

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE RODRIGUES TAVARES
MATHEUS VIEIRA EMILIANO CAMARGO

**DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE NO TOCANTINS**

PALMAS-TO

2026

FELIPE RODRIGUES TAVARES
MATHEUS VIEIRA EMILIANO CAMARGO

**DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE NO TOCANTINS**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal do
Tocantins, Campus Palmas.

Orientador(a): Dr. Brunno Henrique Brito

PALMAS-TO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- T231d Tavares, Felipe Rodrigues
 DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS
 À REDE NO TOCANTINS / Felipe Rodrigues Tavares, Matheus Vieira
 Emiliano Camargo. – Palmas, TO, 2026.
 71 p. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2026.
- Orientador: Dr. Brunno Henrique Brito
1. Energia Fotovoltaica. 2. Desempenho de sistemas fotovoltaicos no
 Tocantins. I. Camargo, Matheus Vieira Emiliano. II. Brito, Brunno Henrique
 III. , . IV. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FELIPE RODRIGUES TAVARES
MATHEUS VIEIRA EMILIANO CAMARGO

DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NO TOCANTINS

Trabalho de conclusão de curso (TCC),
apresentado ao Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO),
como parte das exigências para a obtenção do
título de bacharel em engenharia elétrica.

Palmas/TO, 27 de Maio de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **BRUNNO HENRIQUE BRITO**
Data: 28/05/2026 12:05:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Brunno Henrique Brito
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **LAURA FILALLEPE ALVES**
Data: 28/05/2026 18:21:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Eletricista Laura Fillálope Alves
Avaliadora

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE TOZZI BITTENCOURT**
Data: 28/05/2026 11:44:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Felipe Tozzi Bittencourt
Avaliador

RESUMO

O crescimento exponencial da geração distribuída fotovoltaica no Brasil demanda estudos regionais profundos que quantifiquem o impacto de variáveis construtivas e climáticas no rendimento real das usinas. Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa do desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados no estado do Tocantins, compreendendo o triênio de 2023 a 2025. A metodologia adotou uma abordagem quantitativa baseada no cálculo dos indicadores de produtividade específica (*Yield*) e eficiência global (*Performance Ratio* — PR), utilizando dados reais de geração de uma amostra depurada de 1.527 sistemas válidos, distribuídos em quatro macrorregiões do estado: Bico do Papagaio, Norte-Centro, Central e Sul. O recurso solar de referência foi obtido por meio de dados históricos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os sistemas foram estratificados conforme a orientação azimutal dos módulos (Norte, Leste, Oeste, Leste/Oeste e Sul) e inclinação plana (Reto a 0°). Os resultados consolidados confirmaram a hegemonia das orientações Norte e Reto, que registraram os maiores índices de eficiência e produtividade, atingindo PRs médios de até 78,68% (na região do Bico do Papagaio) e *Yield* máximo de 126,14 kWh/kWp (na região Sul). Em contrapartida, a orientação Sul manifestou o pior desempenho em todo o território, operando com uma eficiência crítica de até 63,32% e gerando uma defasagem de produtividade de até 13,8% em relação à face Norte. As orientações Leste e Oeste demonstraram equivalência técnica, situando-se em patamares intermediários com PR médio próximo a 73% e *Yield* de 115 kWh/kWp. Conclui-se que o mapeamento destes índices fornece uma base técnica e empírica robusta para projetistas, integradores e investidores, mitigando riscos financeiros e garantindo maior previsibilidade no dimensionamento de novos empreendimentos solares no Tocantins.

Palavras-chave: Energia Solar. Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos. *Performance Ratio*. *Yield*. Tocantins.

ABSTRACT

The exponential growth of photovoltaic distributed generation in Brazil demands deep regional studies to quantify the impact of architectural and climatic variables on the actual *yield* of power plants. This paper presents a comparative evaluation of the operational performance of grid-connected photovoltaic systems installed in the state of Tocantins, covering the three-year period from 2023 to 2025. The methodology adopted a quantitative approach based on the calculation of specific *yield* (*Yield*) and global efficiency (*Performance Ratio* — PR) indicators, using real generation data from a filtered sample of 1,527 valid systems, distributed across four macro-regions of the state: Bico do Papagaio, Norte-Centro, Central, and Sul. The solar resource reference was obtained from historical data provided by the weather stations of the National Institute of Meteorology (INMET). The systems were stratified according to the modules' azimuthal orientation (North, East, West, East/West, and South) and flat tilt (Flat at 0°). The consolidated results confirmed the dominance of North and Flat orientations, which recorded the highest levels of efficiency and productivity, reaching average PRs of up to 78.68% (in the Bico do Papagaio region) and a maximum *Yield* of 126.14 kWh/kWp (in the Sul region). On the other hand, the South orientation manifested the poorest performance across the entire territory, operating with a critical efficiency as low as 63.32% and causing a productivity gap of up to 13.8% compared to the North face. The East and West orientations demonstrated technical equivalence, standing at intermediate levels with an average PR near 73% and a *Yield* of 115 kWh/kWp. In conclusion, the mapping of these indexes provides a robust technical and empirical framework for designers, integrators, and investors, mitigating financial risks and ensuring higher predictability for sizing new solar projects in Tocantins.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic System Performance. *Performance Ratio*. *Yield*. Tocantins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Capacidade de fontes renováveis por tecnologia (2015-2025).	13
Figura 2 - Matriz energética Brasileira em 2026.	14
Figura 3 - Dados de GD's no Tocantins em 2026.....	18
Figura 4 - Diferença conceitual entre irradiância e irradiação solar.....	19
Figura 5 - Distribuição espacial da Irradiação no estado do Tocantins.....	20
Figura 6 - Orientação azimutal correta do módulo.....	21
Figura 7 - Geolocalização das usinas – Região - Bico do Papagaio.....	24
Figura 8 - Geolocalização das usinas – Região - Norte Centro.....	25
Figura 9 - Geolocalização das Usinas – Região Central.	25
Figura 10 - Geolocalização das usinas - Região Sul.	26
Figura 11 - Rosa-dos-ventos indicando as orientações analisadas.	30
Figura 12 - Exemplo de verificação da orientação.	31
Figura 13 - Procedimento para seleção de usinas com baixo PR	33
Figura 14 - Geração Mensal de Janeiro/24 do Sistema 12.	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	22
Equação 2.....	23
Equação 3.....	23

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Série histórica de irradiação – Araguatins.....	27
Gráfico 2 - Série histórica de irradiação – Araguaína.....	27
Gráfico 3 - Série histórica de irradiação – Colinas.	28
Gráfico 4 - Série histórica de irradiação - Pedro Afonso.....	28
Gráfico 5 - Série histórica de irradiação – Palmas.....	29
Gráfico 6 - Série histórica de irradiação – Almas.....	29
Gráfico 7 - Série histórica de irradiação – Gurupi.....	30
Gráfico 8 - Gráfico comparativo da irradiação x Geração do sistema 15.....	36
Gráfico 9 - Irradiações média mensais 2023 – Região Central.	38
Gráfico 10 – Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Central.....	38
Gráfico 11 – PR médio mensal (2023) – Região Central.	39
Gráfico 12 - Irradiações média mensais 2024 – Região Central.	40
Gráfico 13 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Central.	40
Gráfico 14 - PR médio mensal (2024) – Região Central.....	41
Gráfico 15 - Irradiações média mensais 2025 – Região Central.	42
Gráfico 16 - Produtividade Específica Mensal (2025) – Região Central.	42
Gráfico 17 - PR médio mensal (2025) – Região Central.....	43
Gráfico 18 - Consolidação Final do <i>Yield</i> - Região Central.	43
Gráfico 19 - Consolidação Final do PR – Região Central.....	44
Gráfico 20 - Irradiações média mensais 2023 – Região Bico do Papagaio.....	45
Gráfico 21 - Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Bico do Papagaio....	46
Gráfico 22 - PR médio mensal (2023) - Região Bico do Papagaio.	46
Gráfico 23 - Irradiações média mensais 2024 – Região Bico do Papagaio.....	47
Gráfico 24 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Bico do Papagaio....	48
Gráfico 25 - PR médio mensal (2024) - Região Bico do Papagaio.	48
Gráfico 26 - Irradiações média mensais 2025 – Região Bico do Papagaio.....	49
Gráfico 27 - Produtividade Específica Mensal (2025) – Região Bico do Papagaio....	50
Gráfico 28 - PR médio mensal (2025) - Região Bico do Papagaio.	50
Gráfico 29 - Consolidação Final do <i>Yield</i> - Região Bico do Papagaio.....	51
Gráfico 30 - Consolidação Final do PR – Região Bico do Papagaio.	51
Gráfico 31 - Irradiações média mensais 2023 – Região Norte Centro.	53
Gráfico 32 - Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Norte Centro.....	54

Gráfico 33 - PR médio mensal (2023) - Região Norte Centro.	54
Gráfico 34 - Irradiações média mensais 2024 – Região Norte Centro.	55
Gráfico 35 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Norte Centro.	56
Gráfico 36 - PR médio mensal (2024) - Região Norte Centro.	56
Gráfico 37 - Irradiações média mensais 2025 – Região Norte Centro.	57
Gráfico 38 - Produtividade Específica Mensal (2025) – Região Norte Centro.	58
Gráfico 39 - PR médio mensal (2025) - Região Norte Centro.	58
Gráfico 40 - Consolidação Final do <i>Yield</i> - Região Norte Centro.	59
Gráfico 41 - Consolidação Final do PR – Região Central.	59
Gráfico 42 - Irradiações média mensais 2023 – Região Sul.	61
Gráfico 43 - Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Sul.	62
Gráfico 44 - PR médio mensal (2023) - Região Sul.	62
Gráfico 45 - Irradiações média mensais 2024 – Região Sul.	63
Gráfico 46 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Sul.	64
Gráfico 47 - PR médio mensal (2024) - Região Sul.	64
Gráfico 48 - Irradiações média mensais 2025 – Região Sul.	65
Gráfico 49 - <i>Yield</i> Específico mensal - Sul -2025.	66
Gráfico 50 - PR médio mensal (2025) - Região Sul.	66
Gráfico 51 - Consolidação Final do <i>Yield</i> - Região Sul.	67
Gráfico 52 - Consolidação Final do PR – Região Sul.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do sistema 1.	32
Tabela 2 - Geração (kWh) e <i>Yield</i> (kWh/kWp) do Sistema 1.	32
Tabela 3 - Irradiação (kWh/m ² ·dia), ETM (kWh) e PR (%) do Sistema 1.....	32
Tabela 4 - Dados de Irradiação (kWh/m ² ·dia).	34
Tabela 5 - Dados de geração (kWh) da amostra.	34
Tabela 6 - PR mensal calculado (%).	34
Tabela 7 - Quantitativo de sistemas fotovoltaicos analisados – Total.....	36
Tabela 8 - Quantidade de sistemas analisados 2023.....	37
Tabela 9 - Quantidade de sistemas analisados 2024.....	39
Tabela 10 - Quantidade de sistemas analisados 2025.....	41
Tabela 11 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Central.....	44
Tabela 12 - Quantidade de sistemas analisados 2023.....	45
Tabela 13 - Quantidade de sistemas analisados 2024.....	47
Tabela 14 - Quantidade de sistemas analisados 2025.....	49
Tabela 15 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Bico do Papagaio.	52
Tabela 16 - Quantidade de sistemas analisados 2023.....	53
Tabela 17 - Quantidade de sistemas analisados 2024.....	55
Tabela 18 - Quantidade de Sistemas analisados 2025.	57
Tabela 19 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Norte Centro.....	60
Tabela 20 - Quantidade de sistemas analisados 2023.....	61
Tabela 21 - Quantidade de sistemas analisados 2024.....	63
Tabela 22 - Quantidade de sistemas analisados 2025.....	65
Tabela 23 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Sul.	68
Tabela 24 - Consolidação do <i>Performance Ratio</i> (PR) Médio do Tocantins.	69
Tabela 25 - Consolidação da produtividade específica (<i>Yield</i>) Médio do Tocantins. .	69

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternativa
CC	Corrente Contínua
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ETM	Energia Teórica Mensal
GD	Geração Distribuída
GHI	Irradiância Global Horizontal
GW	Gigawatt
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
KW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
kWp	Kilowatt-pico
MJ	Megajoule
PCH	Pequena Central Hidrelétrica.
PR	<i>Performance Ratio</i>
PSH	Horas de Sol de Pico (<i>Peak Sun Hours</i>).
STC	Condições Padrão de Teste (<i>Standard Test Conditions</i>).
TO	Estado do Tocantins
UC	Unidade Consumidora
UFT	Universidade Federal do Tocantins.
UHE	Usina Hidrelétrica.
W	Watt

SUMÁRIO

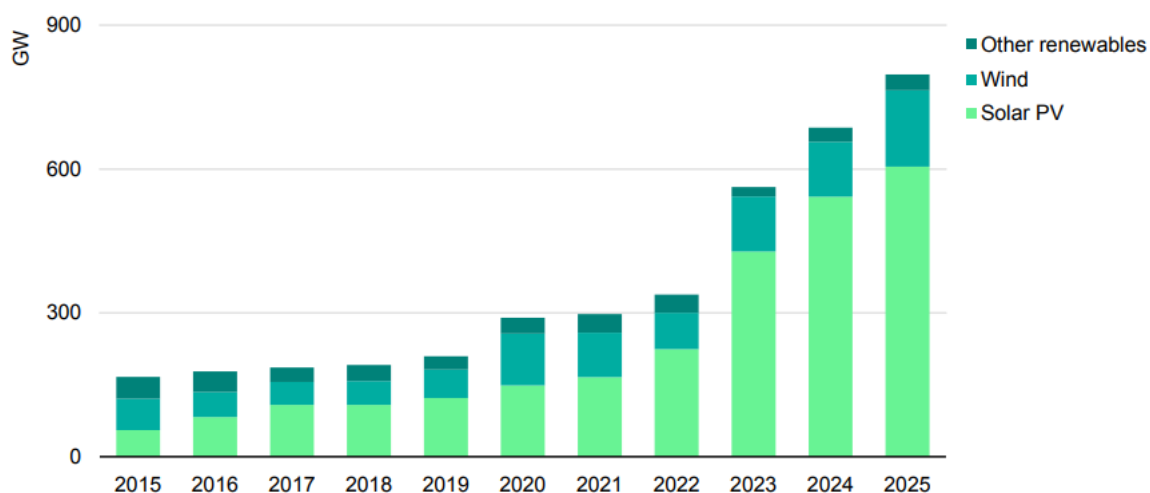
1	INTRODUÇÃO	13
2	PROBLEMA DE PESQUISA	15
3	JUSTIFICATIVA	16
4	OBJETIVOS	17
4.1	Objetivo geral	17
4.2	Objetivos específicos	17
5	REVISÃO DE LITERATURA	18
5.1	Energia solar no estado do Tocantins	18
5.2	Irradiação Solar	18
5.3	Irradiação Solar no Tocantins	19
5.4	Influência da orientação dos módulos	21
5.5	<i>Produtividade Específica (Yield)</i>	22
5.6	Eficiência Global (<i>Performance Ratio</i> ou PR)	22
5.6.1	Energia teórica mensal (ETM).....	23
5.6.2	<i>Performance Ratio</i> ou PR final.....	23
6	DESENVOLVIMENTO	24
6.1	Divisão das regiões do estado e agrupamento das usinas	24
6.2	Irradiação média utilizada	26
6.3	Orientação dos módulos	30
6.4	Base de dados utilizada	31
6.5	Cálculo da produtividade específica (<i>yield</i> específico)	32
6.6	Cálculo do <i>performance ratio</i> (PR)	32
6.7	Tratamento de dados e identificação de sistemas suspeitos	33
6.7.1	Exemplificação	33
6.8	Consolidação dos resultados por orientação	36
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37

7.1	Análise de Desempenho Regional	37
7.1.1	Região Central	37
7.1.2	Discussões da região central	44
7.1.3	Região do Bico do Papagaio	45
7.1.4	Discussões	52
7.1.5	Região Norte-Centro	52
7.1.6	Discussões	60
7.1.7	Região Sul	60
7.1.8	Discussões	68
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
9	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Em 2025, a expansão de energias renováveis atingiu um marco histórico com a adição de 800 GW em todo o mundo, um crescimento de 16% que marcou o 23º ano consecutivo de recordes do setor, superando desafios logísticos e econômicos globais. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica consolidou sua liderança absoluta ao ser responsável por mais de três quartos de toda a nova capacidade mundial instalada, seguida pela energia eólica (20%) e demais fontes complementares (IEA, 2026). Essa evolução e o protagonismo tecnológico podem ser observados detalhadamente na Figura 1.

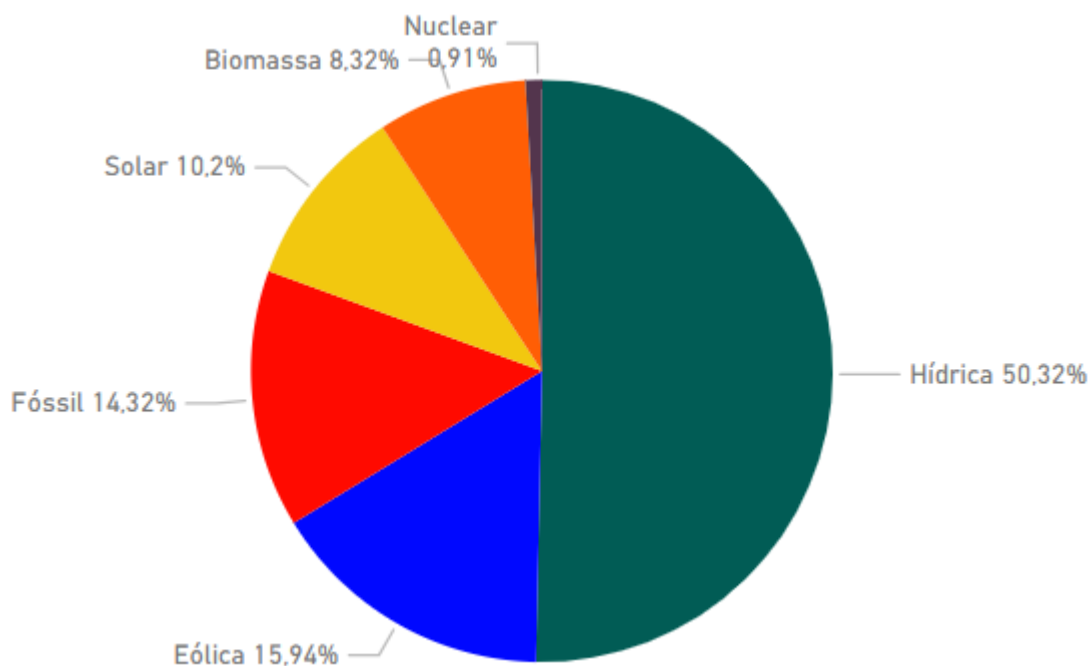
Figura 1 – Capacidade de fontes renováveis por tecnologia (2015-2025).



Fonte: IEA (2026).

Conforme a figura 2, o Brasil alcançou aproximadamente 22 GW de capacidade instalada em usinas fotovoltaicas. Esse montante corresponde a 10,23% de toda a potência outorgada na matriz elétrica nacional, distribuída em cerca de 19 mil centrais geradoras pelo país (ANEEL, 2026). Estados como Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Norte figuram no topo do ranking em relação à quantidade de empreendimentos solares e à potência outorgada (ANEEL, 2026). O estado do Tocantins, por sua vez, registrou uma potência instalada de 0,45 GW no mesmo ano, representando aproximadamente 0,4% da capacidade solar total instalada no Brasil (ANEEL, 2026).

Figura 2 - Matriz energética Brasileira em 2026.



Fonte: ANEEL (2026).

Diante desse contexto, direcionando para o estado do Tocantins, constata-se que a sua extensão territorial e variedade climática demandam uma necessidade de estudos que mapeiem o comportamento dos sistemas fotovoltaicos ao longo da sua área. Isso ocorre porque as suas variações de irradiação solar e os aspectos construtivos dos sistemas — em especial, as diferentes orientações de telhados — afetam o rendimento global de maneiras distintas a depender da localidade.

