

MONITORAMENTO ONLINE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR PERIÓDICA

Renato Afonso Junior – rajunior@gmail.com

José Luis Domingos

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Goiânia

Ghunter Paulo Viajante

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Raphael de Aquino Gomes

Aylton José Alves

Cleiber Nichida

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Goiânia

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise da aplicação do método de regressão linear periódica aos índices de mérito Produtividade Final (Y_F) e Produtividade de Referência (Y_R). Como estudo de caso, foram utilizados os sistemas fotovoltaicos (FV) instalados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara. Foi desenvolvido o software de monitoramento e gestão de energia elétrica (SMGE) para calcular os índices de mérito e aplicar a regressão linear. O estudo analisou dados de sistemas FV instalados em telhado e no solo. Os resultados, obtidos com dados que compreende o período de julho de 2022 a agosto de 2023, mostram que variações na eficiência do sistema podem ser detectadas por meio de alterações na inclinação das linhas de regressão. Foram observadas variações bruscas na inclinação das regressões lineares após a limpeza dos painéis solares, que resultou em um aumento na eficiência da conversão de energia. Além disso, eventos naturais, como chuvas, também influenciaram positivamente a eficiência. Os resultados mostram a importância da limpeza dos painéis FV, seja programada ou decorrente de eventos naturais como chuvas.

Palavras-chave: Índice de Mérito, Sistema FV, Eficiência.

1. INTRODUÇÃO

A incessante busca por alternativas energéticas sustentáveis tem se intensificado diante do risco iminente do esgotamento de fontes de energia não renováveis e do crescente reconhecimento das mudanças climáticas. Nesse contexto, a geração FV desponta como uma solução viável e promissora, evidenciada por um crescimento exponencial na última década.

Relatórios recentes, como o "*Renewable Capacity Statistics 2023*" da *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2023), revelam um aumento substancial na capacidade instalada de geração FV, não só no panorama global, mas também no Brasil. A capacidade mundial instalada de geração FV cresceu aproximadamente 22%, de 855 gigawatts em 2021 para cerca de 1.047 gigawatts em 2022. No Brasil, esse crescimento foi ainda mais notável, com um incremento de 70% da capacidade instalada, saltando de 14 gigawatts para 24 gigawatts entre 2021 e 2022. Esses números ilustram a crescente importância da geração FV como um pilar fundamental na matriz energética renovável, tanto no âmbito global quanto no cenário nacional, dominando mais da metade da expansão de energias renováveis em 2022, ultrapassando as fontes eólicas e hidrelétricas. A adoção desta forma de geração de eletricidade não só oferece benefícios ambientais, devido ao seu baixo impacto, mas também contribui significativamente para a economia através da criação de empregos.

Conforme o Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), as fontes renováveis detêm uma participação de aproximadamente 88% na oferta interna de eletricidade do Brasil, indicando a robustez da produção nacional somada às importações, que são predominantemente de origem renovável. A matriz elétrica brasileira, com forte presença de fontes renováveis, é liderada pela energia hídrica, que fornece 53,4% do abastecimento doméstico. Considerando as importações, majoritariamente oriundas da usina de Itaipu, esse percentual se eleva para quase 57%. A geração FV, apesar de atualmente representar apenas 2,47% da energia gerada no país, demonstra uma trajetória de crescimento acelerado, o que sinaliza um aumento em sua participação na matriz energética nos próximos anos.

Zilles *et al.* (2012) destaca que as células fotovoltaicas, assim como outras tecnologias de geração elétrica, não são capazes de converter integralmente a energia incidente em eletricidade. Essas limitações são decorrentes tanto dos desafios tecnológicos atuais quanto das perdas que ocorrem naturalmente durante o processo de conversão. Por isso, torna-se importante compreender e aplicar índices de mérito específicos que permitem uma análise do balanço energético associado aos sistemas de conversão fotovoltaica.

Cada instalação fotovoltaica apresenta atributos específicos que se alteram conforme a potência instalada, a quantidade de energia gerada e as tecnologias empregadas em sua construção. Estas características atuam como parâmetros para verificar o desempenho do sistema.

O desempenho de sistemas FV pode ser encontrado por meio de indicadores ou índices de mérito, que representam métricas para caracterizar equipamentos, sistemas ou tecnologias segundo sua eficiência na conversão energética. Utilizando-se desses índices, torna-se possível a avaliação contínua do funcionamento e do potencial de conversão da energia solar em eletricidade.

A análise através dos índices pode ser realizada para a detecção de deficiências no sistema, possibilitando a prevenção de prejuízos econômicos decorrentes de mal funcionamento e consequente baixo desempenho. Um monitoramento eficiente é capaz de detectar prontamente tais situações, contribuindo para que sistemas monitorados possam ter um desempenho produtivo superior em comparação àqueles que não possuem esse acompanhamento (Woyte *et al.*, 2014).

