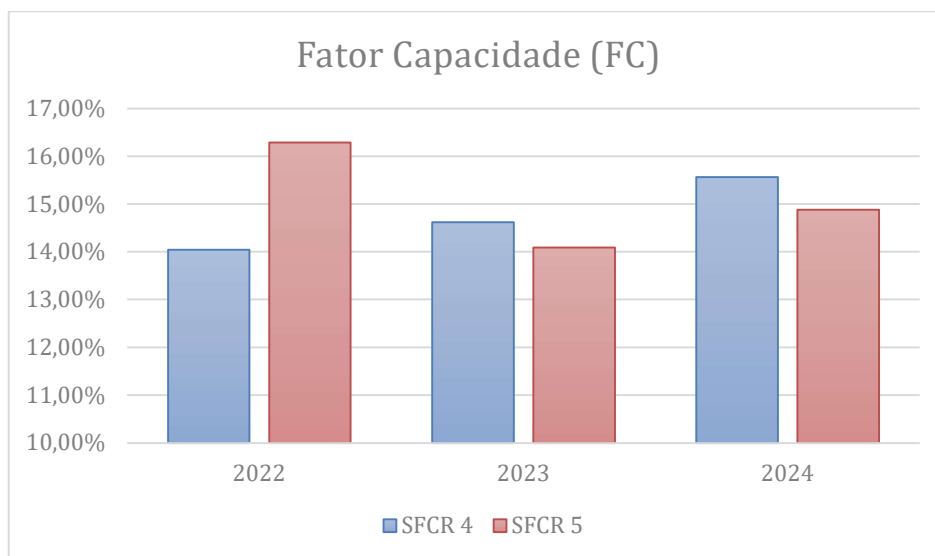
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Entre 2022 e 2023 ocorreu uma redução significativa na taxa de desempenho do sistema 5. Analisando essa variação e a geração diária durante o ano de 2023, se deduz que o sistema estava gerando menos energia devido a sujeira acumulada em seus módulos. Recuperando parcialmente sua geração e desempenho em 2024.

Analisando o fator de capacidade dos sistemas, os valores obtidos nos três anos do estudo ficaram na faixa entre 14,04% e 16,29%, justamente na zona de 12% a 18% estabelecida por Benedito (2009) em seu estudo, quase atingindo as estimativas teóricas de Quaglia (2010) e Konzen (2014), e o estudo prático de Oliveira (2002).

O SFCR 4 variou entre 14,04% e 15,56%, com uma média de 14,74%, enquanto o SFCR 5 variou entre 14,09% e 16,29%, com uma média de 15,09%, como mostra o gráfico da figura 24 abaixo.

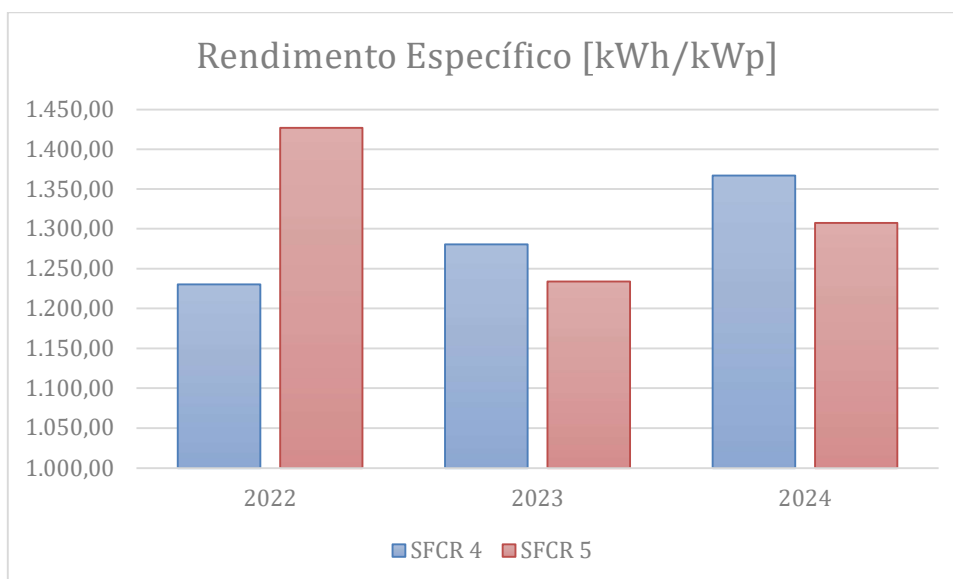
Figura 24 - Gráfico do fator capacidade dos SFCR 4 e 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os valores obtidos de rendimento específico dos sistemas fotovoltaicos 4 e 5, ao longo dos três anos do estudo, variaram entre 1.230,27 e 1.426,94 kWh/kWp, com valor médio entre eles de 1.307 kWh/kWp, ficando abaixo dos valores teóricos médios estimados por Quaglia, de 1.460 kWh/kWp, Konzen, de 1.571 kWh/kWp, e Salamoni, de 1.500 kWh/kWp. Porém, ambos ficaram acima do estudo prático de Benedito, que estimou média de 1.259 kWh/kWp. O gráfico da figura 25 resume os dados descritos acima acerca do rendimento dos três sistemas.