Partindo dessa situação, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar e comparar os indicadores de eficiência (Produtividade e Eficiência Global) de sistemas fotovoltaicos instalados em todo o território do Tocantins. A pesquisa busca determinar o impacto da orientação azimutal dos módulos no desempenho das usinas, fazendo uma análise comparativa entre as diferentes regiões do estado, com a intenção de entregar aos integradores, projetistas e investidores dados regionais que assegurem maior certeza na geração e confiabilidade no retorno financeiro dos empreendimentos.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Como o desempenho e a eficiência de sistemas fotovoltaicos no estado do Tocantins variam em função da orientação dos módulos, das particularidades regionais e da disponibilidade de irradiação solar ao longo dos anos, quando avaliados com auxílio dos indicadores de eficiência global (*Performance Ratio*) e da produtividade específica (*Yield*) a partir de dados reais de geração?

3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender, de forma empírica, como o desempenho operacional e a eficiência de sistemas fotovoltaicos no estado do Tocantins são influenciados pela orientação azimutal dos módulos, pelas diferenças regionais e pela variabilidade da irradiação solar ao longo do tempo. Embora o estado apresente um elevado potencial solar, a análise fundamentada apenas na geração teórica de energia é insuficiente para atestar a real qualidade operacional das usinas instaladas. Para tanto, torna-se indispensável a aplicação de indicadores, como a eficiência global (Performance Ratio) e a produtividade específica (Yield).

Além disso, ao usar dados reais de irradiação solar, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), é possível diferenciar as variações naturais do recurso solar em relação às verdadeiras perdas sistêmicas. Ao segmentar o estudo nas macrorregiões do Bico do Papagaio, Norte-Centro, Central e Sul, a pesquisa evidencia os diferentes comportamentos atrelados às particularidades climáticas de cada localidade. Dessa forma, o trabalho não apenas estabelece um procedimento de diagnóstico de falhas, mas também consolida referências reais e estratificadas por orientação, entregando aos integradores e profissionais do setor uma base técnica robusta e previsível para o dimensionamento e a otimização de novos projetos no estado.

4 OBJETIVOS

Nesse tópico, serão citados os objetivos gerais e específicos acerca do tema.

4.1 Objetivo geral

Avaliar e comparar, entre quatro macrorregiões do estado do Tocantins (Bico do Papagaio, Norte-Centro, Central e Sul), o desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos instalados, no período de 2023 a 2025, utilizando os indicadores *Performance Ratio (PR)* e *Yield Específico*, correlacionando-os com a irradiação solar mensal e com a orientação azimutal dos módulos, para determinar padrões sazonais, variações anuais e potenciais melhorias operacionais.

4.2 Objetivos específicos

- Organizar e comparar os índices de irradiação mensal (Hm) nas macrorregiões do Bico do Papagaio, Norte-Centro, Central e Sul, para os anos de 2023, 2024 e 2025, avaliando a variabilidade mensal e anual da potência solar disponível.
- Calcular e analisar a produtividade específica (*Yield*) e eficiência global (*Performance Ratio (PR)*) mensal dos sistemas fotovoltaicos, consolidando os resultados de eficiência conforme a orientação azimutal dos módulos;
- Desenvolver um procedimento de análise para usinas com baixos índices de *Performance Ratio (PR)* e *Yield*, correlacionando os indicadores de desempenho com a irradiação solar (Hm), a fim de distinguir efeitos climáticos de possíveis perdas operacionais.
- Determinar os índices médios de *Performance Ratio (PR)* estratificados por orientação azimutal e macrorregião, visando disponibilizar referências empíricas para os integradores.

5 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico, serão abordados e comentados diversos aspectos relacionados a essa temática, incluindo seu conceito histórico, campos teóricos relevantes e algumas notícias recentes da área.

5.1 Energia solar no estado do Tocantins

O Estado do Tocantins tem vivenciado um crescimento exponencial na adoção de sistemas fotovoltaicos na última década. O estado, que registrava apenas uma unidade de geração distribuída em 2011, alcançou a expressiva marca de 63.653 conexões ativas em 2026, conforme indicado na figura 3. Esse avanço consolida a transição energética regional, totalizando uma potência instalada superior a 0,72 GW, capilarizada por todos os 139 municípios tocaninenses.

Figura 3 - Dados de GD's no Tocantins em 2026.

Qtd de GDs	Municípios com GD
63.653	139
UCs Rec Créditos	Pot Instalada (kW)
84.127	723.527,48

Fonte: ANEEL (2026).

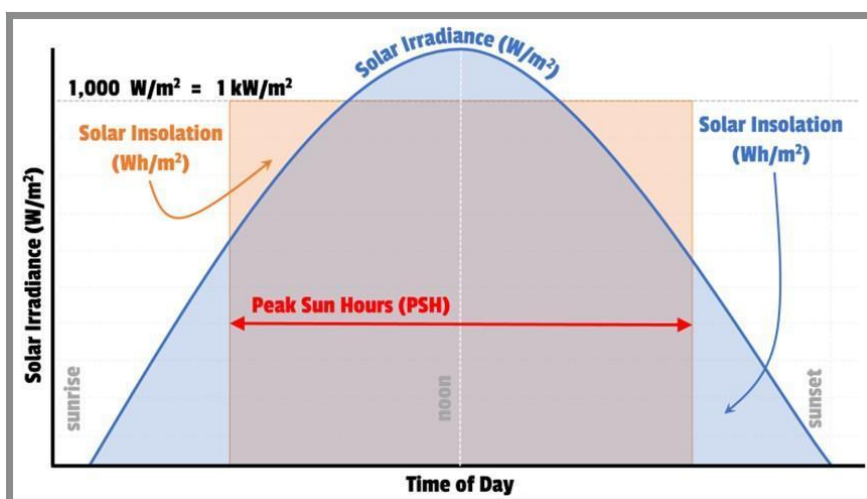
Diante desse cenário, a energia solar deixou de ser apenas uma alternativa de responsabilidade ambiental para se tornar uma escolha economicamente estratégica. A oferta crescente de linhas de financiamento por instituições de crédito tem democratizado o acesso à tecnologia, permitindo que pessoas físicas, empresários e investidores adotem a geração própria como uma solução definitiva para a redução substancial de custos operacionais, aliando economia e sustentabilidade ambiental.

5.2 Irradiação Solar

A geração fotovoltaica depende, de maneira intrínseca, da disponibilidade do recurso solar. Em termos físicos, é essencial diferenciar duas grandezas básicas: irradiância e irradiação.

A irradiância (G) corresponde à potência radiante incidente por unidade de área, sendo expressa em W/m^2 . Já a irradiação representa a energia solar acumulada ao longo de um intervalo de tempo, obtida pela integração da irradiância nesse período. Essa grandeza é normalmente expressa em Wh/m^2 , kWh/m^2 ou MJ/m^2 , conforme ilustrado na Figura 3 (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 4 - Diferença conceitual entre irradiância e irradiação solar.



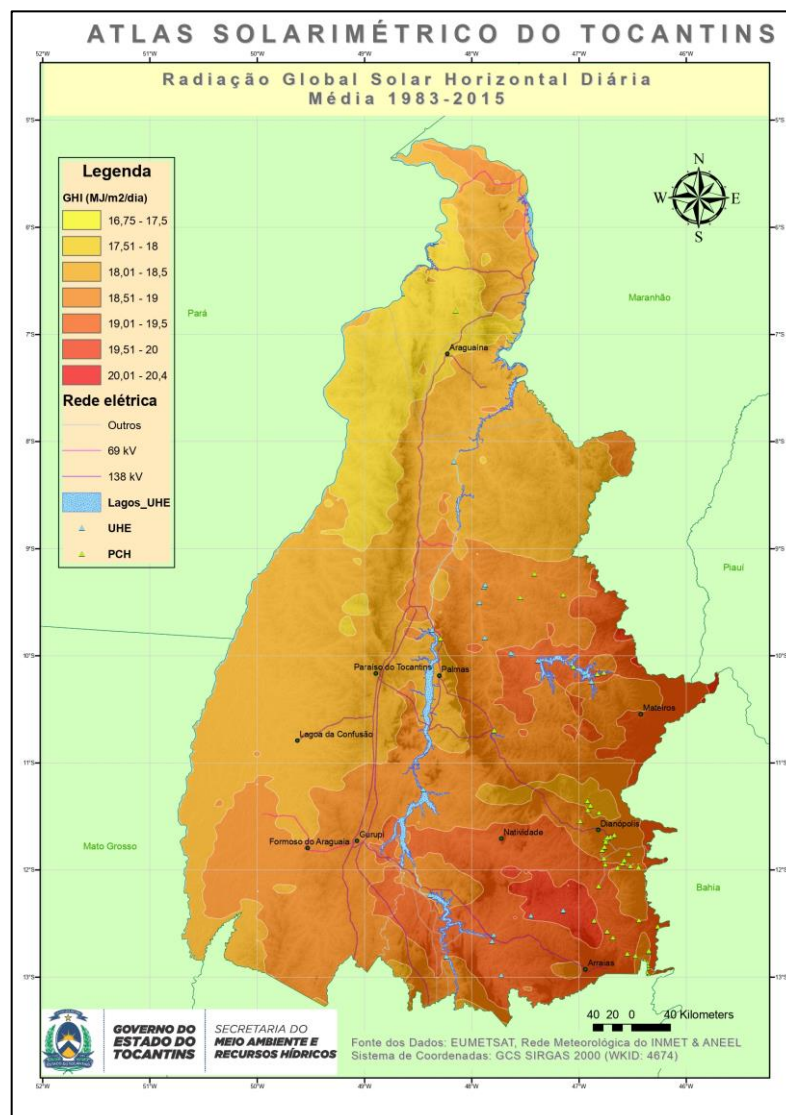
Fonte: ATLAS (2018).

Para análises comparativas entre meses e anos, é comum utilizar a irradiação média diária mensal, indicada por H_m , expressa em $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$. Esse parâmetro é adequado para estudos de desempenho, pois permite relacionar a geração elétrica com a disponibilidade real do recurso solar em cada período analisado.

5.3 Irradiação Solar no Tocantins

O comportamento da irradiação exige a compreensão não apenas de sua variabilidade temporal, mas também espacial, isto é, as variações na disponibilidade ao longo de uma extensão territorial. Fatores atmosféricos como a cobertura de nuvens, a concentração de aerossóis e a umidade apresentam uma distribuição não uniforme, influenciando diretamente na irradiação por todo território Tocantinense (ATLAS, 2018).

Figura 5 - Distribuição espacial da Irradiação no estado do Tocantins.



Fonte: ATLAS (2018).

Na figura 5, observa-se que as áreas mais próximas ao sudeste tocantinense possuem médias maiores de irradiação, apresentando uma média de irradiação na faixa de 5,40 kWh/m². dia. Já a região norte do estado, registra valores consideravelmente menores, com valores médios próximos 5,00 kWh/m². dia.

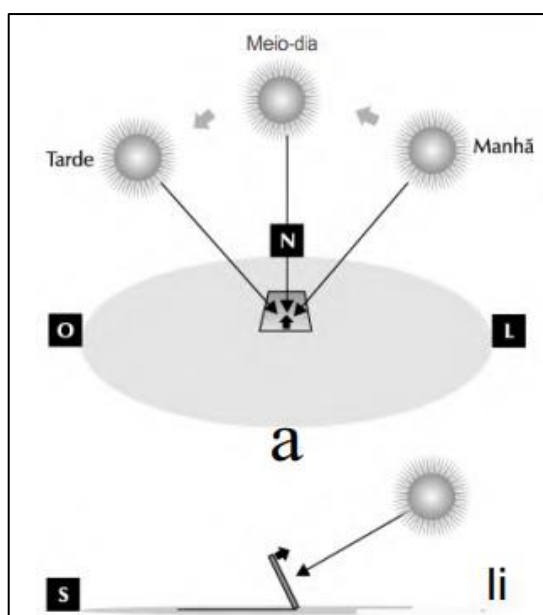
A partir dessa condição, é necessário garantir a homogeneidade das condições ambientais da amostra, reduzindo a influência nos indicadores de desempenho. Portanto, a segmentação metodológica deste estudo em macrorregiões constitui uma estratégia fundamentada, sendo estritamente necessária para isolar as variáveis climáticas e garantir a precisão da avaliação em um território extenso e diverso como o Tocantins.

5.4 Influência da orientação dos módulos

A orientação dos módulos fotovoltaicos está intimamente ligada à geometria de incidência da radiação solar, sendo um dos parâmetros mais importantes que influenciam geração de energia elétrica. Os raios solares chegam à superfície terrestre com diferentes ângulos ao longo do dia e do ano, em função da posição relativa e da cinemática entre a Terra e o Sol. Essa dinâmica geométrica influencia diretamente a quantidade de radiação que atinge o plano do gerador e, por conseguinte, a energia elétrica efetivamente convertida pelos módulos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

No hemisfério sul, a orientação teórica ideal para sistemas fixos é posicionar os painéis com a face voltada para o Norte geográfico. Com essa configuração, a radiação é mais integrada ao longo do dia, favorecendo a captação de energia ao tornar a incidência mais perpendicular durante o meio-dia solar, conforme ilustrado na Figura 6. Sistemas que têm orientação Leste geram mais energia no período da manhã, enquanto os orientados para Oeste apresentam maior geração no período da tarde — ambas as orientações reduzem a captação total diária em comparação com a orientação Norte. Por sua vez, a orientação Sul apresenta desempenho consideravelmente inferior neste hemisfério, devido à elevada penalização geométrica causada pela oposição à trajetória aparente do Sol, resultando em perdas significativas de eficiência. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 6 - Orientação azimuthal correta do módulo.



Fonte: (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Diante destes princípios, a orientação e a inclinação dos telhados devem ser consideradas como variáveis centrais em qualquer avaliação de desempenho. No escopo deste trabalho, a categorização dos sistemas segundo o azimuth Norte, Sul, Leste, Oeste, Leste/Oeste (duas águas) e reto (plano a 0°) permite avaliar como as diferentes orientações impactam a produtividade real das usinas instaladas no Tocantins, possibilitando a identificação de padrões sazonais de geração e a quantificação das perdas.

5.5 Produtividade Específica (*Yield*)

A produtividade específica, também denominado *specific yield*, é um indicador amplamente utilizado na análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos, pois expressa a quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema por unidade de potência instalada. Diferentemente da geração absoluta, esse parâmetro permite a comparação direta entre sistemas de diferentes tamanhos, tecnologias e localizações geográficas (IEC, 2016).

De acordo com a norma IEC 61724, o *yield* específico é definido como a razão entre a energia elétrica efetivamente produzida pelo sistema em determinado período e a potência nominal instalada em condições padrão de teste (STC). Sendo expresso pela equação (1):

$$Y_{sp} = \frac{E_{AC}}{P_{nom}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde Y_{sp} é a produtividade específica do sistema em kWh/kWp, E_{AC} é a energia elétrica gerada no período analisado em kWh e P_{nom} é a potência nominal instalada do sistema em kWp.

5.6 Eficiência Global (Performance Ratio ou PR)

O *Performance Ratio* (PR) é reconhecido como o principal indicador de desempenho global de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Esse parâmetro relaciona a produção real de energia elétrica do sistema ao potencial energético disponível no local, permitindo uma avaliação do desempenho operacional (IEC, 2016).

5.6.1 Energia teórica mensal (ETM)

Para calcular o PR primeiro é necessário calcular a energia teórica mensal (ETM) disponível naquele determinado período (Mês). Sendo descrito pela equação 2 abaixo:

$$ETM = P_{nom} \times H_m \times N_d \quad \text{Equação 2}$$

Onde ETM é a energia elétrica teórica em kWh/Mês, P_{nom} é a potência nominal instalada do sistema em kWp, H_m é a irradiação média diária mensal no local em kWh/m².dia e N_d é o número de dias do referido mês.

5.6.2 *Performance Ratio* ou PR final

O PR final corresponde a relação entre a energia elétrica real gerada pelo sistema fotovoltaico no mês pela energia teórica mensal. Sendo descrito pela equação 3 abaixo:

$$PR = \frac{E_{AC}}{ETM} \quad \text{Equação 3}$$

Onde, E_{AC} é a energia elétrica gerada no período analisado em kWh e ETM é a energia elétrica teórica em kWh/Mês.

O uso do PR é particularmente relevante porque a geração absoluta de energia não permite distinguir as reduções na produção decorrem de condições meteorológicas desfavoráveis ou de falhas e perdas operacionais. (IEC, 2016).

Estudos técnicos e levantamentos de desempenho indicam que sistemas fotovoltaicos bem projetados e adequadamente operados apresentam valores típicos de PR entre **70% e 85%**, variando conforme tecnologia dos módulos, condições climáticas, estratégias de operação e manutenção e características do local de instalação (SOLANO; ARCINIEGA, 2025; NREL, 2021).

6 DESENVOLVIMENTO

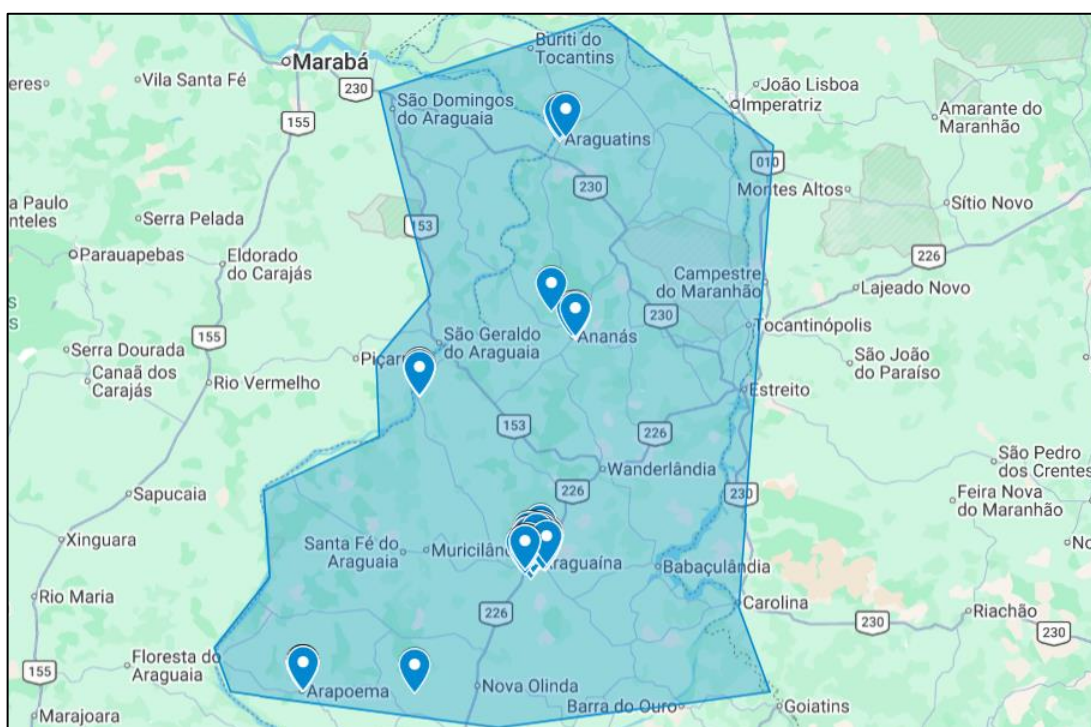
Para a avaliação do desempenho dos sistemas fotovoltaicos localizados no estado do Tocantins, utilizou-se uma abordagem quantitativa baseada no cálculo do *Performance Ratio* (PR) e da produtividade específica (*Yield*).

6.1 Divisão das regiões do estado e agrupamento das usinas

Visando agrupar sistemas com perfis de irradiação e características climáticas semelhantes, os municípios foram separados em quatro macrorregiões. A seleção abrangeu cidades geograficamente próximas, divididas da seguinte forma:

- **Região Norte-Centro:** Bom Jesus do Tocantins, Brasilândia, Colinas, Guaraí, Pedro Afonso, Presidente Kennedy e Colmeia.