Diante deste cenário, o monitoramento online com a utilização de métodos de avaliação para sistemas FV, como os índices de mérito, tornam-se ferramentas necessárias para avaliar a eficiência dos sistemas existentes. O presente trabalho visa contribuir para este campo de estudo, propondo uma análise da aplicação do método de regressão linear periódica aos índices de mérito Produtividade Final (Y_F) e Produtividade de Referência (Y_R). Como estudo de caso, foram utilizados os sistemas FV instalados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara. A análise é conduzida por meio do monitoramento em tempo real das condições meteorológicas e da geração de eletricidade, possibilitando a avaliação do funcionamento dos sistemas de forma online. Em situações onde os dados meteorológicos não estão imediatamente disponíveis, a análise foi conduzida com base em informações históricas coletadas e armazenadas pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

2. METODOLOGIA

Os índices de mérito relacionados ao desempenho de sistemas FV conectados à rede são normalizados pela norma da *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61724 (2017). Para calcular os índices de mérito e aplicar o método de regressão linear foi desenvolvido o software Sistema de Monitoramento e Gestão de Energia Elétrica (SMGE). Neste estudo são abordados apenas os aspectos do SMGE referentes à aplicação do método de regressão linear periódica aos índices de mérito. Os sistemas FV objetos desse estudo estão instalados no IFG Câmpus Itumbiara estando um localizado no telhado e o outro no solo. As características dos sistemas FV são apresentadas nas Tab. 1 e Tab. 2.

Tabela 1 - Características do sistema FV.

Instalação	Nº Módulos	Potência do Módulo [Wp]	Potência do Inversor [kW]	Azimute [°]	Inclinação [°]
Telhado	80	270	20	50 Oeste	07
Solo	144	330	40	0 Norte	18

Tabela 2 - Modelo dos Inversores e Painéis FV Utilizados.

Instalação	Modelo do Inversor	Modelo do Painel
Telhado	ABB TRIO-20.0-TL-OUTD	Trina Solar - TSM-270-PD05.08 270Wp
Solo	WEG SIW500H - ST040	GCL P6/72 325W

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos da estação meteorológica instalada no câmpus que possui um piranômetro digital de primeira classe SR15-D2A2 e um data logger HOBO RX3000 fabricado pela Onset que fornece acesso aos dados dos sensores conectados a ele via internet.

2.1 Índices de mérito

Os índices implementados no sistema incluem: “Produtividade de Referência”, “Produtividade Final”, “*Performance Ratio*” e a “*Performance do Sistema*”, que se baseia na aplicação do método de regressão linear periódica aos índices de mérito Produtividade Final (Y_F) e Produtividade de Referência (Y_R). Os índices de mérito calculados são descritos a seguir conforme o relatório IEA-PVPS (Woyte *et al.*, 2014).

A Produtividade de Referência (Y_R) representa a energia teórica de um local específico por determinado período de tempo, sendo a razão entre a irradiação solar no plano inclinado do painel FV (Wh/m^2) (G_I) e a irradiação de referência (H_R) do sistema FV (1.000 W/m^2). Assim, Y_R se refere ao número de horas de irradiação solar, expressa em unidades de kWh/m^2 e pode ser calculada por meio da Eq. (1).

$$Y_R = \frac{G_I}{H_R} \quad (1)$$

A Produtividade Final (Y_F) indica quantas horas por dia o sistema FV deve operar em sua potência nominal para produzir a mesma quantidade de energia que foi injetada na rede. Este índice também reflete a quantidade de energia produzida em um período específico, expressa em quilowatt-hora (kWh) por cada quilowatt-pico (kWp) instalado. Y_F permite a normalização da produção de energia em relação ao tamanho ou capacidade instalada do sistema, isto permite a comparação de sistemas FV de diferentes tamanhos ou capacidades. O cálculo do Y_F é realizado pela Eq. (2) onde, E_{CA} é a saída de energia elétrica do inversor (kWh) e $P_{FV,nom}$ é a potência nominal instalada (kWp).

$$Y_F = \frac{E_{CA}}{P_{FV,nom}} \quad (2)$$

O *Performance Ratio* (PR) indica a capacidade real do sistema na conversão da energia solar disponível em eletricidade. O cálculo da PR é realizado dividindo a produtividade final (Y_F) pela produtividade de referência (Y_R) (Ortega *et al.*, 2017; Haibaoui *et al.*, 2017) e permite comparar sistemas instalados em diferentes locais e condições. Pode ser calculada através da Eq. (3), onde PR é a *Performance Ratio* (%), Y_F é a Produtividade Final (horas) e Y_R é a Produtividade de Referência (horas).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \cdot 100 \quad (3)$$

O Método de Regressão Linear Periódica foi publicado pela primeira vez por Woyte *et al.* (2013) e foi desenvolvido como parte do relatório IEA-PVPS (Woyte *et al.*, 2014). De acordo com Woyte *et al.* (2013) o método é fundamentado em relações físicas simplificadas entre duas variáveis, e tais relações físicas podem então ser aproximadas como uma linha reta por meio de regressão linear. Na implementação prática, essa conexão pode ser observada de maneira periódica através da comparação de linhas de regressão recentes com dados históricos ou para identificar padrões, tendências ou alterações bruscas.

De acordo com Woyte *et al.* (2014) a Performance do Sistema pode ser descrita como a comparação entre o Rendimento Final (Y_F) e o Rendimento de Referência (Y_R) que é um método para avaliar o desempenho de sistemas FV conectados à rede elétrica. Esta relação representa a eficiência geral da conversão de energia do sistema. Para estabelecer essa comparação, duas variáveis são monitoradas: a potência entregue à rede elétrica e a irradiação solar no plano dos painéis.

Sistemas FV podem ser considerados lineares, isso significa que (Y_F) é proporcional ao (Y_R). Quando são plotados em um gráfico de dispersão, essa relação tende a formar um padrão linear, representado por uma linha reta que passa pela origem. Essa linha é determinada por meio de regressão linear dos dados amostrais.