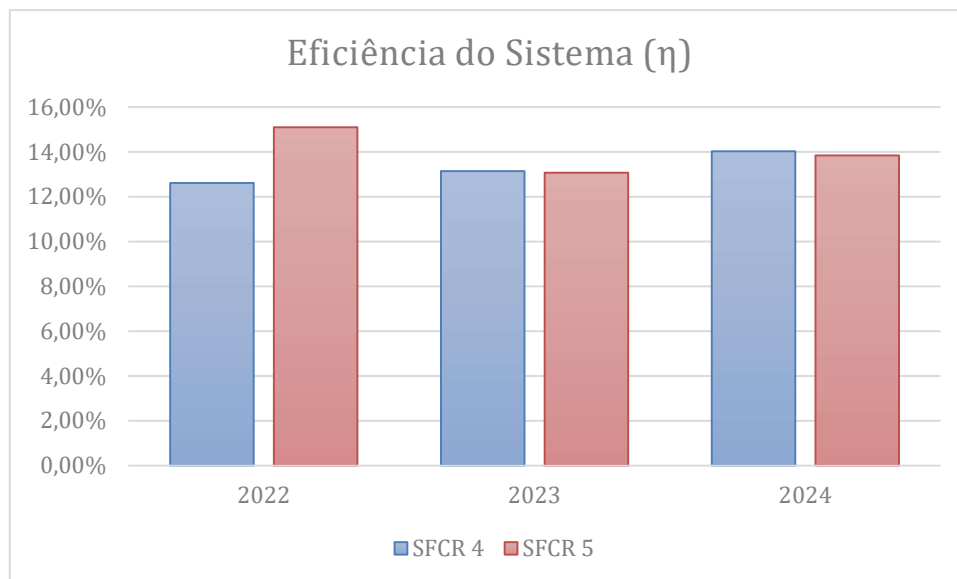
Figura 25 - Gráfico do rendimento específico dos SFCR 4 e 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A eficiência dos sistemas 4 e 5 variou entre 12,62% e 15,11%, com valor médio geral de 13,64%, como mostra o gráfico da figura 26.

Figura 26 - Gráfico da eficiência do sistema dos SFCR 4 e 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Um fator que auxiliou o sistema 5 a obter melhores resultados de desempenho e eficiência que o sistema 4, é o fato de que o sistema é composto por 4 inversores com múltiplas MPPTs, reduzindo assim as perdas por sombreamento e mismatch, melhorando a eficiência e o desempenho do sistema.

5.1.3 Análise Comparativa 3

A terceira análise é feita entre todos os sistemas fotovoltaicos do estudo, descritos em resumo na tabela 25.