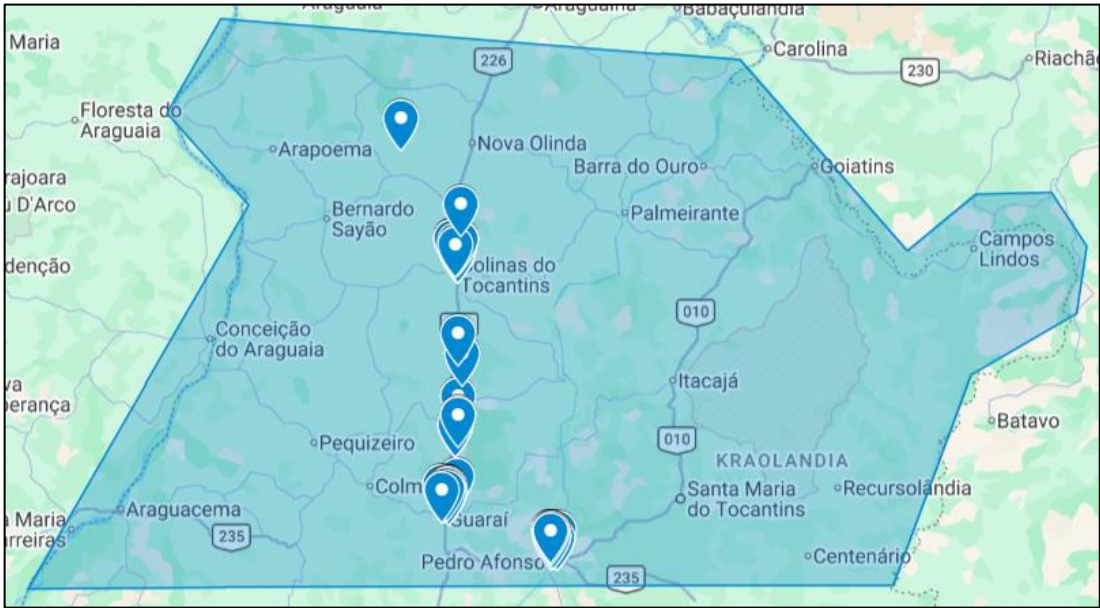
Figura 7 - Geolocalização das usinas – Região - Bico do Papagaio.



Fonte: Google My Maps (2026).

- **Região Norte-Centro:** Bom Jesus do Tocantins, Brasilândia, Colinas, Guaraí, Pedro Afonso, Presidente Kennedy e Colmeia.

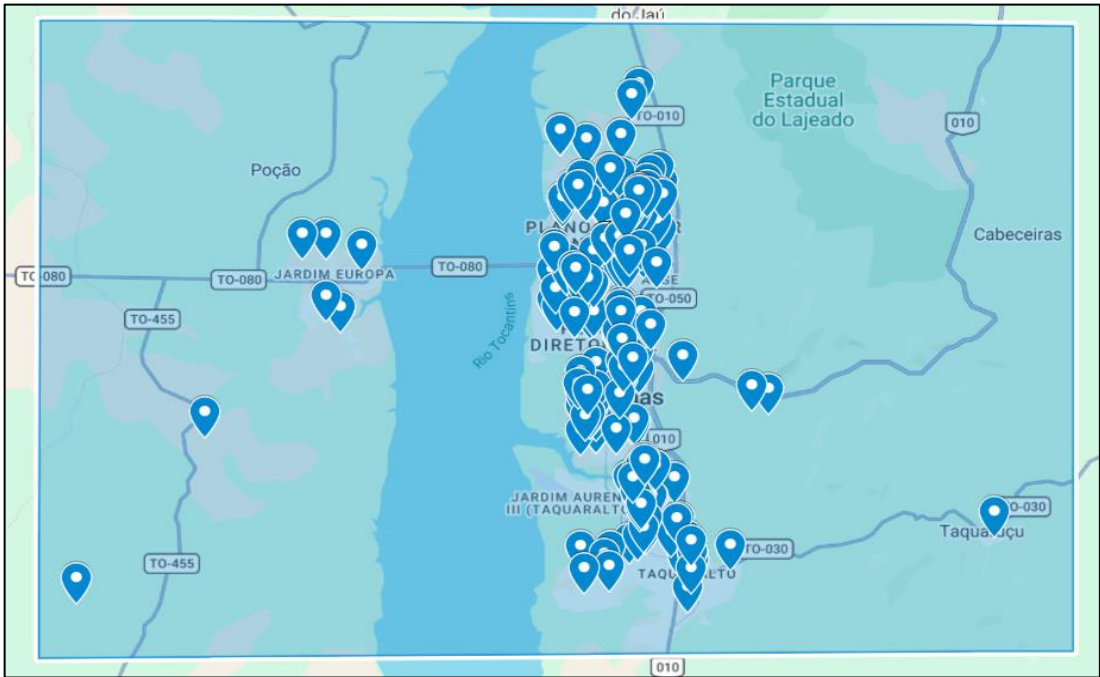
Figura 8 - Geolocalização das usinas – Região - Norte Centro.



Fonte: Google My Maps (2026).

- **Região Central:** Palmas, Taquaralto, Taquaruçu e Luzimangues-Porto Nacional.

Figura 9 - Geolocalização das Usinas – Região Central.



Fonte: Google My Maps (2026).

- **Região Sul:** Gurupi, Almas, Dianópolis, Natividade, Novo Jardim, Ponte Alta do Bom Jesus.

Gráfico 1 - Série histórica de irradiação – Araguaatins.



Fonte: INMET (2026).

Gráfico 2 - Série histórica de irradiação – Araguaína.



Fonte: INMET (2026).

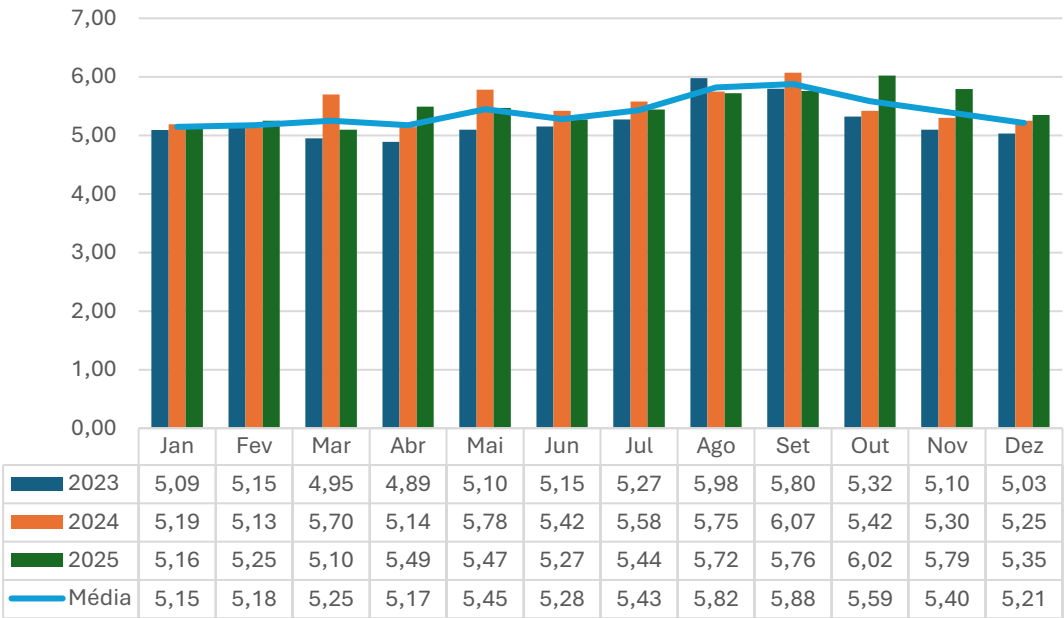
- **Região Norte-Centro:** Foram empregados os dados de Colinas e Pedro Afonso.

Gráfico 3 - Série histórica de irradiação – Colinas.



Fonte: INMET (2026).

Gráfico 4 - Série histórica de irradiação - Pedro Afonso.



Fonte: INMET (2026).

- **Região Central:** Foram utilizados os dados reais de irradiação de Palmas para os anos de 2023, 2024 e 2025.

Gráfico 5 - Série histórica de irradiação – Palmas.



Fonte: INMET (2026).

- **Região Sul:** Foram utilizados os dados das estações de Gurupi e Almas.

Gráfico 6 - Série histórica de irradiação – Almas.



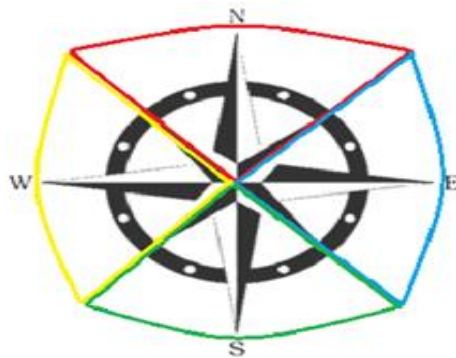
Fonte: INMET (2026).

Gráfico 7 - Série histórica de irradiação – Gurupi.

Fonte: INMET (2026).

6.3 Orientação dos módulos

A partir da compilação da amostra dos sistemas, procedeu-se ao cálculo dos indicadores pela orientação dos módulos. Para fins de classificação neste estudo, adotaram-se as quatro orientações cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste), admitindo-se uma tolerância azimutal de até 45° para cada direção, conforme ilustrado na Figura 13. A identificação das orientações foi realizada por meio de imagens de satélite na ferramenta *Google Earth*, utilizando-se as coordenadas geográficas (latitude e longitude) referentes a cada usina analisada.

Figura 11 - Rosa-dos-ventos indicando as orientações analisadas.

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Figura 12 - Exemplo de verificação da orientação.



Fonte: Google Earth (2026).

6.4 Base de dados utilizada

A base de dados do estudo é composta por planilhas anuais, compreendendo o período de 2023 a 2025, que reúnem as informações técnicas e operacionais dos sistemas fotovoltaicos analisados. Os dados foram extraídos diretamente das plataformas de monitoramento dos fabricantes dos inversores. Para cada unidade, foram consolidadas as seguintes variáveis:

- Identificação da usina (codificada para preservação de sigilo);
- Marca do inversor;
- Potência de pico instalada;
- Localização geográfica (latitude e longitude);
- Orientação dos módulos;
- Geração real de energia mensal.

Ressalta-se que, visando garantir a proteção de dados e a privacidade dos proprietários, as identificações das usinas foram omitidas em todos os exemplos de cálculos e nos resultados expostos.

6.5 Cálculo da produtividade específica (*yield* específico)

O cálculo da produtividade específica (*Yield*) de cada sistema foi realizado a partir da Equação 1. Para fins de exemplificação do cálculo, foram empregados os dados do sistema 1 pertencente à amostra da região central, conforme exposto na Tabela 1. Por conseguinte, os dados de geração e resultados de produtividade obtidos estão consolidados na Tabela 2.

Tabela 1 – Dados do sistema 1.

Nome	Marca	Potência	Orientação
Sistema 1	Growatt	8,1	Norte

Fonte: Growatt (2026).

Tabela 2 - Geração (kWh) e *Yield* (kWh/kWp) do Sistema 1.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Geração	873	722	839	850	1048	984	1080	1039	969	967	751	792
<i>Yield</i>	107	89	103	104	129	121	133	128	119	119	92	97

Fonte: Elaboração Própria (2026).

6.6 Cálculo do *performance ratio* (PR)

Para a obtenção do PR de cada sistema da amostra, calculou-se inicialmente a energia teórica mensal (ETM) por meio da Equação 2. Na sequência, o PR mensal foi determinado aplicando-se a Equação 3, a partir do qual se obteve o PR médio anual do sistema por meio da média aritmética dos valores mensais. Exemplificando, a Tabela 3 consolida os dados de geração mensal do sistema selecionado no item 6.5, os índices de irradiação solar da região e os resultados calculados de ETM e PR.

Tabela 3 - Irradiação (kWh/m²·dia), ETM (kWh) e PR (%) do Sistema 1.

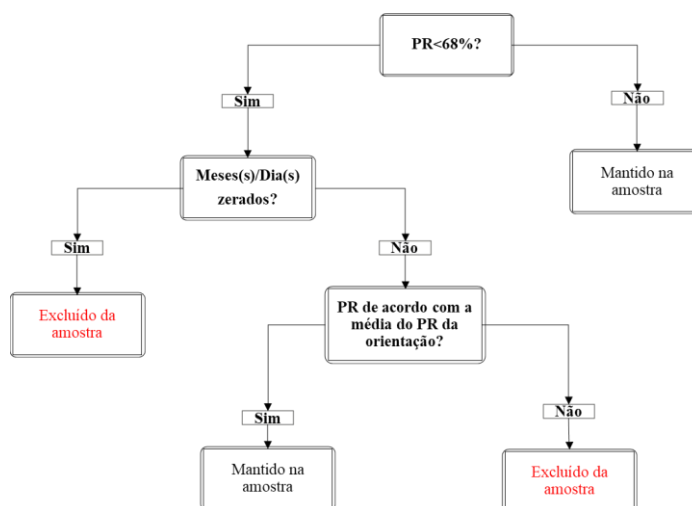
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Irradiação	4,69	4,49	4,85	4,59	5,24	5,46	5,63	5,97	6,08	5,04	4,50	4,58
ETM	1174	1072	1128	1213	1368	1319	1409	1397	1383	1373	1164	1227
PR	74,4	67,4	74,4	70,1	76,5	74,5	76,6	74,4	70,0	70,4	64,5	64,5

Fonte: Elaboração Própria (2026).

6.7 Tratamento de dados e identificação de sistemas suspeitos

Para evitar distorções e garantir maior uniformidade na análise, após o cálculo dos indicadores foi realizada uma avaliação individual das usinas para identificação de sistemas com comportamento suspeito. Observou-se empiricamente que sistemas com PR inferior a **68%** apresentavam, na maioria dos casos, inconsistências operacionais ou falhas de monitoramento. Assim, adotou-se o valor de **68%** como limite metodológico para investigação detalhada, conforme o fluxograma apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Procedimento para seleção de usinas com baixo PR



Fonte: Elaboração Própria (2026)

As principais causas identificadas consistiram em indisponibilidade da rede da concessionária e falhas de comunicação. Assim, esses sistemas foram excluídos da base de cálculo final, preservando-se apenas usinas com dados confiáveis, inclusive aquelas com baixo PR justificado pela orientação.

6.7.1 Exemplificação

A fim de demonstrar a aplicação desta etapa, utilizou-se uma amostra referente à região Bico do Papagaio. A Tabela 4 detalha os dados característicos e geração dos sistemas; a Tabela 5 apresenta os dados de irradiação da região em 2024; e, por fim, a Tabela 6 consolida os resultados do cálculo do PR obtidos.

Tabela 4 - Dados de Irradiação (kWh/m²·dia).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4,69	4,49	4,85	4,59	5,24	5,46	5,63	5,97	6,08	5,04	4,50	4,58

Fonte: INMET (2026).

Tabela 5 - Dados de geração (kWh) da amostra.

Usina	Potência	Orientação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Sistema 1	8,72	NORTE	929	996	906	1073	1163	1232	1343	1209	1238	1057	988	932
Sistema 2	4,36	NORTE	485	487	502	576	622	674	718	647	639	546	514	478
Sistema 3	9,40	SUL	1113	1220	1052	1120	1185	1250	1270	1336	1304	1251	1091	1047
Sistema 4	41,00	LESTE/OESTE	4842	4324	4049	4588	4633	4844	5284	5130	5196	4719	4448	4516
Sistema 5	18,90	NORTE	2156	1957	2028	2321	2324	2428	2565	2364	2277	2217	2114	2152
Sistema 6	6,90	RETO	138	696	675	759	740	763	820	813	879	809	791	775
Sistema 7	5,55	LESTE	0	0	154	701	732	679	872	774	763	687	611	647
Sistema 8	6,54	NORTE	0	334	666	773	794	836	907	857	878	803	757	746
Sistema 9	4,36	RETO	0	89	470	505	516	541	579	551	581	526	517	510
Sistema 10	10,90	RETO	0	0	0	0	0	0	0	0	98	1301	1273	1246
Sistema 11	3,82	NORTE	0	314	406	495	530	588	618	566	537	485	435	414
Sistema 12	6,00	SUL	408	476	388	453	725	722	752	770	721	609	516	455
Sistema 13	30,52	RETO	0	0	0	1217	2934	3062	3222	3084	3301	3100	3013	2918
Sistema 14	6,60	NORTE	0	0	387	832	893	1010	1068	964	920	792	728	719
Sistema 15	6,00	LESTE/OESTE	673	616	677	629	715	697	719	785	797	729	636	550

Fonte: Growatt (2026).

Tabela 6 - PR mensal calculado (%).

Usina	Potência	Orientação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Sistema 1	8,72	NORTE	73,3	82,1	69,1	86,5	82,1	83,5	88,2	74,9	75,3	77,6	81,3	75,3
Sistema 2	4,36	NORTE	76,6	80,3	76,7	92,9	87,8	91,3	94,3	80,2	77,8	80,2	84,5	77,3
Sistema 3	9,4	SUL	81,4	93,3	74,5	83,8	77,6	78,6	77,4	76,8	73,6	85,2	83,2	78,5
Sistema 4	41	LESTE/OESTE	81,2	75,8	69,2	78,6	69,6	69,8	73,8	69,9	70,2	73,7	77,8	77,6
Sistema 5	18,9	NORTE	78,5	72,1	71,4	86,3	75,7	75,9	77,8	69,5	70,2	75,1	80,2	80,2
Sistema 6	6,9	RETO	73,1	72,5	70,1	77,3	72,0	75,3	69,1	70,7	76,6	75,0	82,2	79,1
Sistema 7	5,55	LESTE	0,0	0,0	18,5	88,8	81,2	72,2	90,0	75,4	73,0	79,3	78,9	82,1
Sistema 8	6,54	NORTE	0,0	36,6	67,8	83,1	74,7	75,5	79,5	70,8	71,3	78,6	82,9	80,3
Sistema 9	4,36	RETO	0,0	14,7	71,7	81,4	72,8	73,4	76,0	68,2	70,6	77,2	85,1	82,4
Sistema 10	10,9	RETO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	76,4	83,7	80,5
Sistema 11	3,815	NORTE	0,0	59,2	70,8	91,1	85,5	91,0	92,8	80,1	74,7	81,3	81,7	76,4
Sistema 12	6	SUL	53,3	50,5	60,4	62,5	68,8	75,6	78,7	67,0	62,9	67,6	68,7	57,5
Sistema 13	30,52	RETO	0,0	0,0	0,0	28,0	59,2	59,3	60,5	54,6	57,4	65,0	70,8	67,3
Sistema 14	6,6	NORTE	0,0	0,0	39,0	88,6	83,3	90,4	92,7	78,9	74,0	76,8	79,1	76,8
Sistema 15	6	LESTE/OESTE	77,1	73,7	75,0	73,6	73,4	68,6	68,7	70,7	70,5	77,8	76,0	64,0

Fonte: Elaboração Própria (2026)

Aplicando o critério de outliers com PR abaixo de 68%, observou-se que os sistemas 7 a 15 apresentaram meses com eficiência criticamente baixa ou geração nula. Diante disso, sistemas que registraram ausência total de geração mensal (7 a 11, 13 e 14) foram removidos da base de dados, por indicarem meses com ausência de geração.

Os sistemas 12 e 15 apresentaram quedas acentuadas de PR em meses pontuais, mas não zeraram a sua produção. Devido a essa particularidade, tais usinas não foram excluídas de forma automática. Para estes casos, procedeu-se a uma análise individual com o objetivo de determinar se a baixa eficiência decorreu de anomalias do sistema ou variação da irradiação.

Conforme a figura 14, o "Sistema 12" demonstrou falhas de geração entre os dias 01/01 e 08/01, justificando sua remoção da amostra.