A inclinação da linha resultante serve como uma estimativa do desempenho médio do sistema FV. Especificamente, ela indica como o rendimento real do sistema se compara com o rendimento de referência da irradiação solar. A Performance do Sistema pode ser descrito analiticamente como a Eq. (4) onde, \overline{pr} é a inclinação da linha de regressão linear e se aproxima da média do *Performance Ratio* (%) de todas as amostras utilizadas para calcular a linha, y_f e y_r são representados com letras minúsculas pois nos referimos a médias calculadas sobre um breve período de registro ou valores instantâneos.

$$y_f = \overline{pr} \cdot y_r \quad (4)$$

O relatório IEA-PVPS (Woyte *et al.*, 2014) ressalta que o uso do método de regressão linear periódica fornece vários indicadores que dependem das variáveis utilizadas e das diferentes etapas de conversão de energia:

- Linhas de regressão que não mudam significativamente ao longo do tempo indicam que as propriedades do sistema permaneceram constantes;
- Linhas de regressão que mudam ao longo do tempo indicam uma mudança de tendência nos parâmetros do sistema;
- Amostras que desviam repentinamente e significativamente das linhas de regressão sugerem pontos de operação excepcionais;
- Amostras que desviam regularmente das linhas de regressão sugerem um defeito de projeto.

Neste estudo, o Método de Regressão Linear Periódica será utilizado para calcular linhas de regressão diárias, integrando as medições realizadas em intervalos horários.

2.2 Software do Sistema de Monitoramento e Gestão de Energia Elétrica - SMGE

O software foi implementado como uma aplicação web cuja arquitetura é composta por três componentes principais: a interface de usuário SMGE, uma Interface de Programação de Aplicações (API) chamada de SMGE-API e um sistema de medição.

Os dois primeiros componentes foram desenvolvidos com o uso do framework *Django* e integradas ao banco de dados *PostgreSQL*, para operar em um ambiente de computação em nuvem, visando maior eficiência, escalabilidade e robustez da aplicação. Esta estratégia de implementação também proporciona facilidade na implantação e atualização contínua do sistema, garantindo uma maior agilidade no ciclo de vida do desenvolvimento.

O sistema de medição foi implantado no Câmpus Itumbiara, de forma a realizar medições em tempo real da geração fotovoltaica e do consumo de energia elétrica. Essas medições devem ser enviadas através da SMGE-API, permitindo ao sistema persistir as informações coletadas em seu banco de dados. A interação dos usuários com o sistema ocorre por meio da interface web do SMGE, que encaminha requisições à SMGE-API para o processamento e atendimento das demandas dos usuários. Posteriormente, os dados processados são exibidos oferecendo uma visualização gráfica e análise da gestão energética. A Fig. 1 ilustra a arquitetura do software para a aplicação do método de regressão linear periódica.

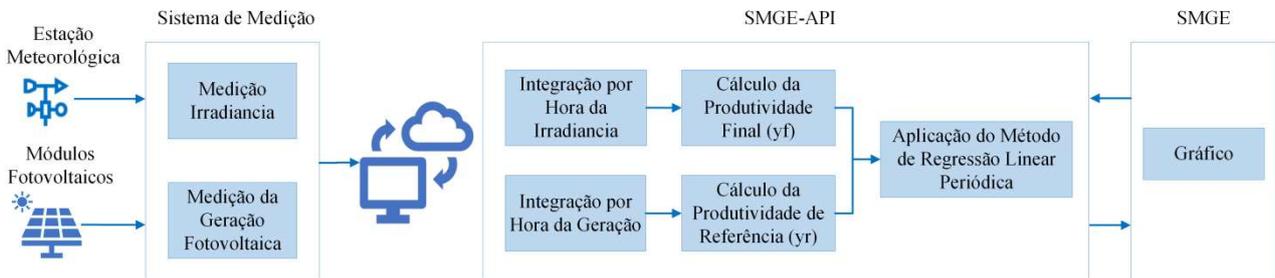


Figura 1 – Arquitetura do software para a aplicação do método de regressão linear periódica.

O sistema de monitoramento armazena dados referentes à geração fotovoltaica em intervalos de 5 minutos e os dados da estação meteorológica em intervalos de 1 minuto. Para a aplicação efetiva da metodologia proposta, é necessária a sincronização entre as medições dos dados meteorológicos e os valores de geração. O sistema foi desenvolvido para permitir a integração desses dados em períodos horários, facilitando a geração de gráficos para análises diárias.

O Software SMGE aplica o método de regressão linear periódica para encontrar o desempenho do sistema, onde cada linha de regressão indica um dia de medidas. A Fig. 2 apresenta o índice calculado para os dias 14 e 15 de setembro de 2022 da instalação no solo, onde é feito um gráfico de dispersão y_f versus y_r e onde cada linha de regressão representa um dia de operação do sistema.

A elaboração de gráficos de dispersão, com uma nova linha de regressão para cada dia, facilita a percepção da tendência de inclinação, possibilitando o monitoramento contínuo das flutuações no *Performance Ratio* diário. Mesmo sob diferentes níveis de irradiação solar, se a capacidade do sistema de converter a irradiação em energia elétrica permanecer constante, espera-se que as inclinações das linhas de regressão apresentem valores similares. Desse modo, alterações bruscas de um dia para o outro, assim como tendências significativas, são indicadas pela variação na inclinação da linha de regressão. A análise gráfica é utilizada para destacar as diferenças entre os dias da semana.