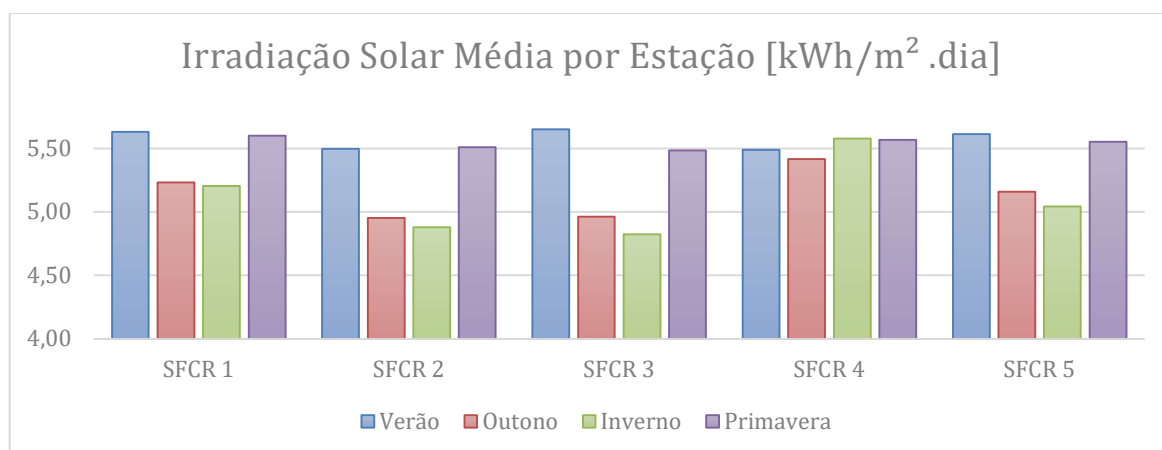
Tabela 25 - Resumo dos SFCR referentes à análise 3

SFCR	Latitude	Módulos Solares			Potência CA	Azimute	Inclinação
		Quantidade	Área Total	Potência CC			
1	18°	72	142,56 m ²	23,76 kWp	20 kW	30°	10°
2	16°	38	82,46 m ²	16,91 kWp	20 kW	18 módulos em 206°	10°
						2 módulos em 25°	
						18 módulos em 24°	
3	18°	60	115,20 m ²	23,70 kWp	20 kW	40 módulos em 65°	10°
						12 módulos em 243°	10°
						8 módulos em 242°	8°
4	18°	76	165,68 m ²	34,20 kWp	33 kW	56 módulos em 2°	15°
						20 módulos em 6°	
5	18°	94	204,92 m ²	42,30 kWp	33,20 kW	307°	85x10°
							29x8°

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Se analisarmos o gráfico da estimativa de irradiação solar média que incide todos os sistemas durante as estações do ano, como mostra a figura 27, e compararmos com as informações da tabela 25, que mostra a configuração de cada um dos sistemas, podemos perceber como a orientação e inclinação dos sistemas interfere na irradiação solar que incide sobre eles.