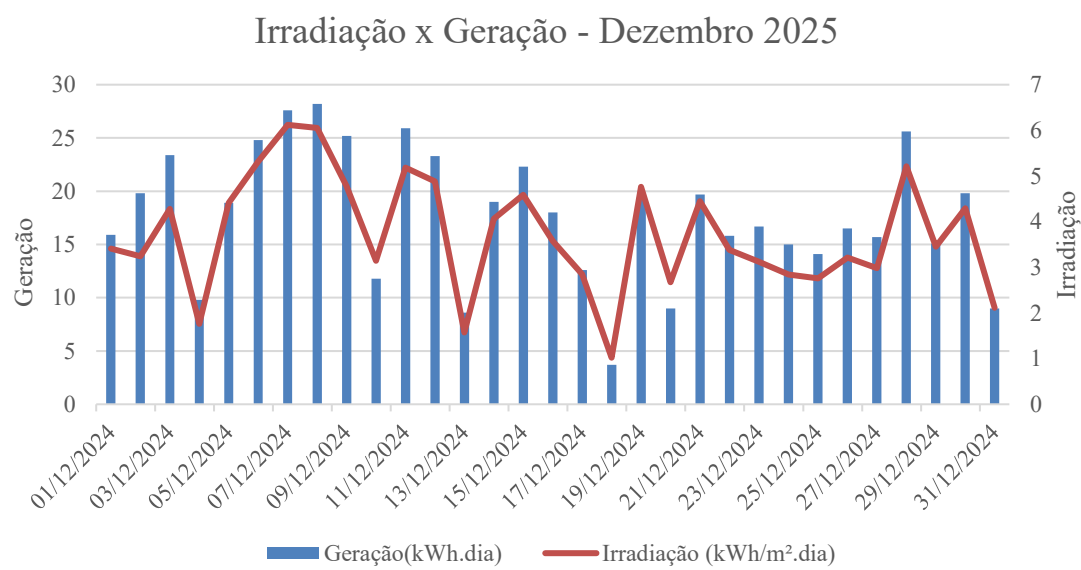
Figura 14 - Geração Mensal de Janeiro/24 do Sistema 12.



Fonte: Growatt (2026).

O sistema 15, o PR baixo no mês de dezembro derivou da variação da irradiação que influenciou na baixa geração de energia CA. Nesses casos, onde a queda de desempenho decorre da disponibilidade da irradiação, o sistema é mantido na análise.

Gráfico 8 - Gráfico comparativo da irradiação x Geração do sistema 15.



Fonte: Growatt/INMET/Elaboração Própria (2026).

6.8 Consolidação dos resultados por orientação

Após o tratamento e a filtragem de todos os dados utilizando a premissa do item 7.7, os sistemas foram classificados segundo a orientação azimutal de seus módulos: Norte, Sul, Leste, Oeste, Leste/Oeste (duas águas) e reto (0°). Esse processo de depuração resultou em uma totalidade de 1.527 sistemas fotovoltaicos válidos. O cálculo da produtividade específica (*Yield*) e do *Performance Ratio (PR)* médio foi efetuado para cada um desses grupos em todas as macrorregiões do estado do Tocantins, cujos quantitativos estão detalhados na Tabela 10.

Tabela 7 - Quantitativo de sistemas fotovoltaicos analisados – Total

Orientação	Bico do Papagaio	Região Norte-Centro	Região Central	Região Sul	Total Geral
Norte	61	42	177	37	317
Leste	40	47	87	26	200
Oeste	200	140	67	65	472
Leste/Oeste	53	32	70	30	185
Sul	93	48	112	30	283
Reto (0°)	-	-	70	-	70
Total Regional	447	309	583	188	1.527

Fonte: Elaboração Própria.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os indicadores de produtividade (*Yield* específico) e de eficiência (*Performance Ratio* – PR) dos sistemas fotovoltaicos avaliados. A exposição dos resultados está organizada por macrorregião, seguindo uma ordem cronológica referente aos anos de 2023, 2024 e 2025. Para cada um desses recortes, são apresentados: o quantitativo final de usinas válidas para análise, os índices médios mensais de irradiação solar da localidade e a consolidação dos cálculos de *Yield* e PR, estratificados pela orientação dos módulos e dispostos em formato tabular e gráfico.

7.1 Análise de Desempenho Regional

A partir dessa organização, as subseções a seguir detalham os resultados específicos obtidos para cada uma das macrorregiões do estudo. A apresentação em todas as localidades segue uma estrutura padronizada, da seguinte maneira: (I) Quantitativo anual de sistemas validados para a amostra; (II) Dados da irradiação solar de referência utilizada nos cálculos mensais; (III) Gráficos mensais do *Yield* específico e do PR médio, comparando as eficiências entre as diferentes orientações dos módulos em cada ano; (IV) Gráficos comparativos do *Yield* e do PR médio englobando os três anos analisados (2023, 2024 e 2025), consolidando o resultado e o objetivo central deste trabalho; (V) Discussões dos resultados.

7.1.1 Região Central

- 2023
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

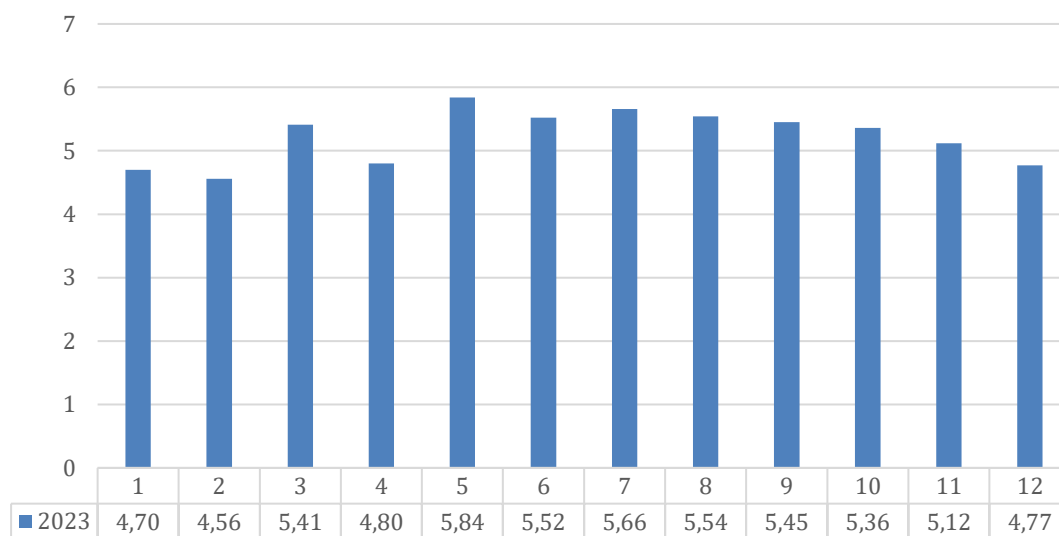
Tabela 8 - Quantidade de sistemas analisados 2023

Orientação	Quantidade de usinas
NORTE	56
LESTE	20
OESTE	17
LESTE/OESTE	21
SUL	32
RETO	24
Total	170

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

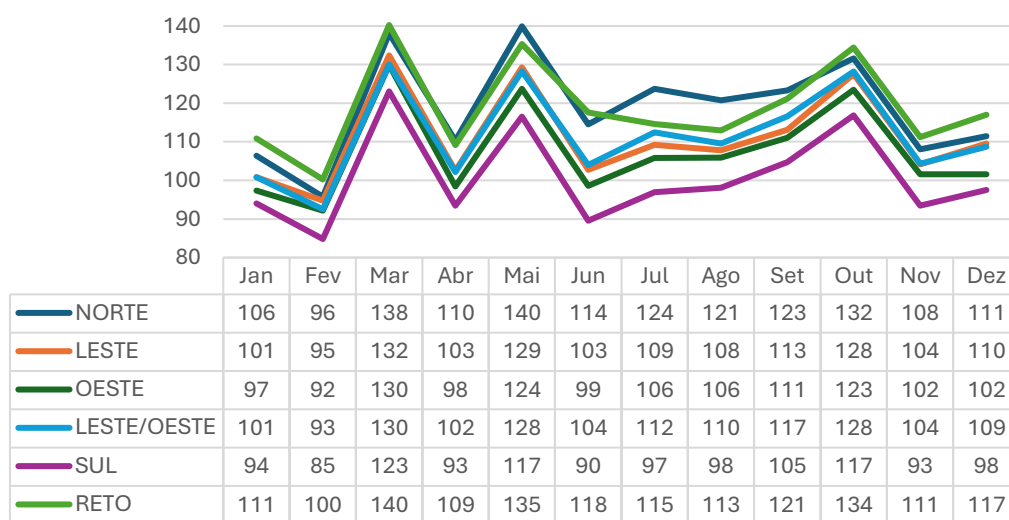
Gráfico 9 - Irradiações média mensais 2023 – Região Central.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (*Yield*):

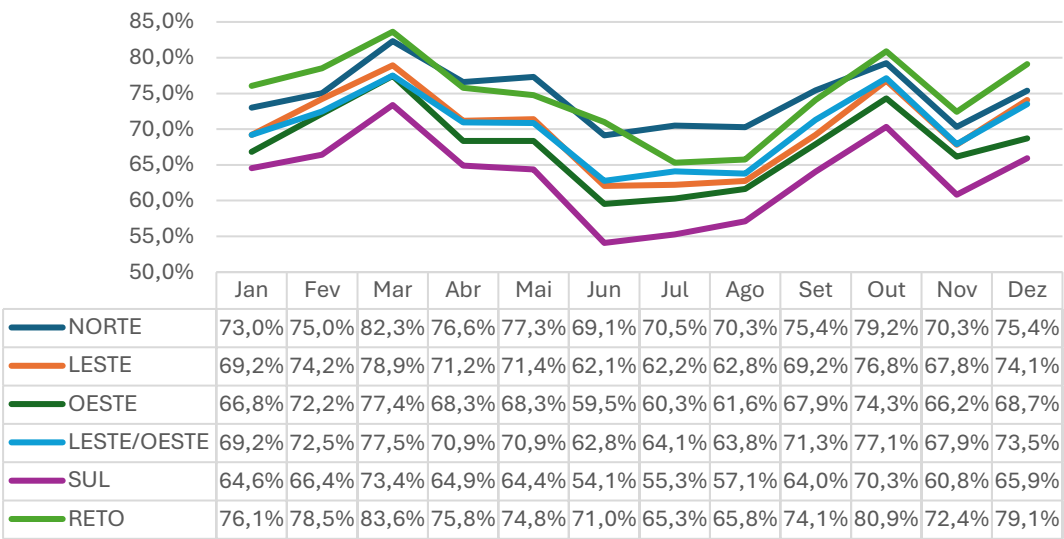
Gráfico 10 – Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) Performance Ratio (PR) médio:

Gráfico 11 – PR médio mensal (2023) – Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

• 2024

a) Quantidade de sistemas analisados:

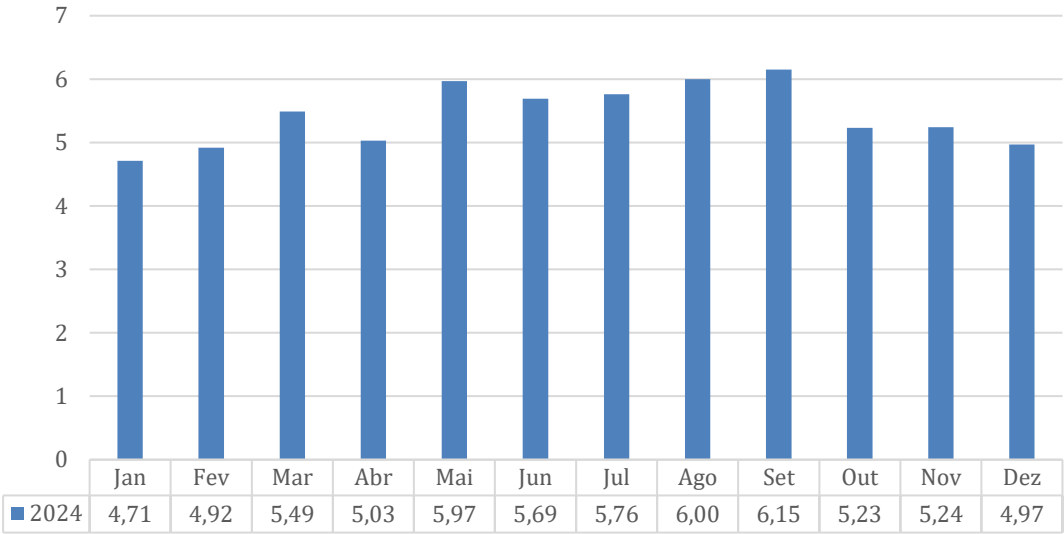
Tabela 9 - Quantidade de sistemas analisados 2024.

Orientação	Quantidade de usinas
NORTE	66
LESTE	31
OESTE	22
LESTE/OESTE	26
SUL	44
RETO	25
Total	214

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

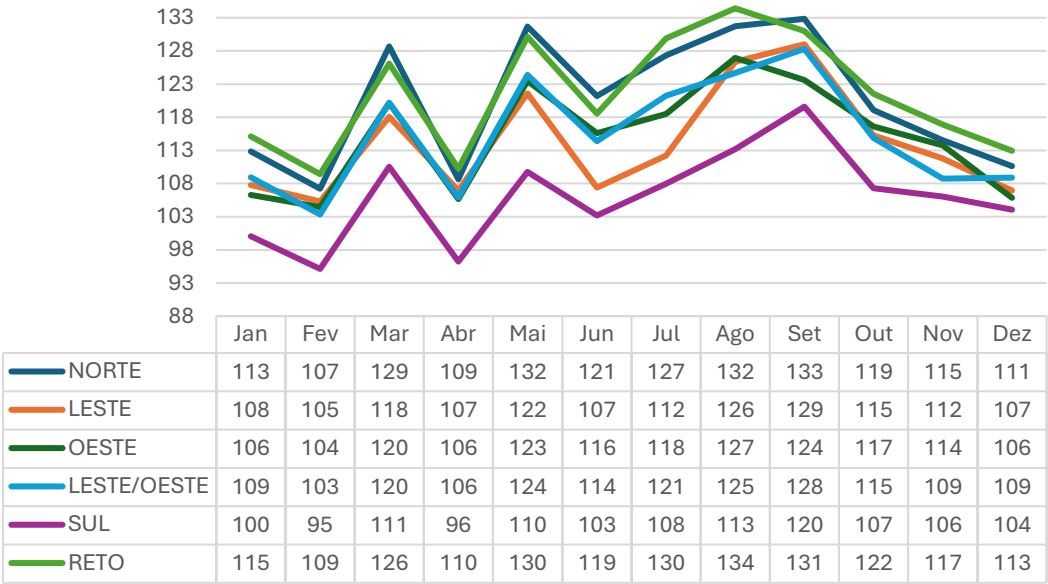
Gráfico 12 - Irradiações média mensais 2024 – Região Central.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

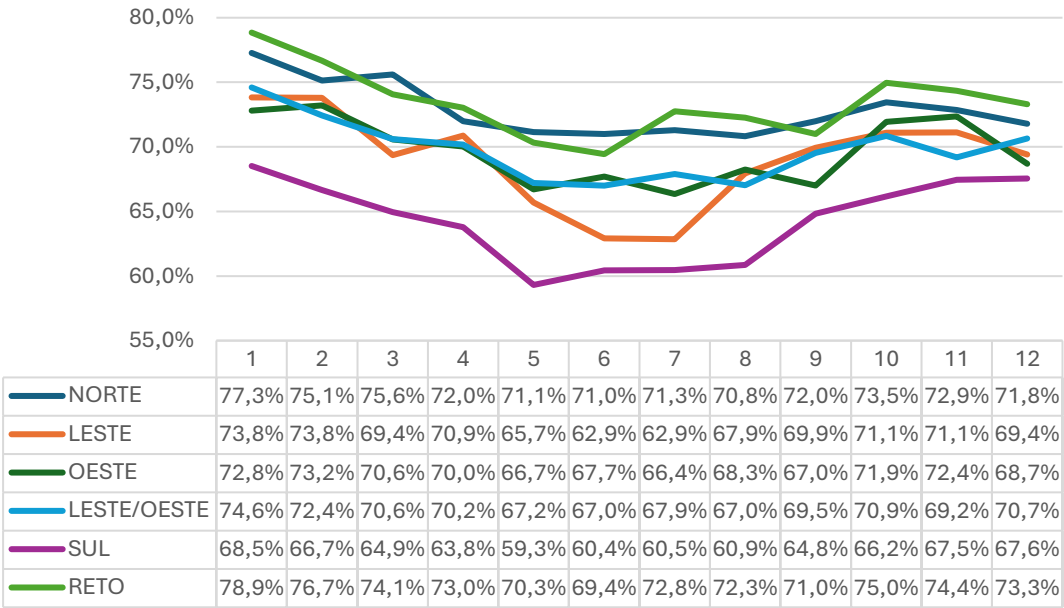
Gráfico 13 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) Perfomance Ratio (PR) médio:

Gráfico 14 - PR médio mensal (2024) – Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

• 2025

a) Quantidade de sistemas analisados:

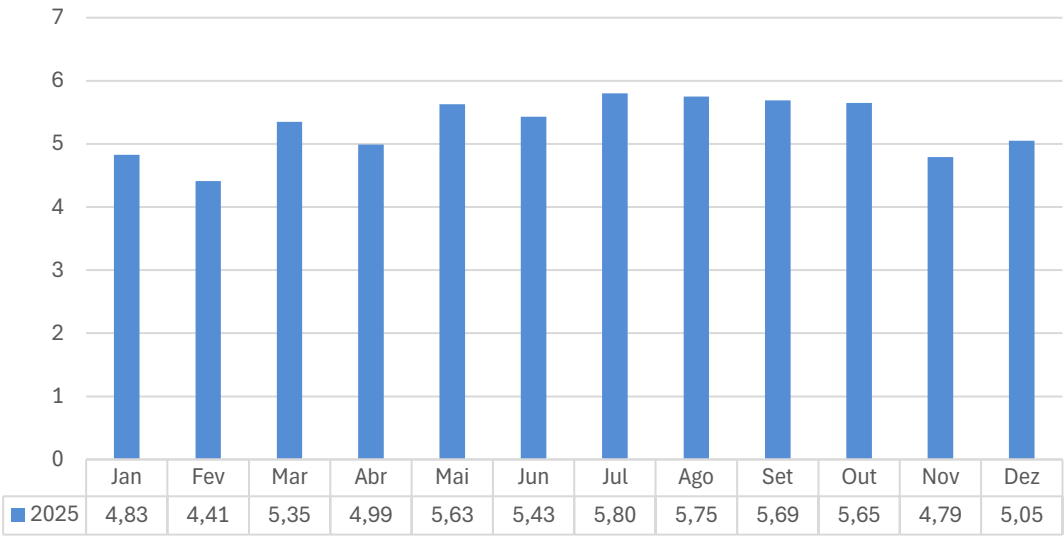
Tabela 10 - Quantidade de sistemas analisados 2025.