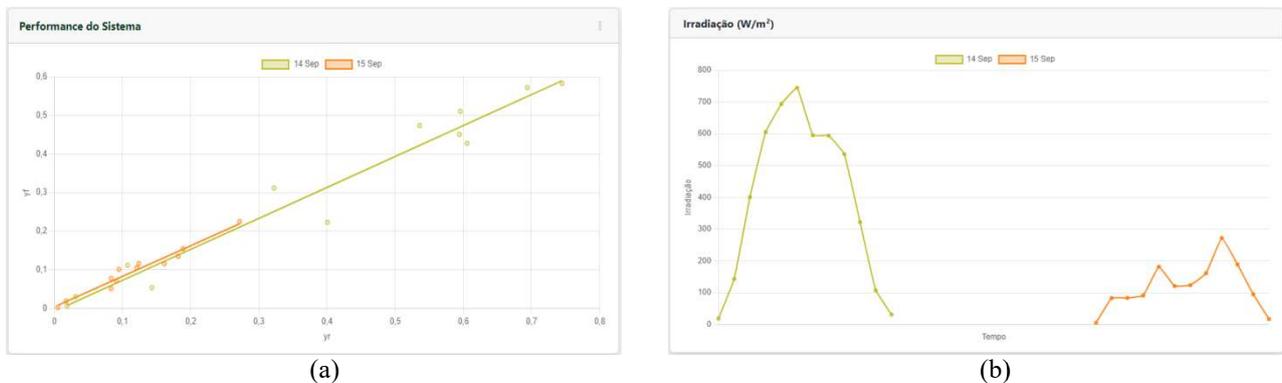


Figura 2 – Tela do software SMGE - Medições utilizando médias horárias, 14 e 15 de Setembro de 2022. (a) Performance do sistema (b) Irradiação horária.

As variações dos valores das inclinações refletem as variações do *Performance Ratio* (*PR*), desta forma, quanto mais elevada a inclinação da linha de regressão, ou seja, quanto mais \overline{pr} se aproxima de 1, sinaliza que o sistema está operando com eficiência elevada, convertendo uma proporção significativa da irradiação solar recebida em energia elétrica. Em contrapartida, uma inclinação mais distante de 1 pode indicar ineficiências ou problemas no sistema. Essas ineficiências podem ser causadas por uma série de fatores, incluindo sombreamento, perdas de conversão no inversor e outras questões técnicas que comprometem o rendimento global do sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da Performance do Sistema ao longo do período de tempo compreendido entre julho de 2022 e agosto de 2023, utilizando médias horárias de medições e onde cada linha de regressão representa um dia de medida. Os gráficos ilustram as janelas temporais nas quais se observou variação do indicador com 8 linhas de regressões plotadas.

A Fig. 3 mostra o comportamento do gráfico que representa a Performance do Sistema para os sistemas localizados no telhado e no solo. As linhas de regressão demonstram um alinhamento consistente e mostram que as propriedades do sistema e sua eficiência permaneceram constantes ao longo de 8 dias, o maior desvio padrão observado entre as inclinações das linhas, quando o sistema está alinhado, foi de 0,03.

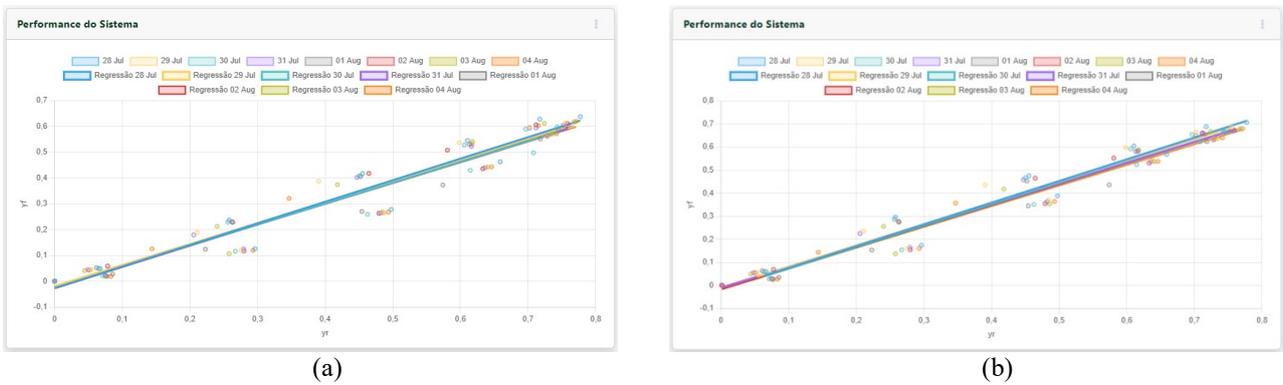
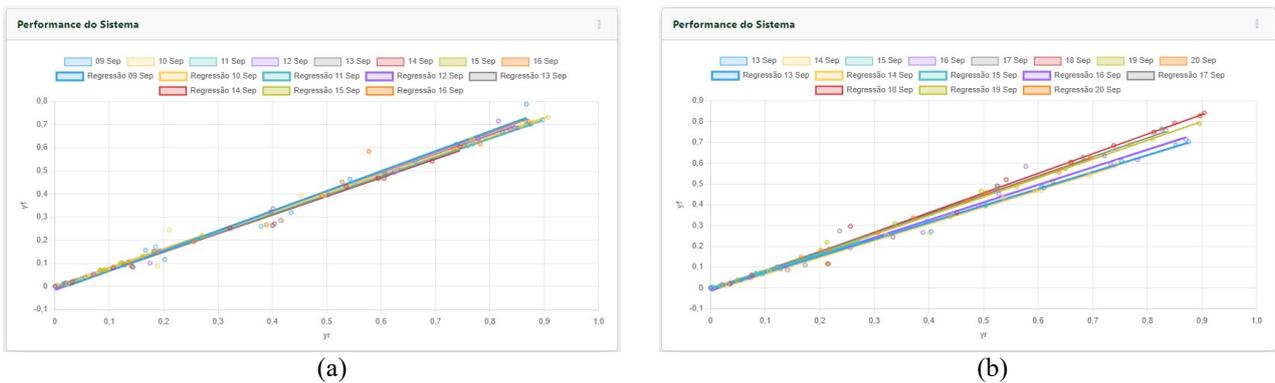