Figura 27 - Irradiação solar média estimada durante as estações do ano



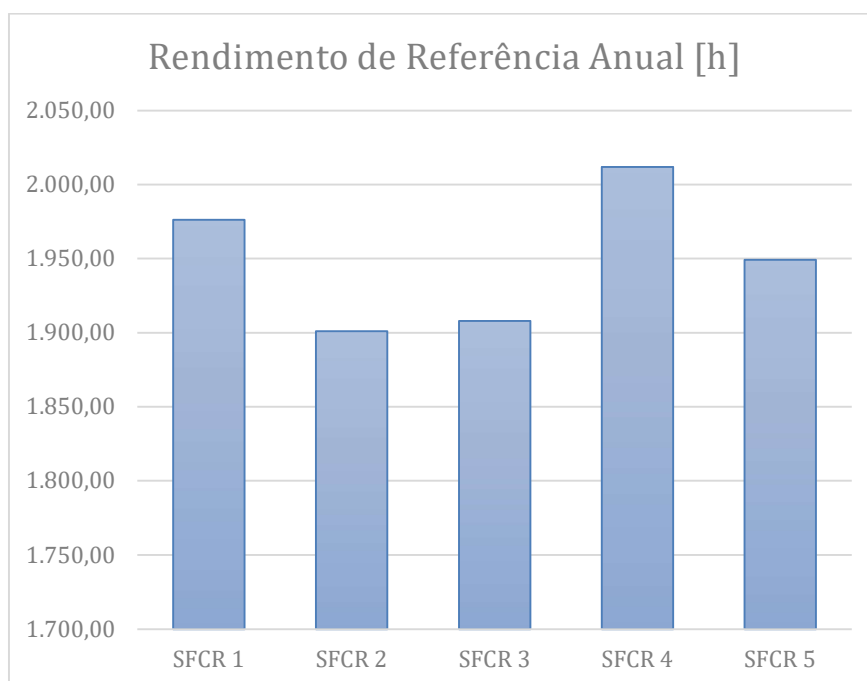
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O sistema 4, que possui as melhores orientações para o norte, com azimutes de 2° e 6°, e inclinação de 15°, quase igual a latitude que equivale a 18°, recebe mais energia e possui menores variações durante o ano. Em contrapartida, sistemas com configuração mais desfavoráveis, como o sistema 2, 3 e 5, recebem menos energia e possuem uma variação maior ao longo do ano.

As variações sazonais influenciam a irradiação solar que incide sobre os módulos, influenciando, por consequência, a geração de energia do sistema fotovoltaico. As condições climáticas de cada estação aparecem de forma suave, se o sistema for instalado em condições ideais ou próximas a ela, que é o exemplo do SFCR 4, ou de forma mais agressiva, caso o sistema seja instalado de forma não tão favorável, como é o exemplo do SFCR 3.

Após encontrar a irradiação solar para cada uma das cidades, realizar as correções para as orientações e inclinações dos telhados de cada um dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, obtemos os valores mostrados no gráfico da figura 28 e na tabela 26. Chamado de rendimento de referência, e conhecido popularmente como “horas sol pico”, ele representa a quantidade de horas equivalente a uma irradiância de 1.000 W/m², considerando um ano com 365 dias, atinge cada sistema fotovoltaico.

Figura 28 - Gráfico do rendimento referência de todos os SFCR



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

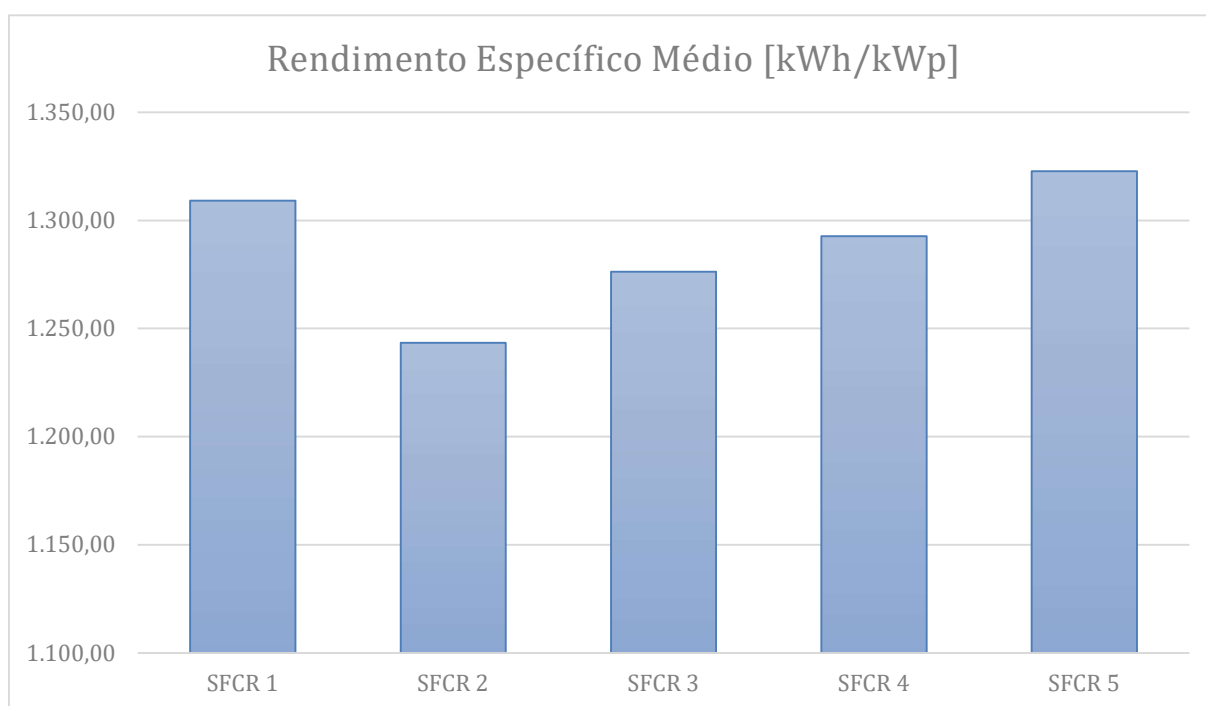
Tabela 26 - Tabela do rendimento de referência de todos os SFCR