Orientação	Quantidade de usinas
NORTE	55
LESTE	36
OESTE	28
LESTE/OESTE	23
SUL	36
RETO	21
Total	199

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média utilizada:

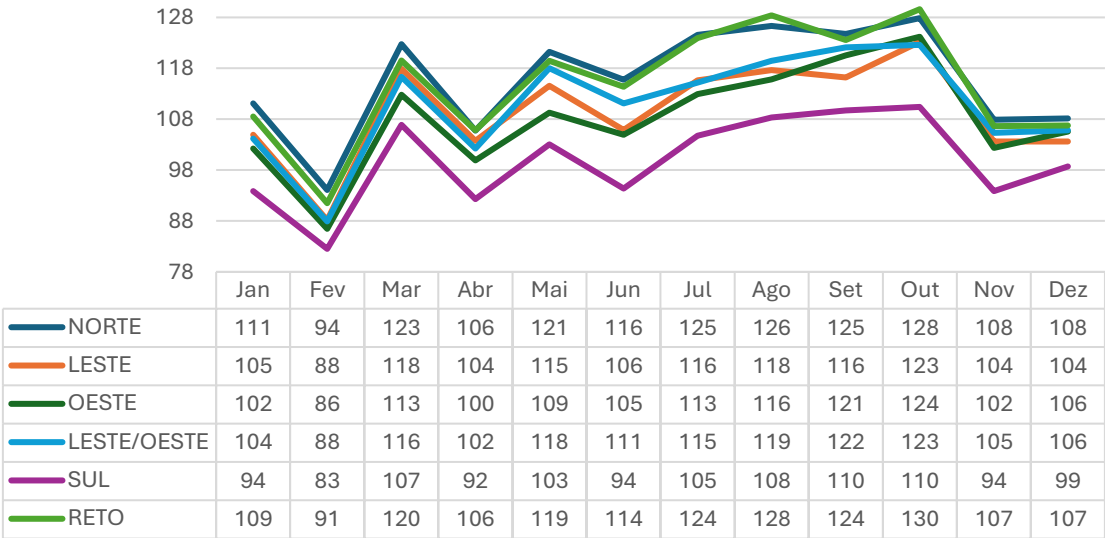
Gráfico 15 - Irradiações média mensais 2025 – Região Central.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

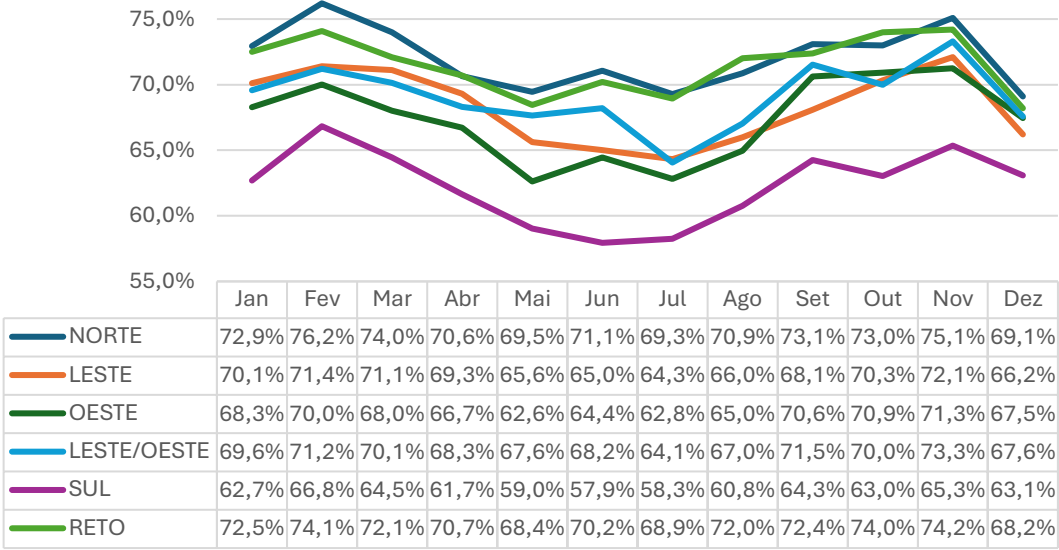
Gráfico 16 - Produtividade Específica Mensal (2025) – Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) Perfomance Ratio (PR) médio:

Gráfico 17 - PR médio mensal (2025) – Região Central.

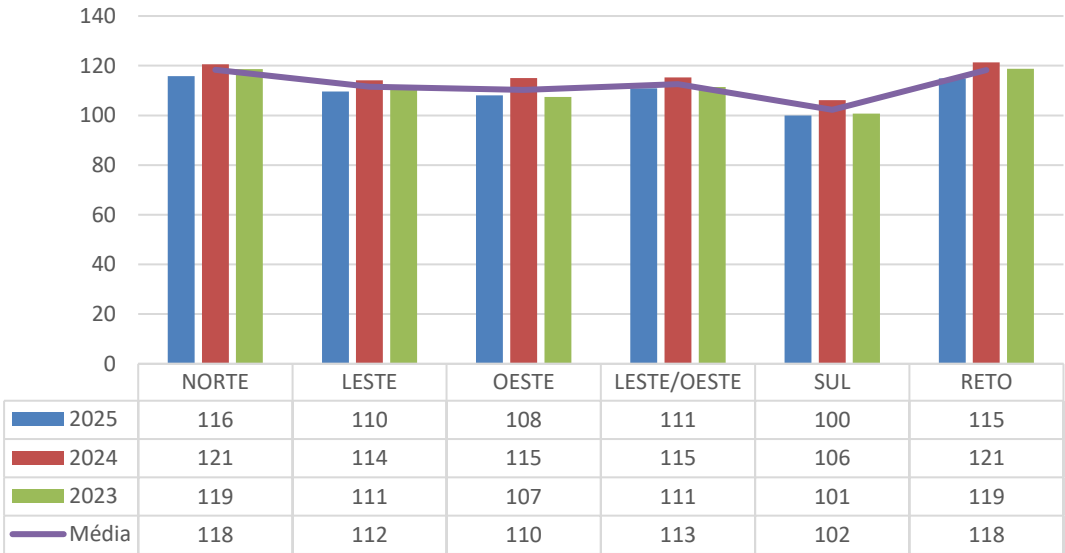


Fonte: Elaboração Própria (2026).

- Consolidação dos resultados

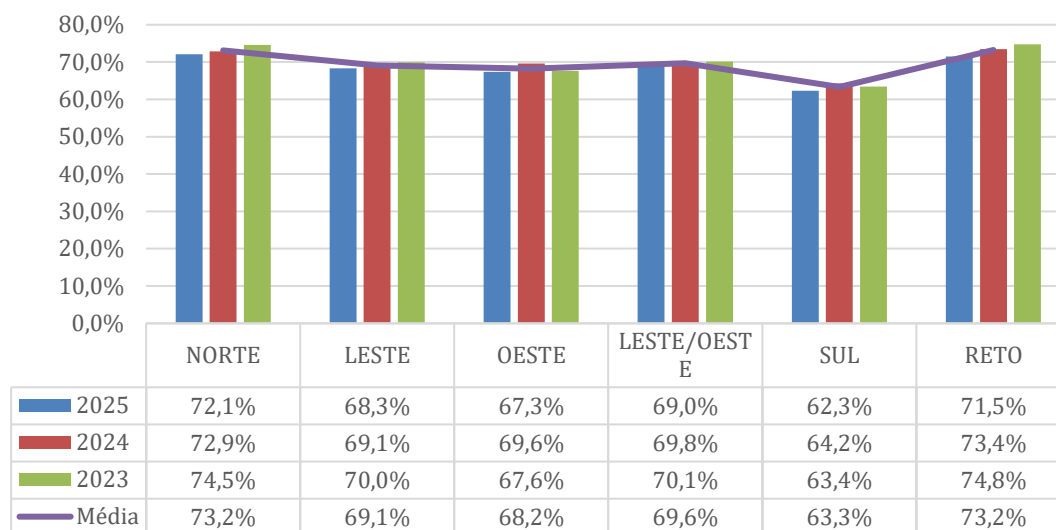
a) Produtividade específica final:

Gráfico 18 - Consolidação Final do Yield - Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) *Performance Ratio* médio final:

Gráfico 19 - Consolidação Final do PR – Região Central.

Fonte: Elaboração Própria (2026).

7.1.2 Discussões da região central

Ao longo do triênio avaliado (2023-2025), a Região Central concentrou o maior volume de usinas do estudo, totalizando 583 sistemas fotovoltaicos válidos. A Tabela 14 detalha o quantitativo dessas unidades.

Tabela 11 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Central.

Orientação	Quantidade de sistemas
NORTE	177
LESTE	87
OESTE	67
LESTE/OESTE	70
SUL	112
RETO	70
Total	583

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Na avaliação da produtividade específica (*Yield*) da Região central, as orientações norte e reto apresentaram os maiores valores, atingindo uma média de **118 kWh/kW**. No entanto, os sistemas de orientação sul registraram a menor produtividade da amostra **102,25 kWh/kWp**, o que representa uma defasagem de **13,6%** em relação à orientação norte e reto. As orientações Leste, Oeste e Leste/Oeste mantiveram-se em um nível intermediário de aproximadamente **110**

kWh/kWp, apresentando uma defasagem em torno de **7%** em relação as orientações norte e reto.

Quanto à eficiência (*Performance Ratio - PR*), o comportamento foi semelhante. As orientações reto e norte alcançaram os maiores índices **73,23% e 73,16%**. Em seguida, notou-se um decréscimo nas faces Leste/Oeste (**69,65%**), Leste (**69,12%**) e Oeste (**68,21%**), chegando no limite mais crítico da face Sul, que operou com apenas (**63,32%**) de eficiência.

7.1.3 Região do Bico do Papagaio

- 2023
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

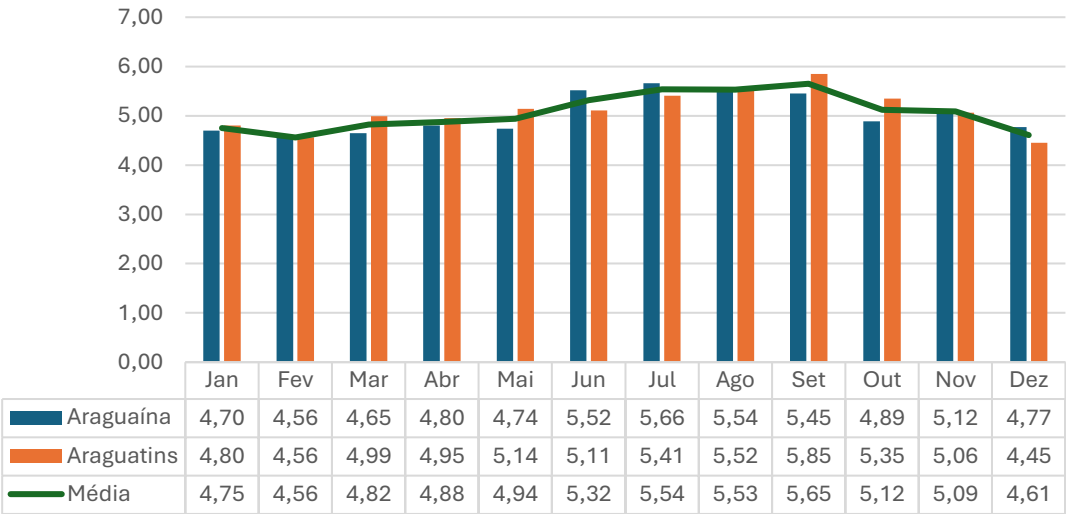
Tabela 12 - Quantidade de sistemas analisados 2023.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	17
LESTE/OESTE	13
NORTE	58
OESTE	15
SUL	27
Total	130

Fonte: Elaboração Própria (2026).

- b) Irradiação média mensal utilizada:

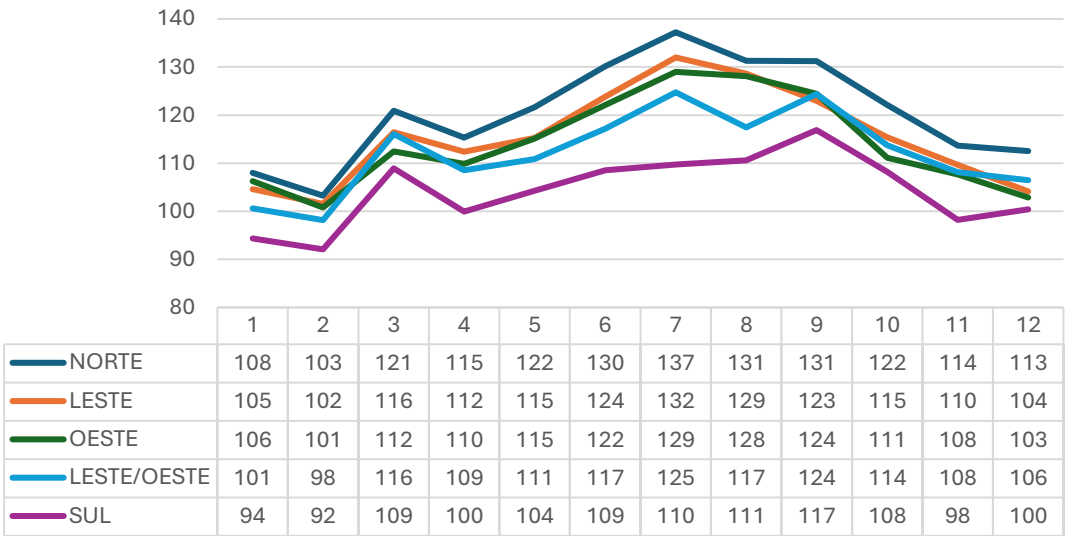
Gráfico 20 - Irradiações média mensais 2023 – Região Bico do Papagaio.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (*Yield*):

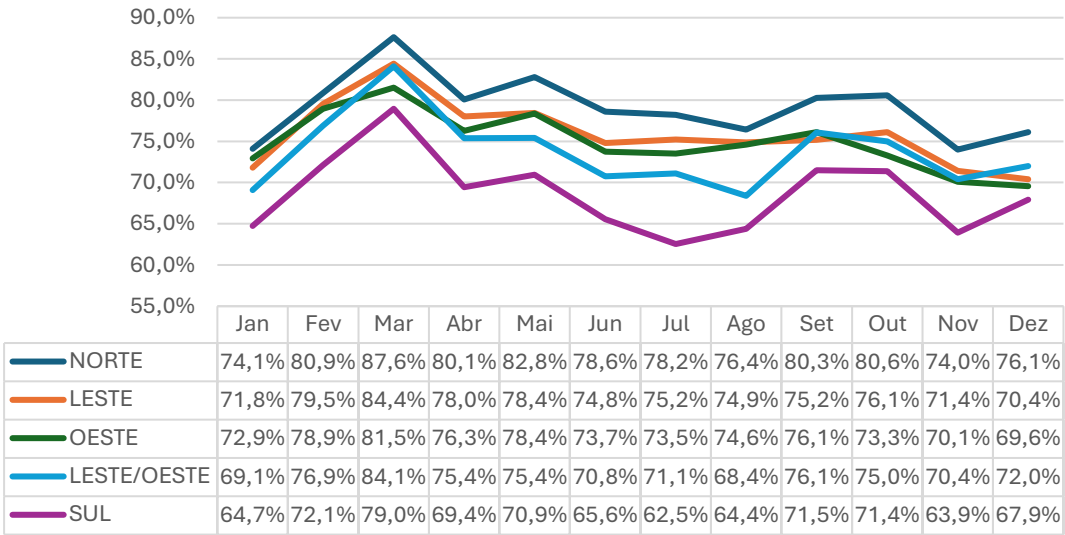
Gráfico 21 - Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 22 - PR médio mensal (2023) - Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- 2024
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

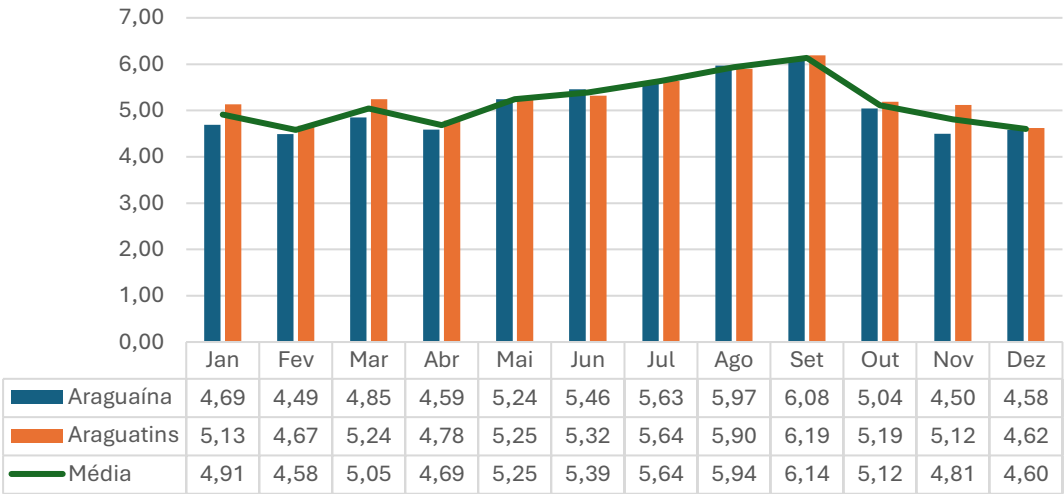
Tabela 13 - Quantidade de sistemas analisados 2024.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	23
LESTE/OESTE	15
NORTE	76
OESTE	17
SUL	31
Total	162

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

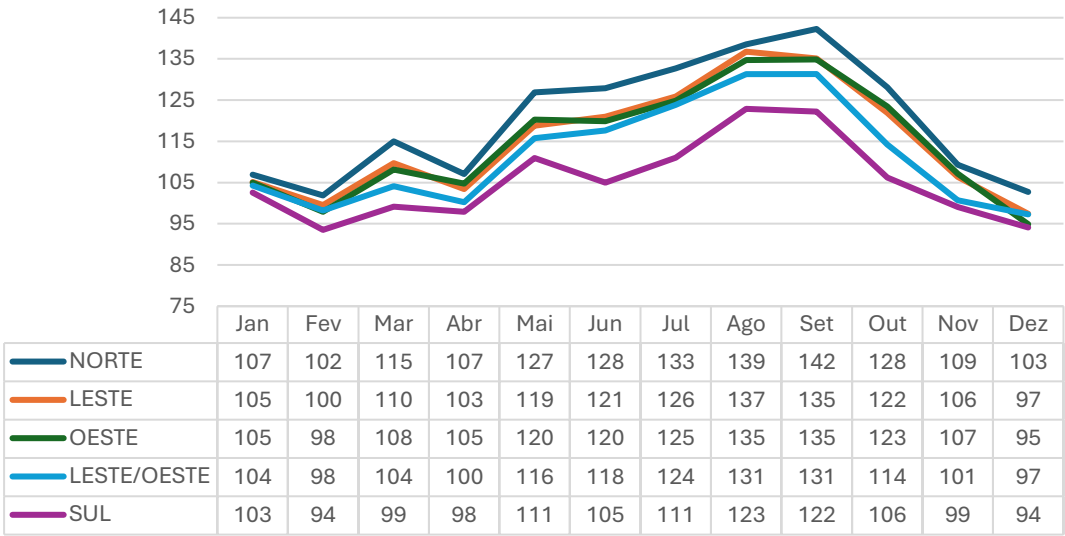
Gráfico 23 - Irradiações média mensais 2024 – Região Bico do Papagaio.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

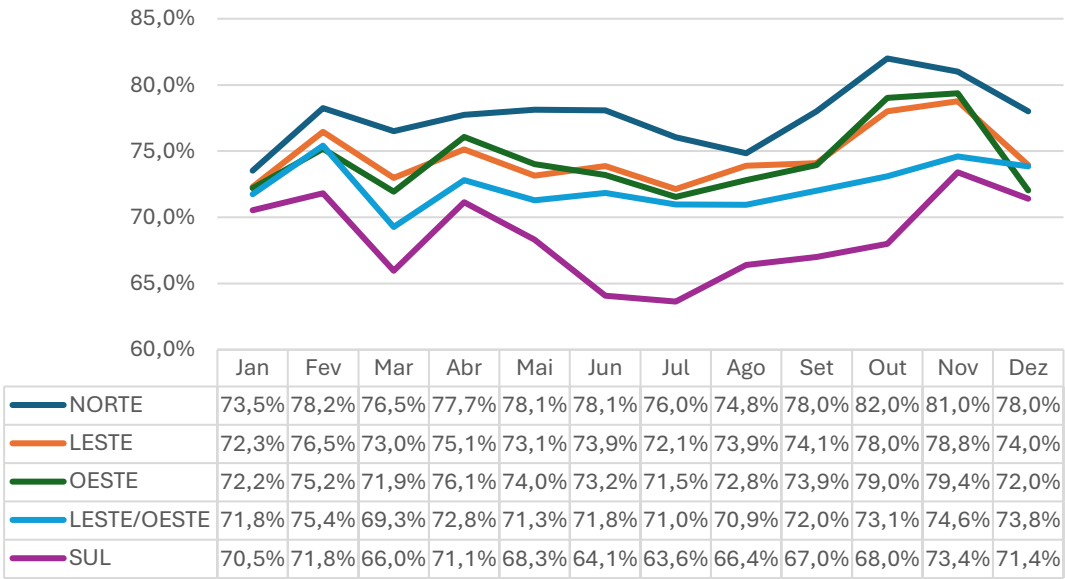
Gráfico 24 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 25 - PR médio mensal (2024) - Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- 2025
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