Figura 3 - Tela do software SMGE - Performance do Sistema utilizando médias horárias, 28 de Julho a 04 de Agosto de 2022. (a) Funcionamento Normal - Telhado (b) Funcionamento Normal - Solo.

O sistema FV operava de maneira estável até o dia 17 de setembro de 2022, momento em que se registrou uma elevação de 12,8% na inclinação das linhas de regressão relativas ao inversor instalado no solo. Após este evento, a inclinação da linha de regressão estabilizou-se no novo patamar. O sistema FV instalado no telhado não sofreu alterações nas linhas de regressão para o mesmo período. A Fig. 4 detalha estes aspectos.



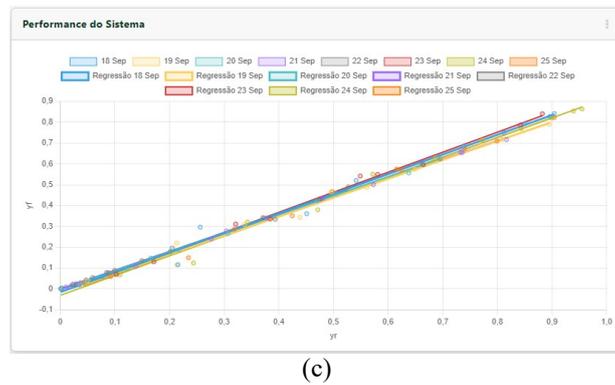


Figura 4 - Tela do software SMGE - Solo - Performance do Sistema. (a) Funcionamento normal, 09 a 16 de Setembro de 2022. (b) Alteração da inclinação das linhas de regressão, 13 a 20 de Setembro de 2022. (c) Nova inclinação das linhas de regressão, 18 a 25 de Setembro de 2022.

A causa da mudança de inclinação é devido a lavagem manual dos painéis solares situados no solo, efetuada no dia 17 de setembro de 2022. O aumento na inclinação é um indicativo de uma melhora na eficácia dos painéis FV, sugerindo que elementos adversos, como a acumulação de sujeira sobre os painéis, estavam diminuindo a eficiência da geração de eletricidade.

Para investigar o efeito da limpeza dos painéis FV na eficiência do sistema, foi realizada a comparação dos valores médios das inclinações antes e depois da limpeza dos painéis. Com isso, foram calculadas as médias dos valores de inclinação das linhas de regressão de 8 dias, tanto para o período precedente quanto para o subsequente a 17/09 conforme Tab. 3.

Tabela 3 – Inclinação das linhas de regressão - Médias horárias de medições - Setembro de 2022 - Solo.

Data	Inclinação	Média
09 Setembro	0,86	0,819
10 Setembro	0,81	
11 Setembro	0,81	
12 Setembro	0,84	
13 Setembro	0,79	
14 Setembro	0,80	
15 Setembro	0,79	
16 Setembro	0,85	
18 Setembro	0,94	0,924
19 Setembro	0,90	
20 Setembro	0,88	
21 Setembro	0,88	
22 Setembro	0,92	
23 Setembro	0,97	
24 Setembro	0,95	
25 Setembro	0,95	

Na Tab. 4 foram compilados os dados relativos à geração de eletricidade, irradiação solar e inclinação da linha de regressão para o período em estudo. Foi observado que a média da inclinação das linhas de regressão era de 0,819 antes da limpeza dos painéis. Após a limpeza, essa inclinação aumentou para 0,924, representando um incremento de 12,8% na inclinação da linha de regressão linear e na eficiência do sistema. Adicionalmente, ao se avaliar a geração de eletricidade, constata-se um acréscimo de 11,06% após a limpeza dos painéis. É importante notar que houve uma redução de 1,2% na irradiação.

Tabela 4 – Comparação de geração de eletricidade, irradiação e linhas de regressão – Solo – 2022.

Período	Geração (kWh)	Irradiação (kWh/m ²)	Inclinação da Linha	Performance Ratio (%)
09 a 16 de setembro	1543,083	40,78	0,819	78%
18 a 25 de setembro	1713,683	40,29	0,924	88%
Variação Percentual	11,06%	-1,20%	12,82%	12,82%

Após este evento, o sistema FV manteve sua operação normal até 22 de setembro de 2022. Nesta data, identificou-se uma nova alteração nas linhas de regressão, desta vez no sistema do telhado. Em contrapartida, o sistema do solo manteve sua operação normal. A Fig. 5 exibe esta transição.