	Rendimento de Referência [h]
SFCR 1	1.976,37
SFCR 2	1.901,05
SFCR 3	1.908,12
SFCR 4	2.011,92
SFCR 5	1.949,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os sistemas 2 e 3 obtiveram valores menores de potencial solar devido à orientação e inclinação desfavorável dos painéis. Já os sistemas 1 e 5 tiveram melhores resultados. E o sistema 4 superou as 2.000 horas de sol pico anual.

Figura 29 - Gráfico do rendimento específico de todos os SFCR

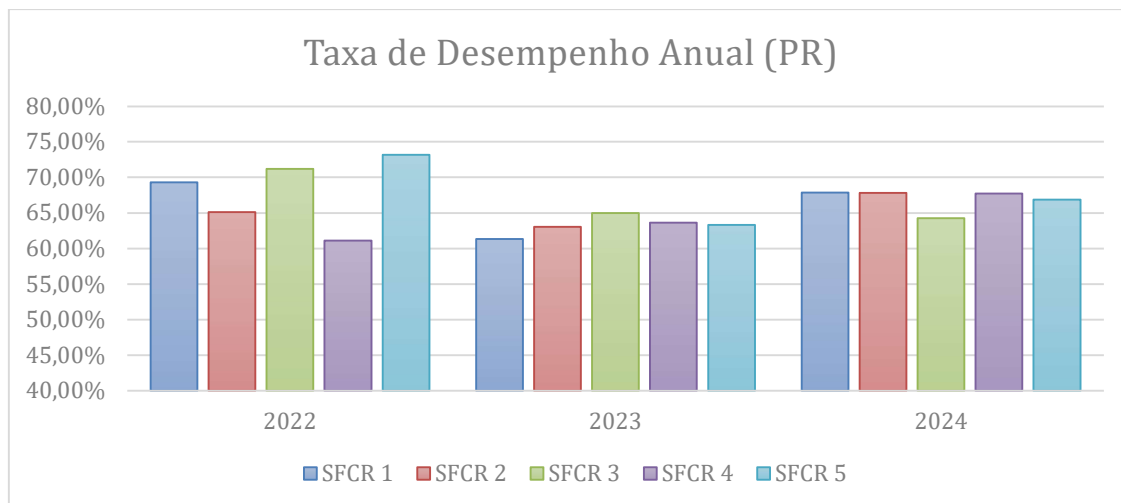


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O rendimento específico, mostrado no gráfico da figura 29, mostrou o aproveitamento do potencial solar de cada sistema fotovoltaico. Considerando todas as usinas em estudo, a média de rendimento específico foi de 1.288,94 kWh/kWp, variando entre 1.198,66 e 1.426,94 kWh/kWp, como mostra o gráfico da figura 27 acima. O sistema 2 não atingiu o valor médio de 1.259 kWh/kWp, sendo o único que ficou abaixo do valor obtido por Benedito (2009).