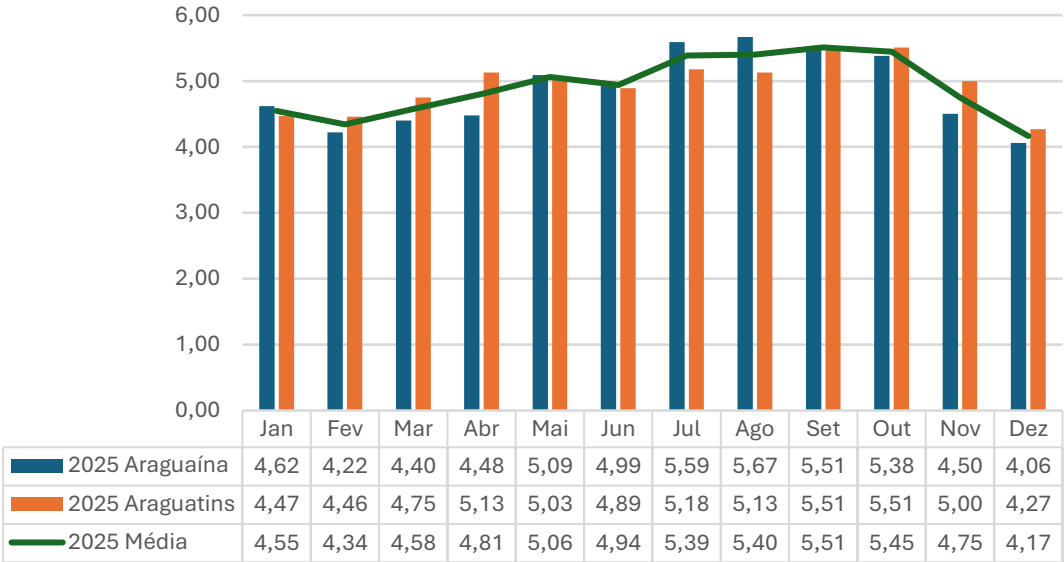
Tabela 14 - Quantidade de sistemas analisados 2025.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	21
LESTE/OESTE	12
NORTE	66
OESTE	21
SUL	35
Total	155

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

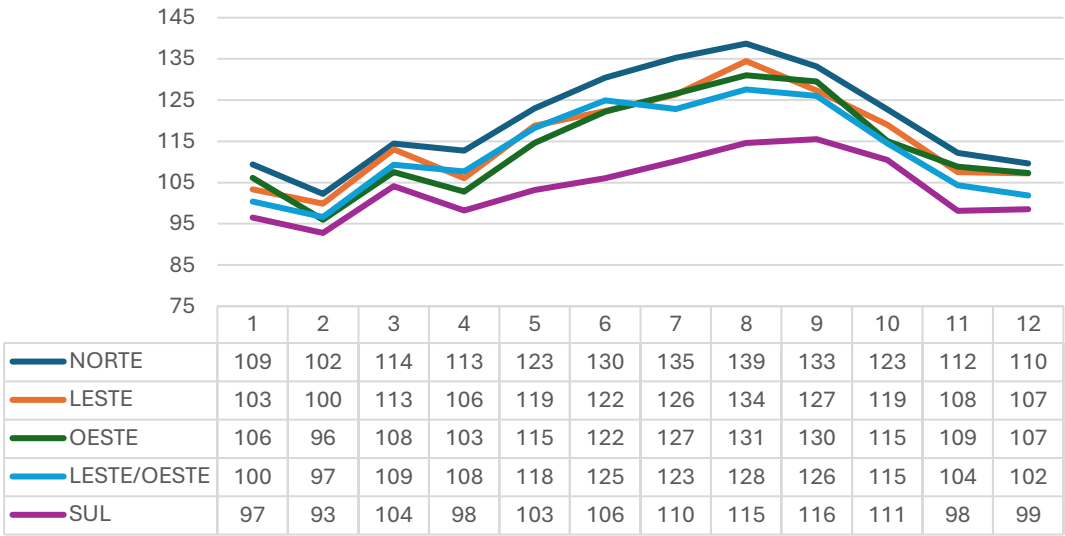
Gráfico 26 - Irradiações média mensais 2025 – Região Bico do Papagaio.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

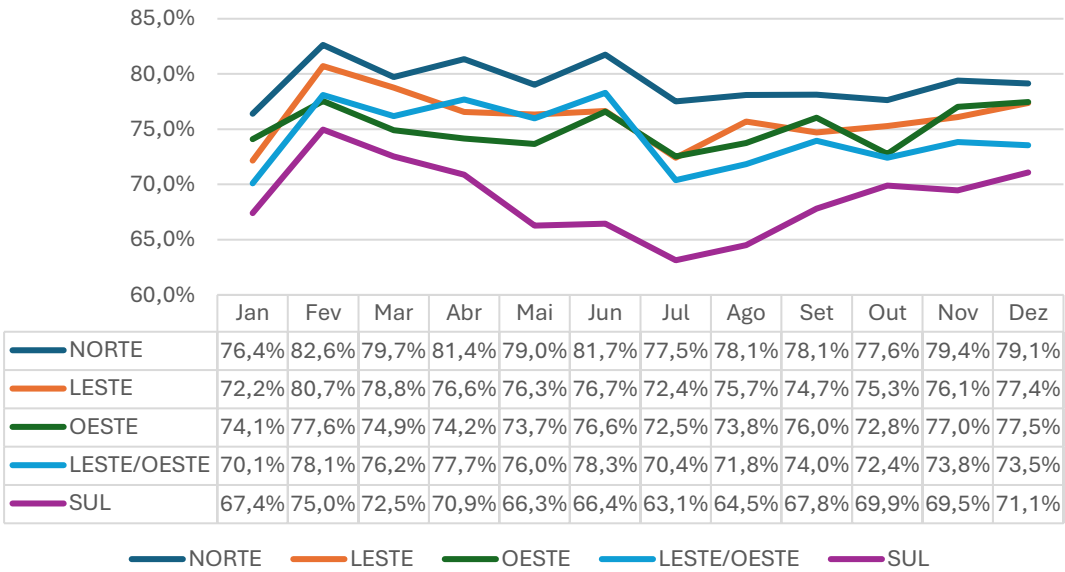
Gráfico 27 - Produtividade Específica Mensal (2025) – Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

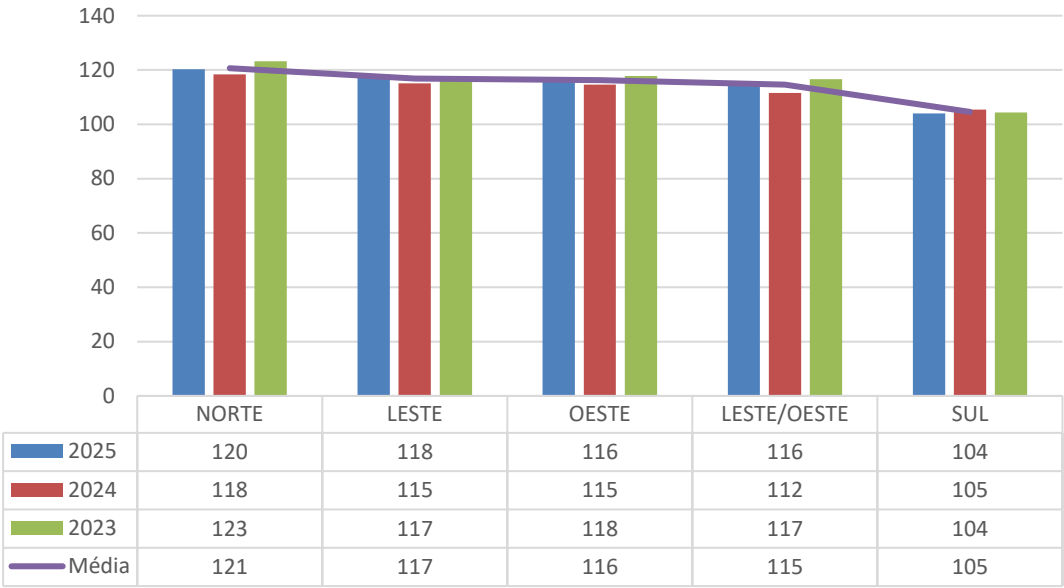
Gráfico 28 - PR médio mensal (2025) - Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- Consolidação de Resultados
 - a) Produtividade específica final:

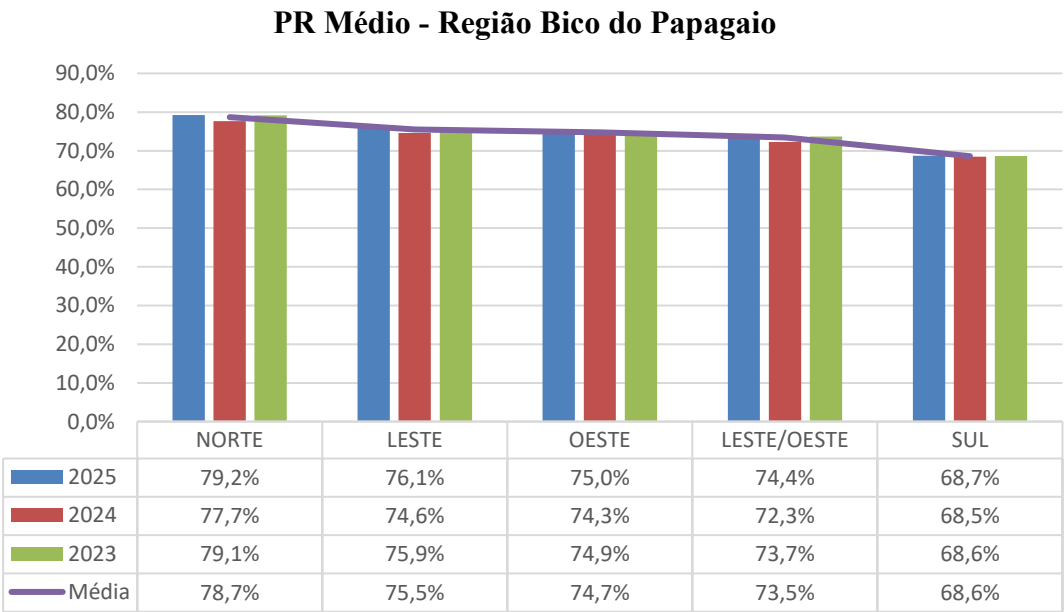
Gráfico 29 - Consolidação Final do Yield - Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) *Performance Ratio* médio final:

Gráfico 30 - Consolidação Final do PR – Região Bico do Papagaio.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

7.1.4 Discussões

A Região do Bico do Papagaio totalizou em 447 sistemas válidos para análise. A tabela 18 descreve o quantitativo por cada orientação:

Tabela 15 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Bico do Papagaio.

Orientação	Quantidade de sistemas
NORTE	200
LESTE	61
OESTE	53
LESTE/OESTE	40
SUL	93
Total	447

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Avaliando a produtividade específica (*Yield*), nota-se que a orientação norte apresentou valores superiores, atingindo **120,66 kWh/kWp**, seguida pelas orientações leste (**116,92 kWh/kWp**) e oeste (**116,22 kWh/kWp**). Os arranjos voltados para o sul registraram a menor produtividade da amostra (**104,59 kWh/kWp**).

O *Performance Ratio* (PR) reforça a superioridade da eficiência da orientação norte em relação as demais, alcançando uma eficiência média de **78,68%**, indicando um nível de perdas próximas a **21,3%**. O PR decresce nas orientações leste (**75,49%**), oeste (**74,74%**) e leste/oeste (**73,46%**), chegando na orientação sul, com **68,60%**, indicando perdas médias próximas a **31%**.

7.1.5 Região Norte-Centro

- 2023
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

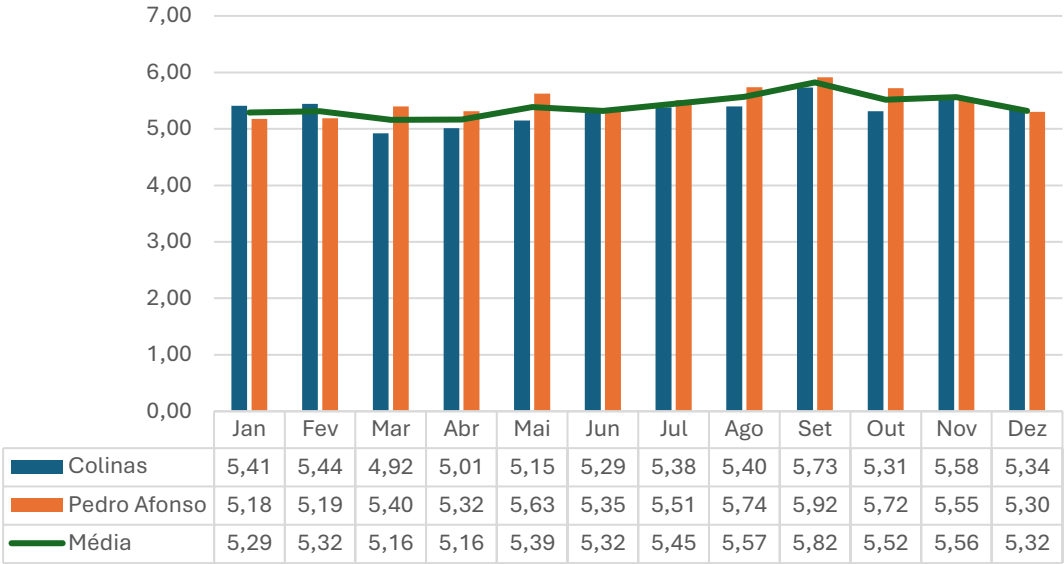
Tabela 16 - Quantidade de sistemas analisados 2023.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	13
LESTE/OESTE	13
NORTE	39
OESTE	15
SUL	14
Total	94

Fonte: Elaboração Própria (2026)

b) Irradiação média mensal utilizada:

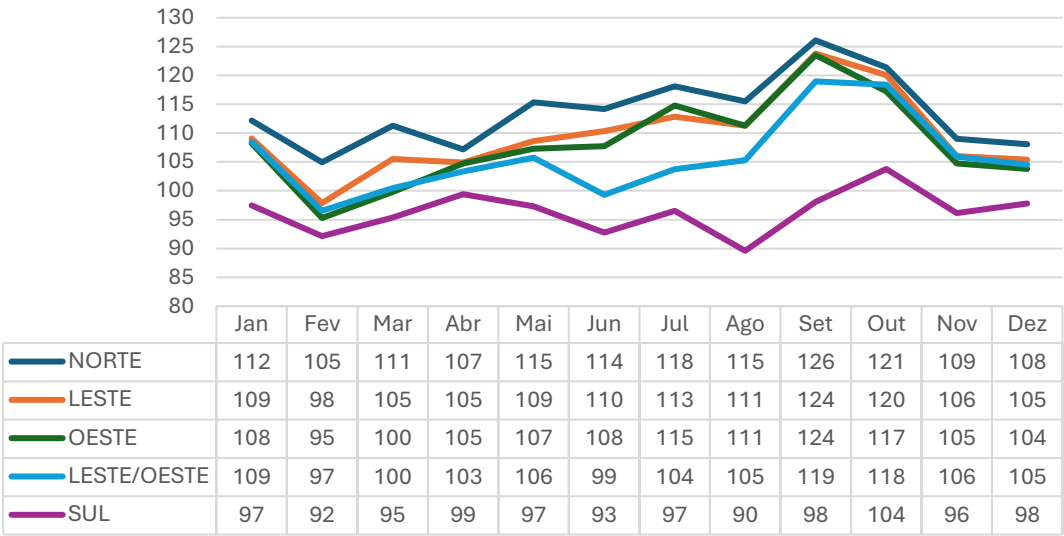
Gráfico 31 - Irradiações média mensais 2023 – Região Norte Centro.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (*Yield*):

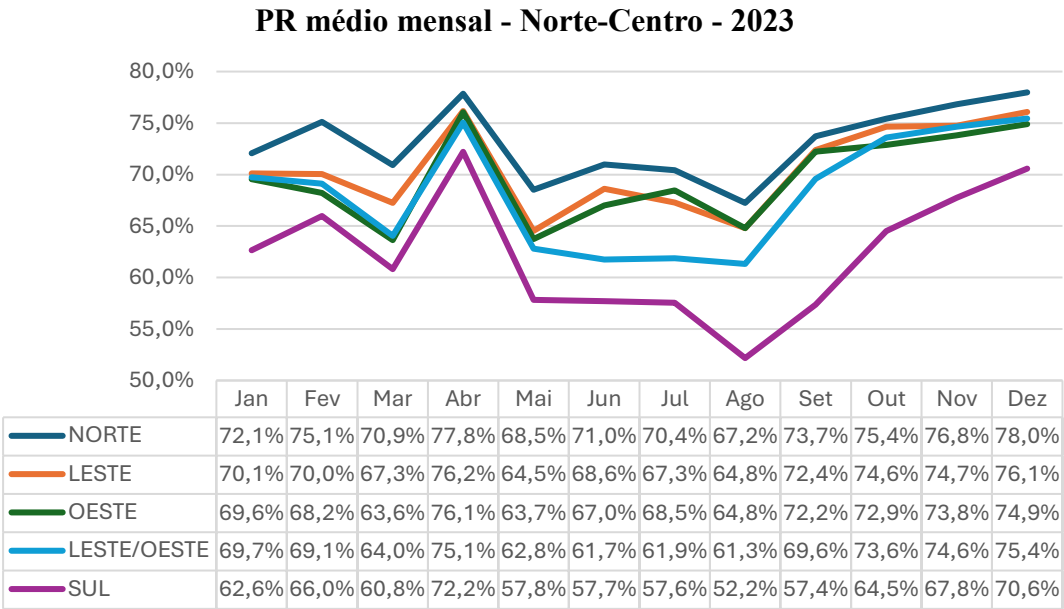
Gráfico 32 - Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 33 - PR médio mensal (2023) - Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- 2024
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

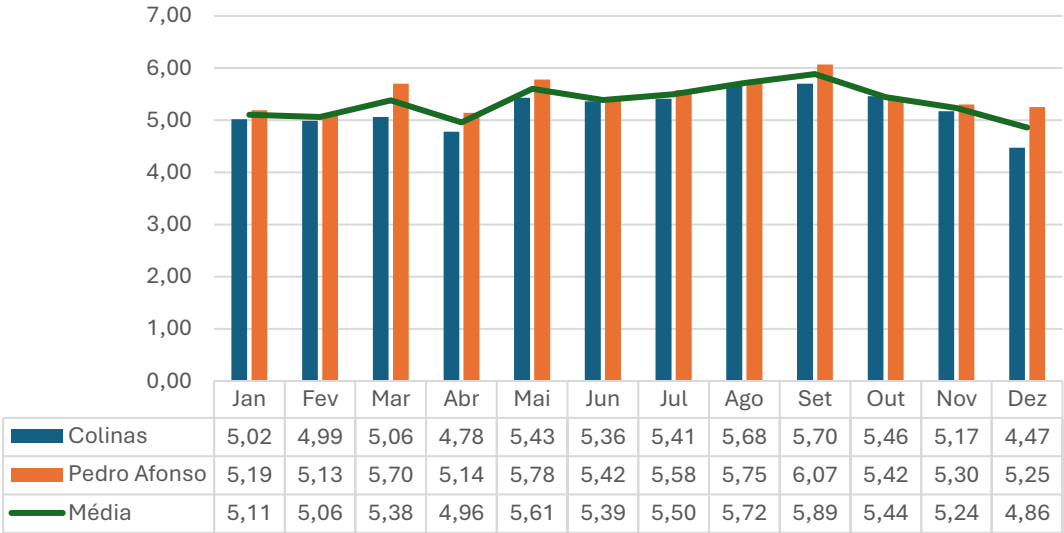
Tabela 17 - Quantidade de sistemas analisados 2024.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	14
LESTE/OESTE	12
NORTE	58
OESTE	6
SUL	20
Total	110