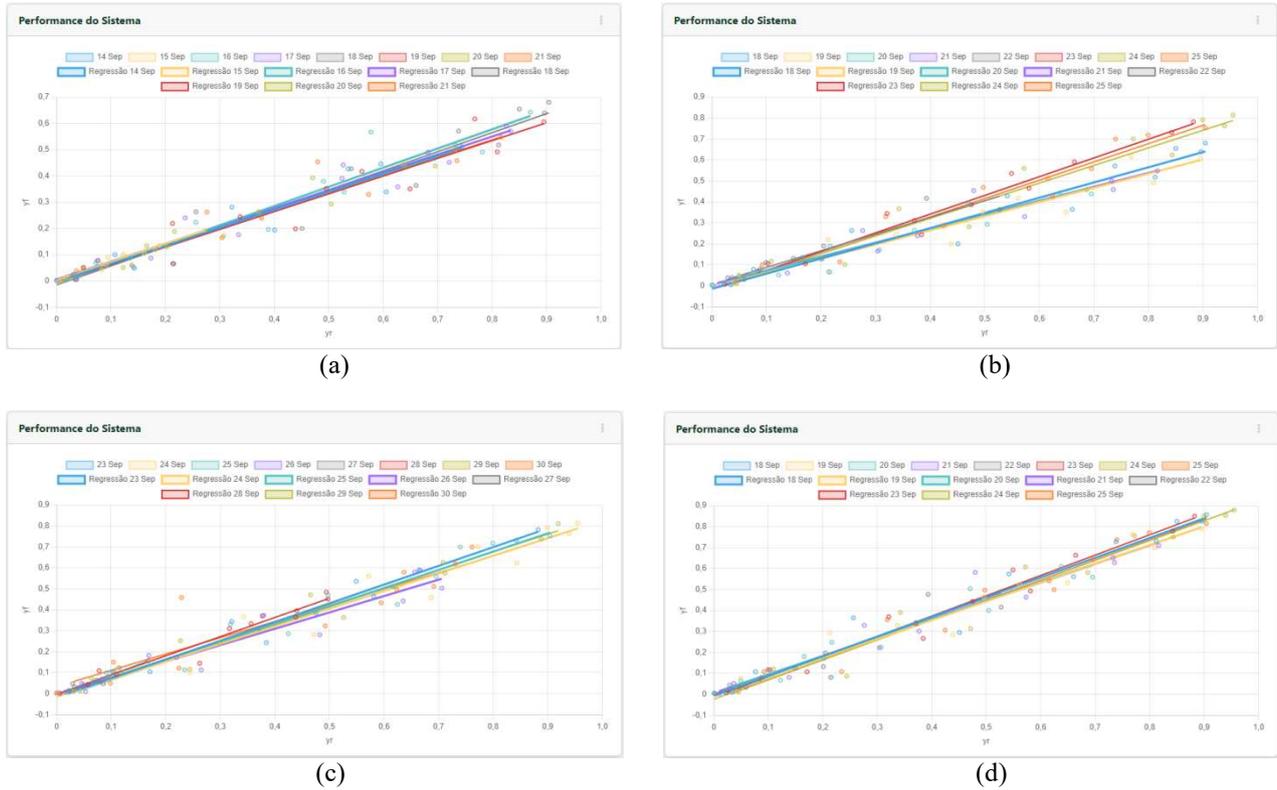


Figura 5 - Tela do software SMGE - Performance do Sistema. (a) Telhado - Funcionamento normal, 14 a 21 de Setembro de 2022. (b) Telhado - Alteração da inclinação das linhas de regressão, 18 a 25 de Setembro de 2022. (c) Telhado - Nova inclinação das linhas de regressão, 23 a 30 de Setembro de 2022. (d) Solo - Funcionamento normal, 18 a 25 de Setembro de 2022.

Durante este período, houve o início da estação de chuvas na região de Itumbiara. De acordo com informações fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi possível registrar os eventos de precipitação na localidade, como ilustrado Fig. 6. Em 21 de setembro, ocorreu uma leve chuva, com precipitação com intensidade de 0,2 mm/h às 22:00 horas. No dia seguinte, 22 de setembro, a precipitação foi mais significativa, totalizando 18,6 mm/h ao longo do dia, interrompendo um período de estiagem que durou 106 dias. Este episódio de chuvas proporcionou uma limpeza dos painéis FV, contribuindo para o aumento observado na eficiência da geração de eletricidade, uma vez que a chuva anterior ocorreu aproximadamente três meses antes. A razão pela qual as linhas de regressão do sistema do solo não apresentaram alterações é o fato de que já haviam sido limpos no dia 17 de setembro.

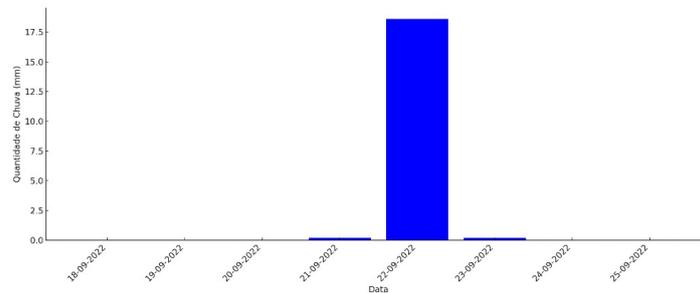


Figura 6 - Quantidade de chuva por dia, 18/09/2022 até 25/09/2022.

A Tab. 5 apresenta um compilado dos dados relativos à variação da geração de eletricidade, irradiação solar e inclinação da linha de regressão do sistema FV instalado no telhado. Para o cálculo foram considerados os dados coletados em dois períodos distintos, o primeiro, antes da chuva, de 14 a 21 de setembro, e o segundo, após a chuva, de 23 a 30 de setembro de 2022. Observou-se um aumento de 24,31% na inclinação da linha de regressão linear. Além disso, ao avaliar a geração de eletricidade, constatou-se um acréscimo de 24,13% após a limpeza dos painéis pela

chuva. Também é relevante destacar que houve um acréscimo de 2,23% na irradiação solar entre os períodos analisados.