Analisando a taxa de desempenho de todos os sistemas, houve uma variação de 60 a 74%, com média aproximada de 66%. Padronizando uma média de 64% no desempenho dos sistemas, como mostra o gráfico da figura 28 abaixo.

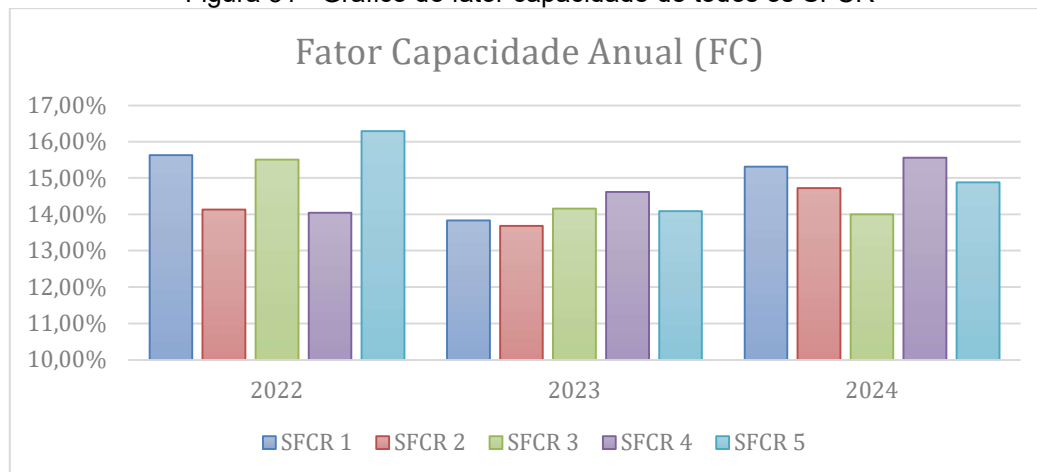
Figura 30 - Gráfico da taxa de desempenho de todos os SFCR



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Levando em consideração que Benedito (2009) e Almeida (2012) em seus estudos determinar que para sistemas reais os valores de PR variam entre 60 e 80%, os resultados obtidos nesse estudo são validados e estão dentro do esperado para um sistema bem instalado, acompanhando orientações de telhados residenciais e comerciais. Para resultados melhores, se faz necessário o uso de estruturas no solo, com orientação e inclinação ótimas, ou com o uso de rastreadores solares.

Figura 31 - Gráfico do fator capacidade de todos os SFCR



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O fator capacidade dos casos estudados ficaram entre 13,68% e 16,29%, com média de 14,70%. Sendo assim, sendo equivalentes a faixa obtida por Benedito (2009), que obteve valores entre 12,30% e 14,70%.

De forma geral, a tabela 27 mostra os valores médios obtidos por cada sistema fotovoltaico conectado à rede nos três anos de estudo, e a média entre todos eles.

Tabela 27 - Médias dos indicadores de cada SFCR

	SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3	SFCR 4	SFCR 5	Média Geral
Eficiência do Sistema	11,04%	13,41%	13,77%	13,27%	14,01%	13,10%
Rendimento de Referência	1.978,30	1.902,90	1.910,02	2.013,80	1.951,16	1.951,23
Rendimento Específico	1.309,22	1.243,48	1.276,41	1.292,70	1.322,87	1.288,94
Taxa de Desempenho	66,18%	65,34%	66,83%	64,19%	67,80%	66,07%
Fator de Capacidade	14,93%	14,18%	14,56%	14,74%	15,09%	14,70%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do estudo dos indicadores de desempenho, e a comparação de seus resultados, foi possível compreender o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, e os fatores que afetam o seu desempenho. Foram também, utilizados dados de análise obtidos em outros trabalhos, aumentando a quantidade de informações acerca do tema.