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

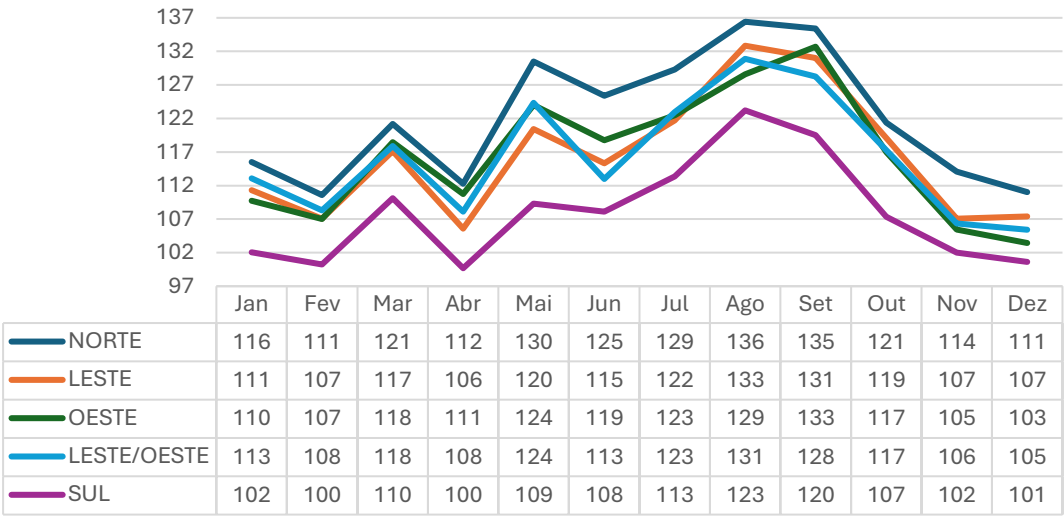
Gráfico 34 - Irradiações média mensais 2024 – Região Norte Centro.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

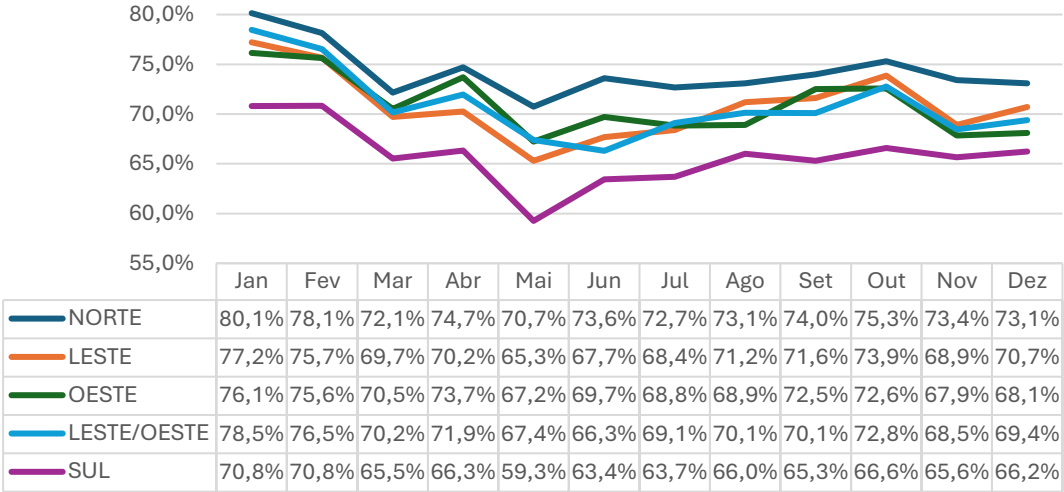
Gráfico 35 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 36 - PR médio mensal (2024) - Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- 2025
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

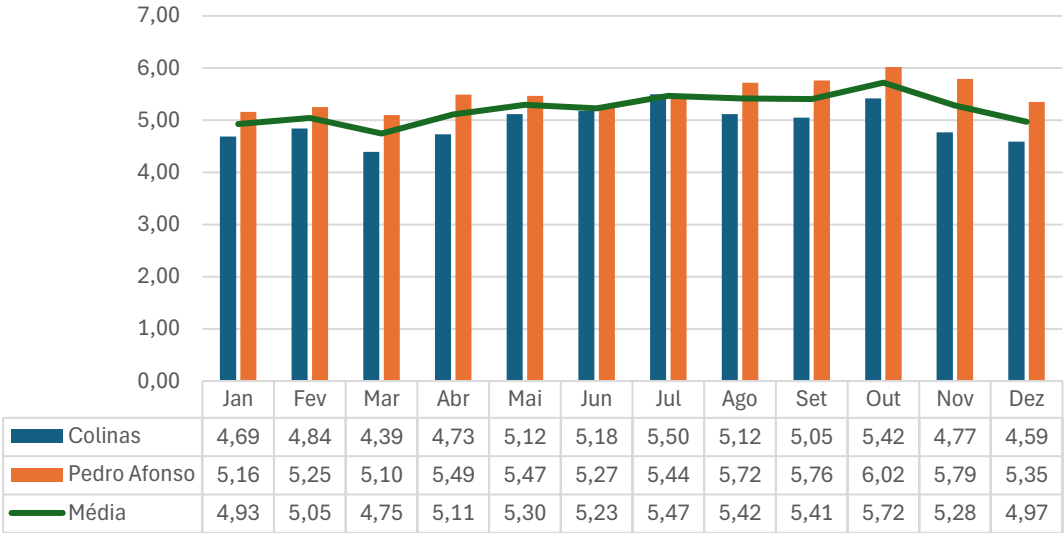
Tabela 18 - Quantidade de Sistemas analisados 2025.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	15
LESTE/OESTE	22
NORTE	43
OESTE	11
SUL	14
Total	105

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

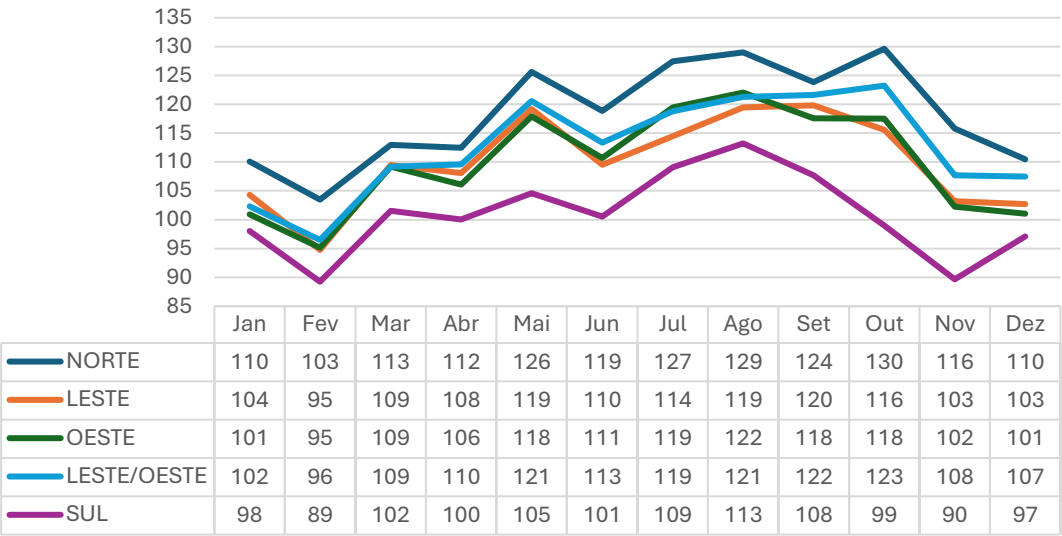
Gráfico 37 - Irradiações média mensais 2025 – Região Norte Centro.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

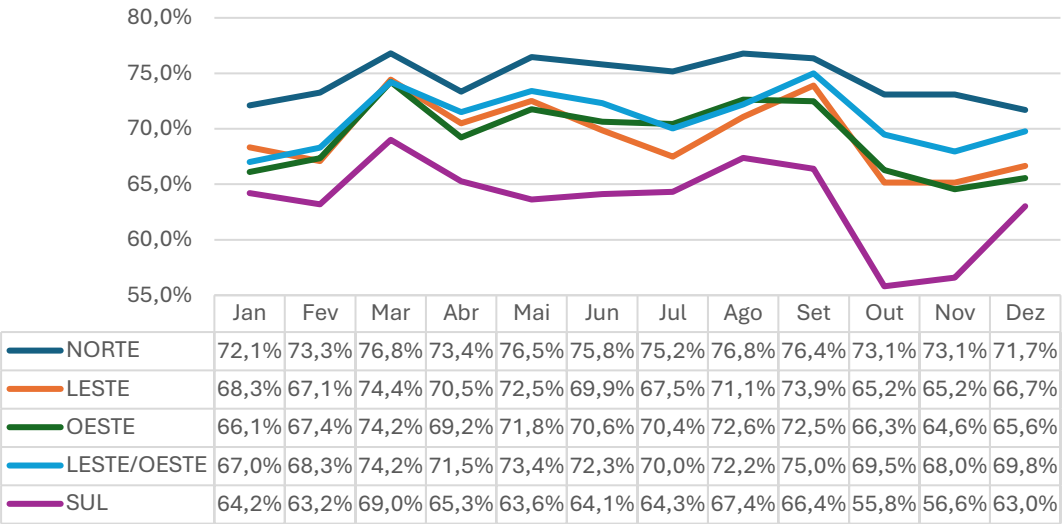
Gráfico 38 - Produtividade Específica Mensal (2025) – Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 39 - PR médio mensal (2025) - Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- Consolidação de Resultados
 - a) Produtividade específica final:

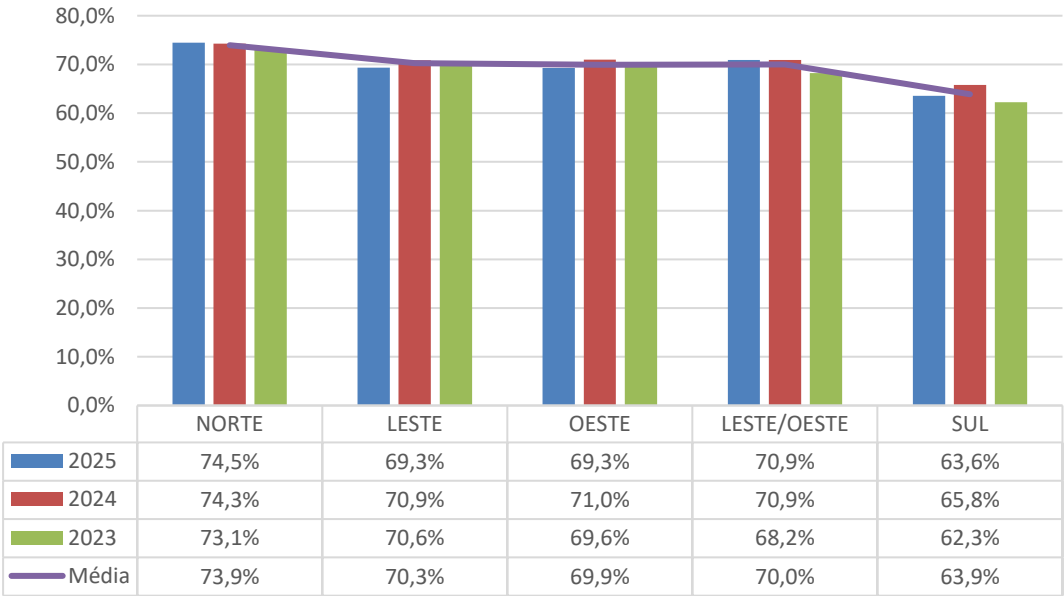
Gráfico 40 - Consolidação Final do Yield - Região Norte Centro.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) *Performance Ratio* médio final:

Gráfico 41 - Consolidação Final do PR – Região Central.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

7.1.6 Discussões

A Região Norte-Centro totalizou em 447 sistemas válidos para análise. A tabela 18 descreve o quantitativo por cada orientação:

Tabela 19 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Norte Centro.

Orientação	Quantidade de sistemas
NORTE	140
LESTE	42
OESTE	32
LESTE/OESTE	47
SUL	48
Total	309

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Na avaliação da produtividade (*Yield* específico), a orientação Norte consolidou-se com o melhor rendimento médio do período, atingindo **117,94 kWh/kWp**, seguida pelas faces Leste (**112,01 kWh/kWp**), Leste/Oeste (**111,62 kWh/kWp**) e Oeste (**111,57 kWh/kWp**). A orientação sul registrou produtividade de **101,71 kWh/kWp**, evidenciando uma defasagem de aproximadamente **13,8%** em relação à face Norte.

Este panorama reflete-se no PR, onde a orientação norte obteve o maior índice **73,95%**, atestando menores perdas, enquanto a orientação sul operou com a eficiência mais crítica do grupo (**63,88%**). As demais orientações mantiveram-se nível intermediário, com valores próximos a **70%**.

7.1.7 Região Sul

- 2023
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

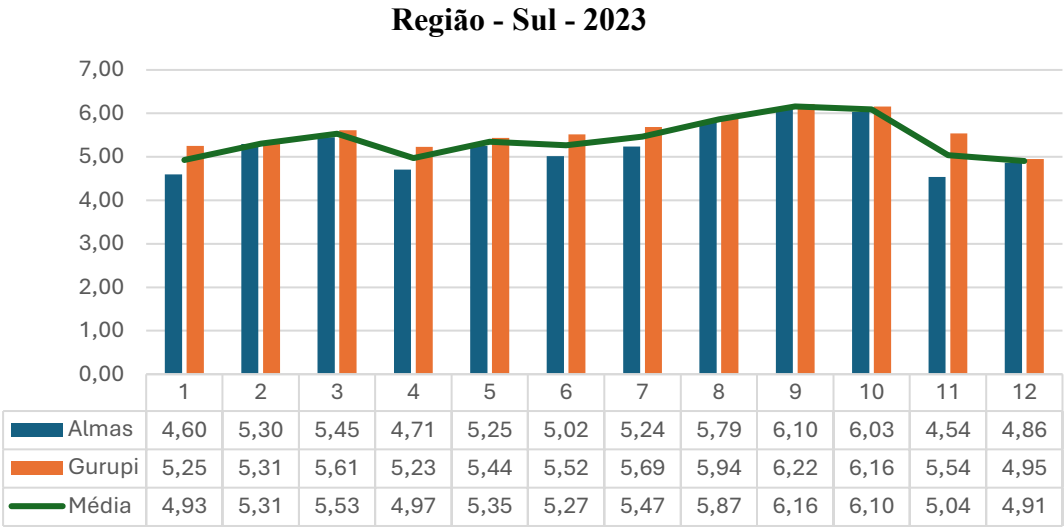
Tabela 20 - Quantidade de sistemas analisados 2023.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	9
LESTE/OESTE	6
NORTE	18
OESTE	8
SUL	9
Total	50

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

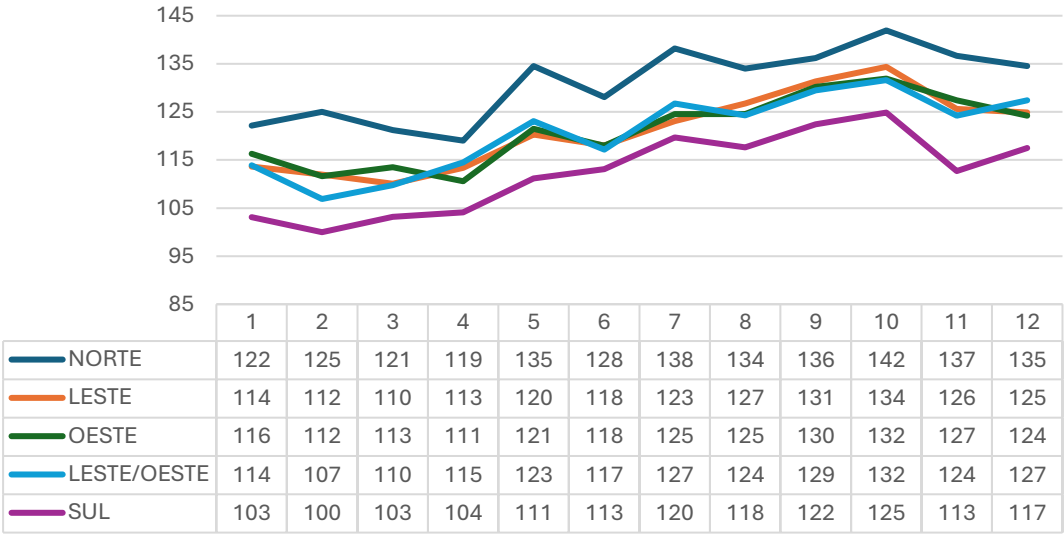
Gráfico 42 - Irradiações média mensais 2023 – Região Sul.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

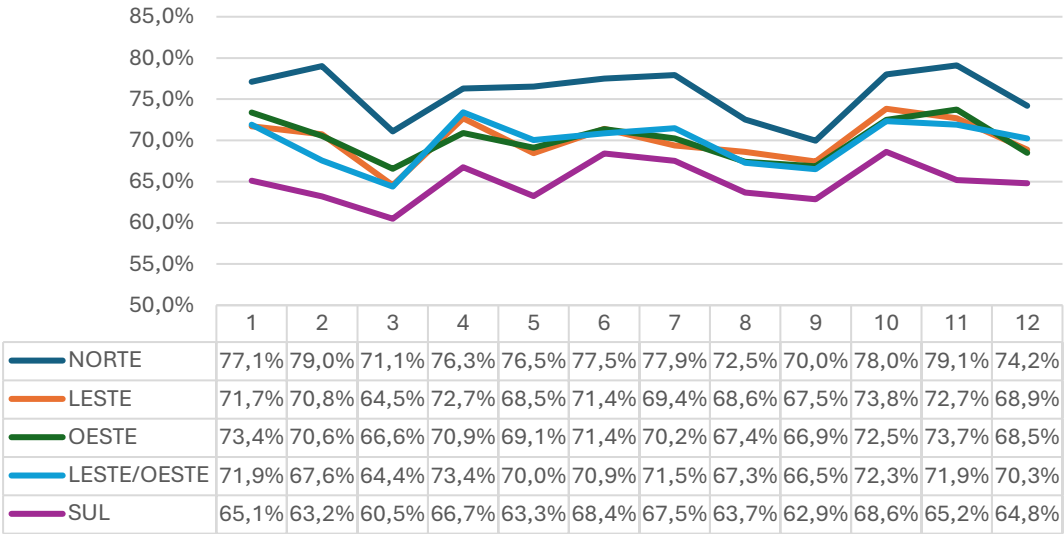
Gráfico 43 - Produtividade Específica Mensal (2023) – Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 44 - PR médio mensal (2023) - Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- 2024
 - a) Quantidade de sistemas analisado:

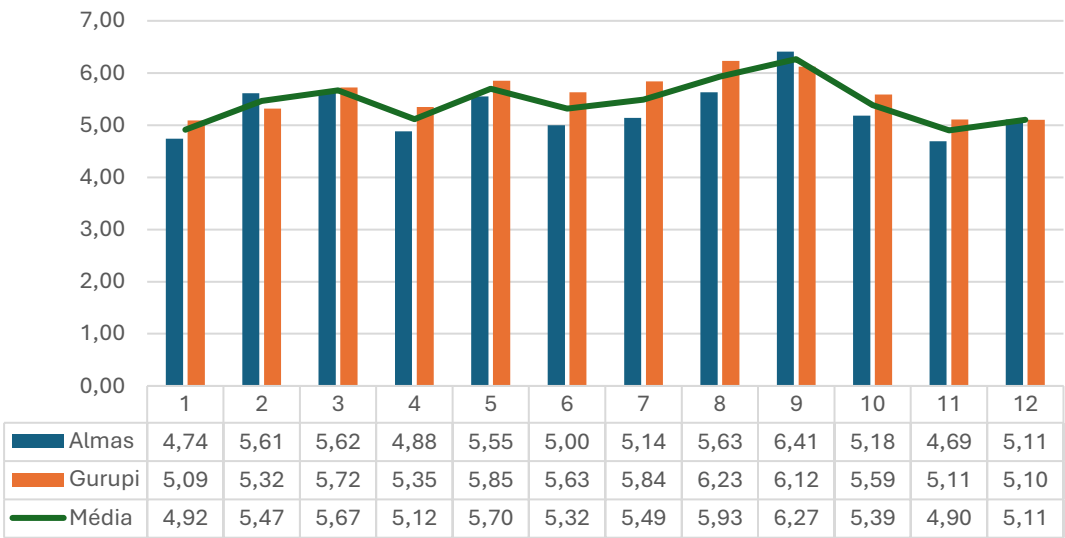
Tabela 21 - Quantidade de sistemas analisados 2024.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	14
LESTE/OESTE	8
NORTE	22
OESTE	12
SUL	12
Total	68