Tabela 5 – Comparação da geração de eletricidade, irradiação e linhas de regressão – Telhado – 2022.

Período	Geração (kWh)	Irradiação (kWh/m ²)	Inclinação da Linha	Performance Ratio (%)
14 a 21 de setembro	550,300	37,17	0,691	66%
23 a 30 de setembro	683,075	38,00	0,859	82%
Variação Percentual	24,13%	2,23%	24,31%	24,24%

A análise revela que o valor do *Performance Ratio* (PR) dos painéis FV instalados no solo era de 78% antes da limpeza, aumentando para cerca de 88% após a lavagem. Pode-se creditar os altos valores encontrados ao fato do azimute dos painéis, estar posicionado a 0° em direção ao norte, e à sua inclinação de 18°. No sistema FV instalado no telhado, o PR era de 66% antes da limpeza pelas chuvas e aumentou para 82% após a chuva, indicando uma melhoria na eficiência.

Na comparação dos resultados obtidos da limpeza do sistema FV do solo com os resultados observados após a chuva no sistema instalado no telhado, observa-se um ganho superior na geração de eletricidade no sistema do telhado. Abdeen *et al.* (2017) e Xu *et al.* (2017) ressaltam que variações no ângulo de inclinação podem influenciar significativamente no volume de poeira acumulado sobre os painéis, onde inclinações menores acumulam mais poeira. Conforme apresentado na Tab. 1 o sistema instalado no telhado, possui uma inclinação de 7°, e tende a acumular maior quantidade de sujeira em comparação ao sistema instalado no solo, que possui uma inclinação de 18°.

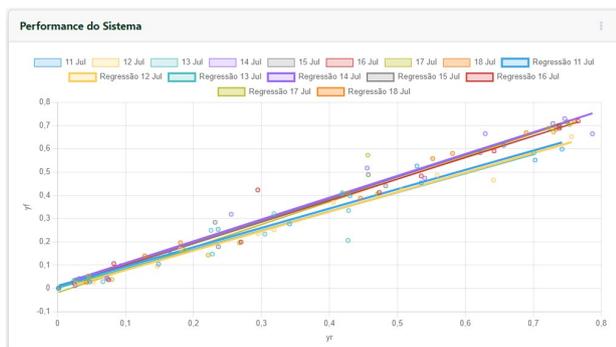
Para a análise de 2023, foram utilizados dados da estação meteorológica automática do INMET, situada em Itumbiara, a cerca de 3,5 km de distância do câmpus. Esta estação do INMET fornece dados horários de irradiação em kJ/m². Estes dados foram convertidos para kWh/m² e incorporados ao software SMGE, substituindo as informações da estação meteorológica local.

Com base nas informações fornecidas pelo INMET, em 2023 foi detectada uma nova alteração nas linhas de regressão de ambos os sistemas FV no dia 14 de julho, registrando-se um aumento de 9,07% na inclinação das linhas do sistema instalado no solo e de 10,73% no sistema localizado no telhado. De acordo com as informações do INMET, o período sem precipitações com intensidade acima de 1 mm/h durou 77 dias, terminando em 14 de julho com uma precipitação de 8,6 mm/h. A Tab. 6 detalha esses valores.

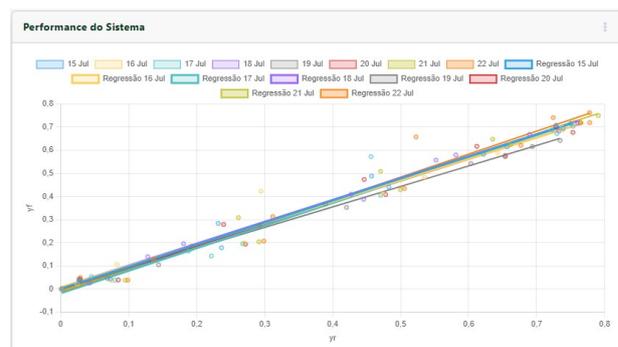
Tabela 6 – Comparação das medições Telhado e Solo – Julho de 2023.

Período	Geração (kWh)		Irradiação (kWh/m ²)	Inclinação da Linha		Performance Ratio (%)	
	Telhado	Solo		Telhado	Solo	Telhado	Solo
06 a 13 de julho	563,508	1498,842	35,16	0,755	0,871	70%	81%
15 a 22 de julho	655,925	1707,975	37,55	0,836	0,950	78%	89%
Variação Percentual	16,40%	13,95%	6,80%	10,73%	9,07%	11,43%	9,88%

A análise indica que a precipitação em 2023 exerceu um papel de limpeza. No sistema do telhado em 2022, houve um aumento de 24,31% na inclinação das linhas de regressão, enquanto em 2023, o incremento foi de 10,73%. A diferença está vinculada ao fato de que o período de seca em 2023 foi 29 dias mais curto. Além disso, durante esse período, houve três dias de chuvas leves inferiores a 1 mm/h, que contribuíram para a redução do acúmulo de sujeira nos painéis. Destaca-se que, em comparação com a chuva de 14 de julho de 2023, que teve uma intensidade de 8,6 mm/h, a precipitação de 2022, de 18,6 mm/h, resultou em uma limpeza mais eficaz dos painéis solares. O sistema não apresentou variações nas linhas de regressão em decorrência das chuvas com intensidades menores que 1 mm/h. A Fig. 7 exibe as capturas de tela do software referentes ao intervalo analisado.