O trabalho mostrou que os indicadores mais utilizados para avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos são a taxa de desempenho, eficiência do sistema, fator capacidade, rendimento de referência e específico, e que, por meio deles, podemos comparar sistemas diferentes em tecnologia, localização geográfica e configuração. E que esses indicadores são afetados pela configuração em que o sistema foi instalado, a orientação e inclinação dos módulos, e a irradiação solar incide sobre o mesmo, e que ela varia por influência de fator climáticos e estações no ano.

Com isso, obtivemos um rendimento específico médio equivalente a 1.288 kWh/kWp, taxa de desempenho variando entre 60% e 72%, um fator capacidade médio de 14,7%, e uma eficiência global do sistema entre 10 e 16%. Sendo estes, indicadores que variam sazonalmente durante o ano, e, variam também de ano para ano conforme degradação do sistema, presença ou ausência das manutenções, falhas operacionais e fatores climáticos, contendo maior ou menor presença de nebulosidade.

Observamos que, os resultados obtidos foram de encontro com outros estudos de casos reais, considerando suas devidas diferenças, e ficaram abaixo de estimativas de casos teóricos, pois os mesmos consideram cenários ideais de instalação e irradiação solar.

Portanto, os valores obtidos fazem sentido para sistemas que utilizam de telhados de consumidores gerais, que desejam reduzir seus custos com energia aproveitando a estrutura civil já presente, onde as configurações da instalação não poderão ser feitas de forma maximizada, voltadas para o norte (azimute de 0°) e com inclinação igual a latitude. Vale ressaltar que sistemas em que a instalação é feita no solo, com orientação voltada para o hemisfério norte onde o azimute é de 0°, ou com rastreadores solares, os valores obtidos nos indicadores de desempenho serão superiores.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **QUALIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. Orientador: Dr. Roberto Zilles. 2012. 173 p. Dissertação (Mestrado em Energia.) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída: **Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016.

BEN: Relatório Síntese. **BEN 2023**: Relatório Síntese 2023, Brasil, p. 01-65, 2023.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **CARACTERIZAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ELETRICIDADE POR MEIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE, NO BRASIL, SOB OS ASPECTOS TÉCNICO, ECONÔMICO E REGULATÓRIO**. Orientador: Dr. Roberto Zilles. 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

HEIN, H. **Brasil foi o 4º país que mais acrescentou energia solar no mundo em 2022**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/brasil-foi-o-4o-pais-que-mais-acrescentou-energia-solar-no-mundo-em-2022/>>. Acesso em: 17 dez. 2025.

HEIN, H. **Financiamento para energia solar somou R\$ 35,1 bi em 2022**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/financiamento-para-energia-solar-somou-mais-de-r-35-bi-em-2022/>>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KONZEN, Gabriel. **Difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil: uma simulação via modelo de Bass**. 2014. 109 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - USP, São Paulo, 2014.

MARKOVIC, Milan LJ.; CIRIC, Rade M. Efficiency Analysis of Grid-connected Photovoltaic Power Plants. **CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS**, Santo André, ano 2017, v. 03, n. 03, p. 269-277, 14 set. 2017.

OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ELETRICIDADE; INSERÇÃO DE EDIFICAÇÕES FOTOVOLTAICAS CONECTADAS À REDE NO ESTADO DE SÃO PAULO**. Orientador: Dr. Roberto Zilles. 2002. 205 p. Tese (doutorado em Energia.) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. ISBN 978-85-17-00089-8.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. Rio de Janeiro: CEP/CRESEB, 2014. 530 p.

QUAGLIA, Renato Brito. **Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos: cenários para o setor elétrico brasileiro**. Orientador: Sérgio Henrique Ferreira de Oliveira. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010.

RIOS, M. **Gerador solar fotovoltaico mais antigo do Brasil completa 25 anos**. Disponível em: < <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53226218/gerador-solar-fotovoltaico-mais-antigo-do-brasil-completa-25-anos>>. Acesso em: 17 dez. 2025.

SALAMONI, Isabel Tourinho. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. Orientador: Ricardo Rüther. 2009. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. 452 p. ISBN 978-85-60025-06-0.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. 452 p.