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

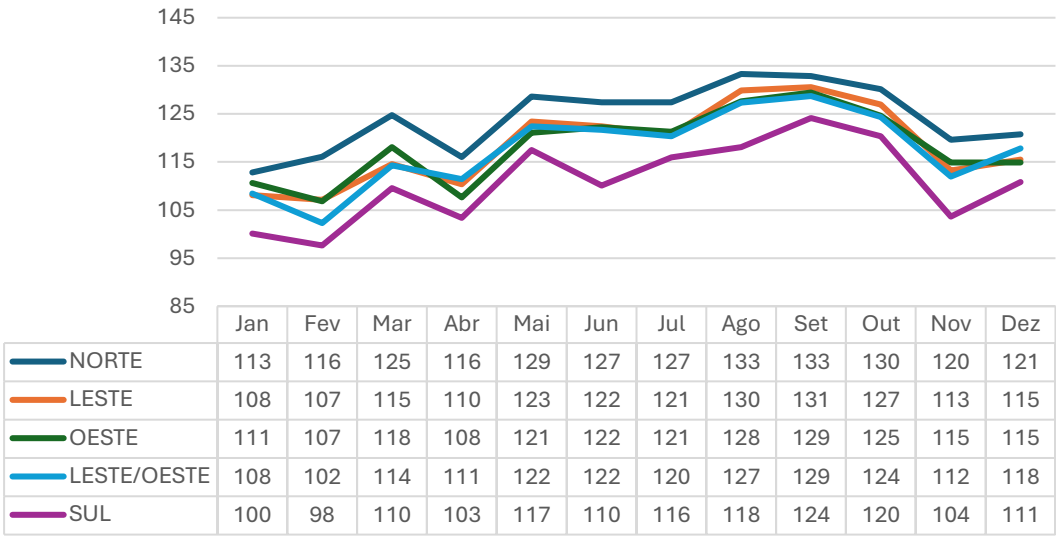
Gráfico 45 - Irradiações média mensais 2024 – Região Sul.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

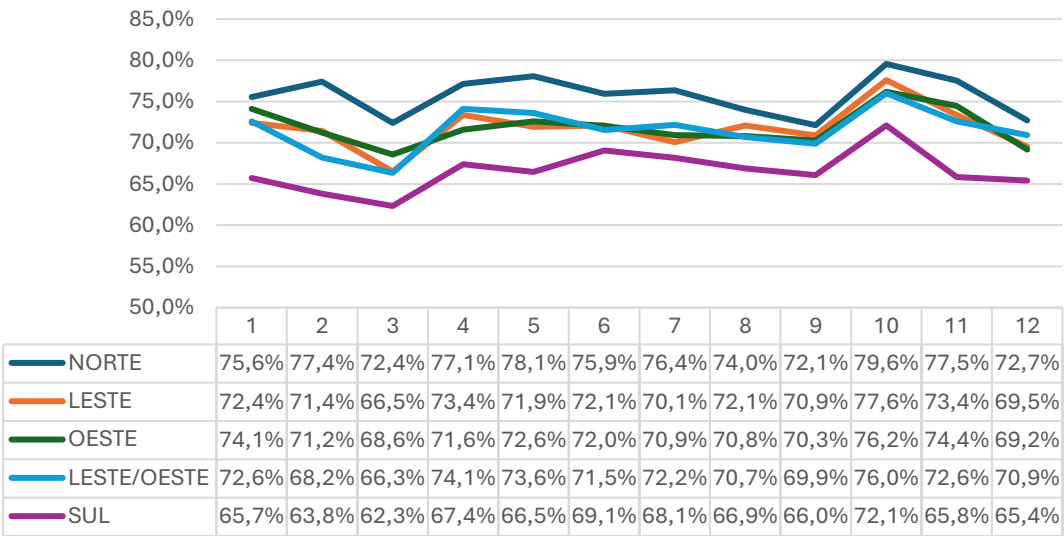
Gráfico 46 - Produtividade Específica Mensal (2024) – Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

Gráfico 47 - PR médio mensal (2024) - Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- 2025
 - a) Quantidade de sistemas analisados:

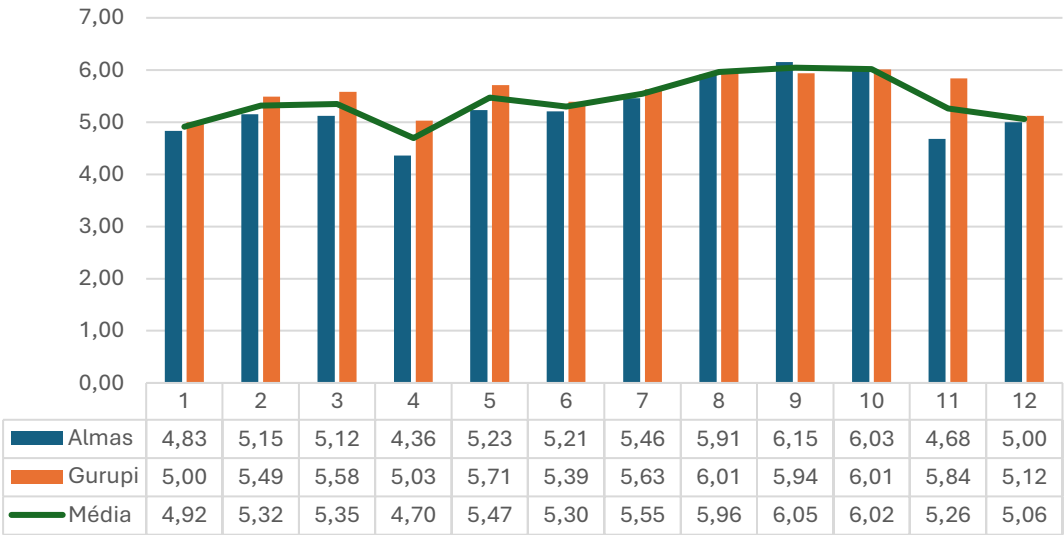
Tabela 22 - Quantidade de sistemas analisados 2025.

Orientação	Quantidade de Usinas
LESTE	14
LESTE/OESTE	12
NORTE	25
OESTE	10
SUL	9
Total	70

Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) Irradiação média mensal utilizada:

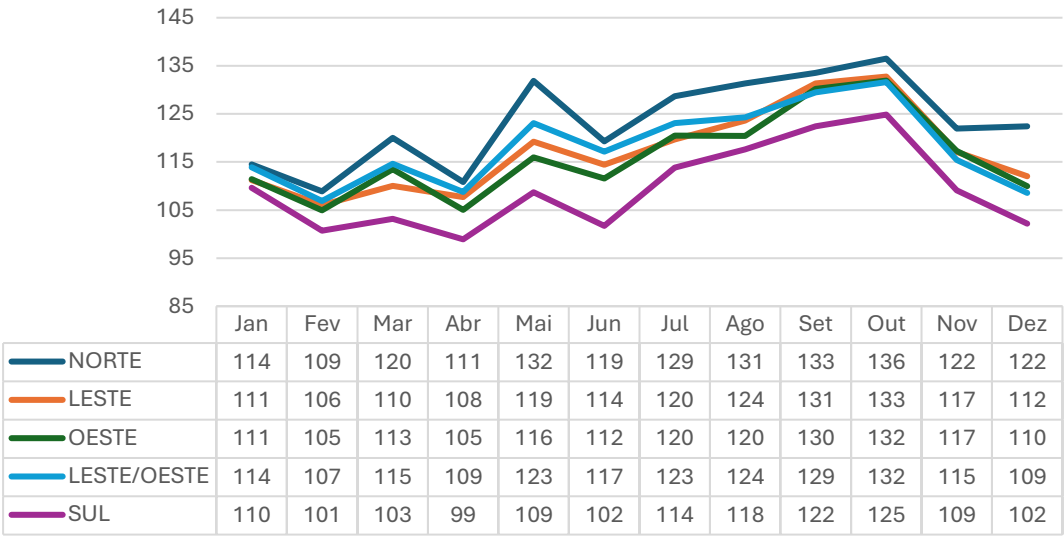
Gráfico 48 - Irradiações média mensais 2025 – Região Sul.



Fonte: INMET (2026).

c) Produtividade específica (Yield):

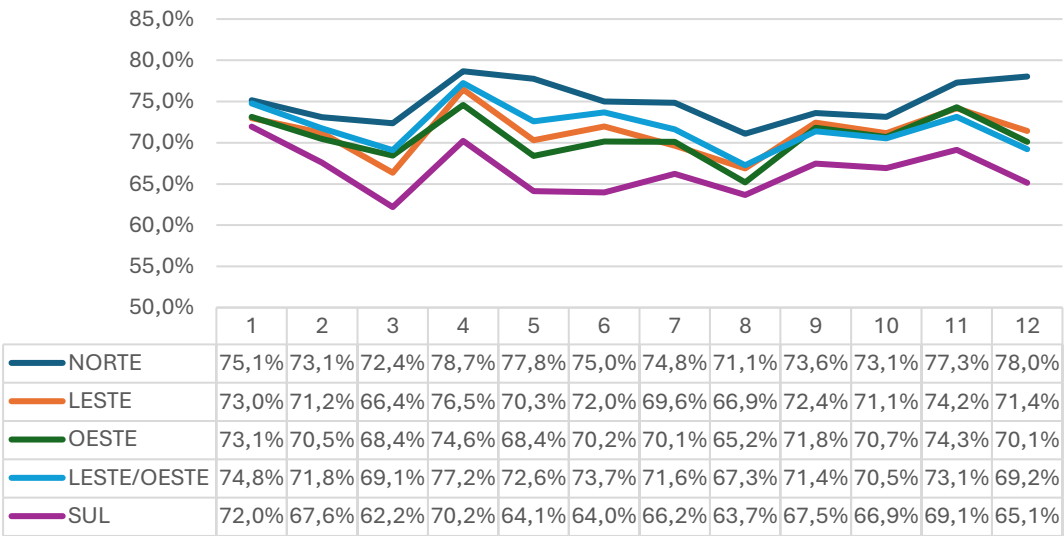
Gráfico 49 - Yield Específico mensal - Sul -2025.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

d) *Perfomance Ratio* (PR) médio:

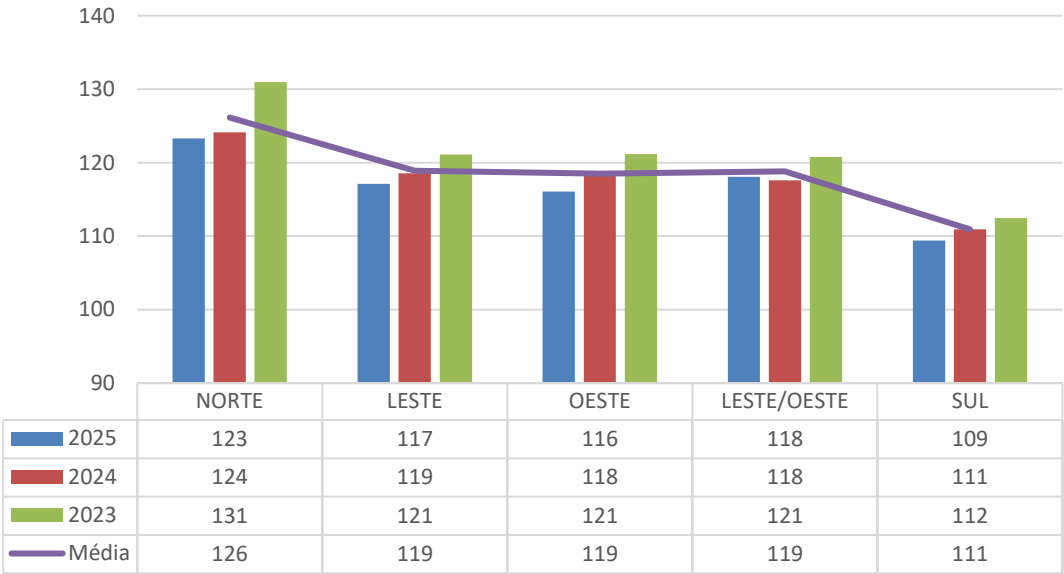
Gráfico 50 - PR médio mensal (2025) - Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

- Consolidação de Resultados
 - a) Produtividade específica final:

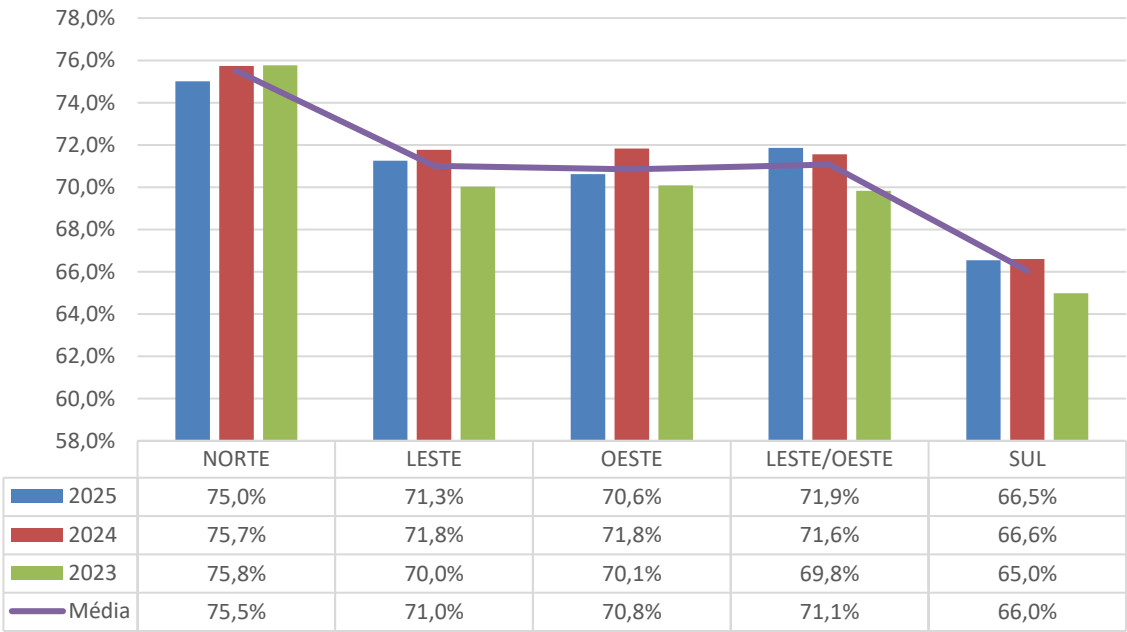
Gráfico 51 - Consolidação Final do Yield - Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

b) *Performance Ratio* médio final:

Gráfico 52 - Consolidação Final do PR – Região Sul.



Fonte: Elaboração Própria (2026).

7.1.8 Discussões

A Região Sul resultou em 188 sistemas analisados. A tabela 26 descreve o quantitativo por cada orientação:

Tabela 23 - Quantitativo de sistemas analisados - Região Sul.

Orientação	Quantidade de sistemas
NORTE	65
LESTE	37
OESTE	30
LESTE/OESTE	26
SUL	30
Total	188

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Na avaliação da produtividade específica (*Yield*) da Região Sul, a orientação norte consolidou-se com o melhor rendimento, atingindo **126,14 kWh/kWp**. Seguindo a tendência das outras regiões, os sistemas de orientação sul registraram a menor produtividade (**110,93 kWh/kWp**), o que representa uma defasagem de aproximadamente **12%** em relação à orientação norte. As orientações leste, leste/oeste e oeste mantiveram-se em um nível intermediário (**118 kWh/kWp**).

Quanto à eficiência global (*Performance Ratio - PR*), o comportamento seguiu a mesma tendência. A orientação norte alcançou o maior índice (**75,50%**). Em seguida, as orientações leste/oeste (**71,08%**), leste (**71,02%**) e oeste (**70,84%**) apresentaram eficiências praticamente equivalentes. O limite mais crítico ocorreu na face sul, que operou com apenas **66,04%** de eficiência.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo cumpriu o objetivo de mapear e quantificar o desempenho de sistemas fotovoltaicos instalados no estado do Tocantins. A consolidação dos dados do triênio permitiu determinar os índices médios de eficiência (*Performance Ratio* - *PR*) e de produtividade específica (*Yield*) para as quatro macrorregiões analisadas. Para facilitar a consulta e a aplicação prática destes resultados, as Tabelas 27 e 28 unificam os indicadores obtidos.

Tabela 24 - Consolidação do *Performance Ratio* (PR) Médio do Tocantins.

Região Orientação	Bico do Papagaio	Norte Centro	Central	Sul
Norte	78,68%	73,95%	73,16%	75,50%
Reto (0°)	-	-	73,23%	-
Leste	75,49%	70,26%	69,12%	71,02%
Oeste	74,74%	69,95%	68,21%	70,84%
Leste/Oeste	73,46%	68,24%	69,65%	71,08%
Sul	68,60%	63,88%	63,32%	66,04%

Fonte: Elaboração Própria (2026).

Tabela 25 - Consolidação da produtividade específica (*Yield*) Médio do Tocantins.

Região Orientação	Bico do Papagaio	Norte Centro	Central	Sul
Norte	120,66	117,94	118,34	126,14
Reto (0°)	-	-	118,31	-
Leste	116,92	112,01	111,60	118,92
Oeste	116,22	111,57	110,21	118,50
Leste/Oeste	114,65	111,62	112,55	118,81
Sul	104,59	101,71	102,25	110,93

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A análise dos indicadores da geração fotovoltaica no Tocantins consolida a hegemonia das orientações norte e reto, que apresentaram os melhores desempenhos (**PR de até 78,68% e Yield de 126,14 kWh/kWp**), em contraste com a orientação sul (**PR até 68,60% e Yield 110,93 kWh/kWp**). Paralelamente, as orientações Leste e Oeste demonstraram equivalência (**PR próximo de 73% e Yield de 115 kWh/kWp**). Enfatizando as macrorregiões, revelou-se que a região do Bico do Papagaio obteve a maior (PR), sugerindo menores perdas por calor e sujidade, já a Região Sul registrou maior produtividade específica em virtude de uma maior disponibilidade de irradiação solar.

Diante dessas particularidades, recomenda-se a utilização dos índices regionais de PR e Yield mapeados neste estudo como base referencial para o dimensionamento e a análise de novos sistemas fotovoltaicos. A aplicação desses dados possui grande relevância, pois contribui para maior previsibilidade da geração de energia e para estimativas mais assertivas de desempenho operacional. Consequentemente, torna-se possível realizar análises mais precisas do retorno financeiro dos empreendimentos, beneficiando diretamente investidores, projetistas e empresas integradoras atuantes no estado do Tocantins.

9 REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Tocantins tem mais de 44 mil sistemas fotovoltaicos em telhados e pequenos terrenos, informa associação brasileira do setor - ABSOLAR. 5 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticias-externas/tocantins-tem-mais-de-44-mil-sistemas-fotovoltaicos-em-telhados-e-pequenos-terrenos-informa-associacao-brasileira-do-setor/>>. Acesso em: 18 mai. 2026.

ANEEL. Energia solar protagoniza crescimento da matriz elétrica em novembro 04 dez. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/energia-solar-protagoniza-crescimento-da-matriz-eletrica-em-novembro>>. Acesso em: 18 mai. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa de 24 de novembro de 2015. Ren 687/15.

ENERGIA solar atrai R\$ 4 bi de investimentos em Tocantins. 5 abr. 2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/energia-solar-atrai-r-4-bi-de-investimentos-em-tocantins/>>. Acesso em: 12 dez. 2026.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC TS 61724-2: Photovoltaic system performance - Part 2: Capacity evaluation method. Genebra: IEC, 2016.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy Review 2026. Paris: IEA, 2026. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 20 maio 2026.

OCA. Atlas solarimétrico do Tocantins. Palmas-TO: OCA Group, 2018. 97 p.

SOLANO, J. C.; ARCINIEGA, J. J. The performance ratio of a grid-connected photovoltaic system: an experimental and calculative analysis. 4. Selected Papers... [S. l.]: Springer, 2025

UFT. UFT inaugura Usina Fotovoltaica e prevê redução de até 15% em seu gasto com energia. 24 maio 2019. Disponível em: <<https://ww2.uft.edu.br/index.php/es/ultimas-noticias/25349-uft-inaugura-usina-fotovoltaica-e-preve-reducao-de-ate-15-em-seu-gasto-com-energia-eletrica>>. Acesso em: 10 nov. 2026.

VILLALVA, Marcelo Gradella. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, 2012.

ZILLES, Roberto. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.