(a)



(b)

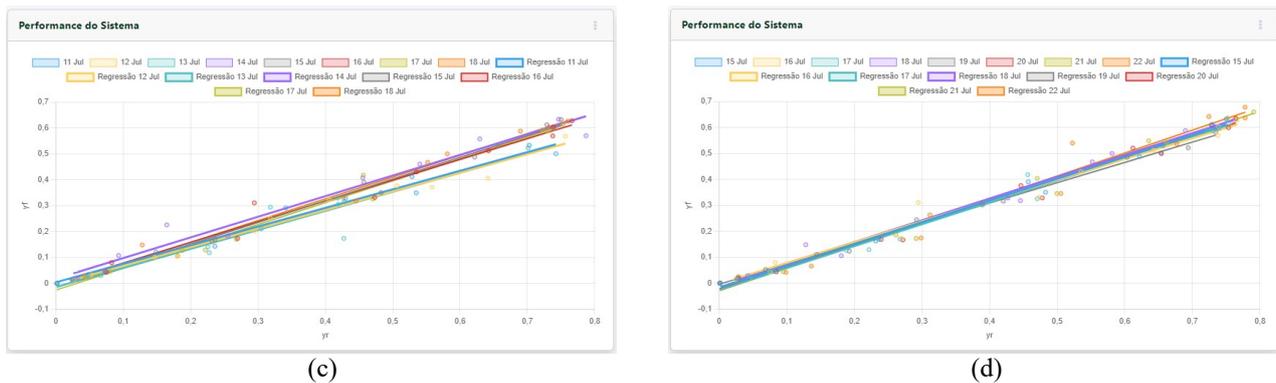


Figura 7 - Tela do software SMGE - Performance do Sistema – 2023. (a) Solo - Alteração da inclinação das linhas de regressão, 11 a 18 de julho. (b) Solo - Nova inclinação das linhas de regressão, 15 a 22 de julho. (c) Telhado - Alteração da inclinação das linhas de regressão, 11 a 18 de julho. (d) Telhado - Nova inclinação das linhas de regressão, 15 a 22 de julho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise abrangeu o período de julho de 2022 a agosto de 2023. Durante esse intervalo, foram identificadas três variações significativas nas inclinações das linhas de regressão: a primeira ocorreu após a lavagem manual dos painéis, a segunda e a terceira, após a limpeza natural realizada pelas chuvas em 2022 e 2023. Nessas ocasiões, as variações foram caracterizadas por um aumento positivo na inclinação das linhas de regressão. Importante notar que não foram detectadas falhas que pudessem influenciar negativamente estas inclinações. A análise foi conduzida usando o método de regressão linear periódica para identificar alterações bruscas no desempenho do sistema.

Comparando os resultados obtidos após a limpeza dos painéis do sistema FV no solo com os efeitos da chuva no sistema FV instalado na cobertura do telhado em 2022, foi constatado um aumento no *Performance Ratio (PR)* do sistema no solo, de 78% para 88%, indicando um incremento de 12,82% na eficiência. Para o sistema instalado no telhado, o *PR* aumentou de 66% para 82%, representando um aumento de 24,24%. Os resultados da limpeza são mais significativos para o sistema do telhado, devido a inclinação de 7° dos painéis, que tende a acumular maior quantidade de sujeira em comparação ao do solo, que possui uma inclinação de 18°.

Em 2023, a limpeza proporcionada pelas chuvas resultou em um aumento no *Performance Ratio (PR)* do sistema fotovoltaico instalado no telhado, elevando-o de 70% para 78%. Para o sistema instalado no solo, o *PR* aumentou de 81% para 89%. As características específicas deste último sistema, incluindo o azimute dos painéis posicionado a 0° em direção ao norte e a inclinação de 18°, são elementos que contribuem para essa alta eficiência.

Os resultados alcançados neste estudo mostram a importância da manutenção regular para a eficiência dos sistemas FV. A observação dos dados na Tab. 4 permite constatar que, mesmo diante de uma redução na irradiação solar, a eficiência na conversão de energia aumentou após a limpeza dos painéis. Tanto a limpeza programada quanto a limpeza resultante de eventos naturais, como chuvas, mostram-se importantes para manter a eficiência operacional do sistema.

REFERÊNCIAS

- Abdeenm E., Orabi, M., Hasaneen, E.S., 2017. Optimum Tilt Angle for Photovoltaic System in Desert Environment, *Solar Energy*, vol. 155, pp. 267–280.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Relatório consolidado do Balanço Energético Nacional–BEN., 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>.
- Haibaoui, Amine & Hartiti, Bouchaib & Elamim, Abderrazzak & Karami, Elmehdi & Ridah, A., 2017. Performance Indicators For Grid-Connected PV Systems: A Case Study In Casablanca, Morocco. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 12. 55-65. 10.9790/1676-1202015565.
- International Electrotechnical Commission, 2017. Photovoltaic System Performance – Part 1: Monitoring, IEC 61724-1:2017, Geneva.
- IRENA, International Renewable Energy Agency. Renewable Capacity Statistics 2023., 2023. Acessado em: 24/09/2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>.
- Ortega, E., Aranguren, G., Sáenz, M. J., Gutiérrez, R. and Jimeno, J. C., Study of Photovoltaic Systems Monitoring Methods., 2017. IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Washington, DC, USA, pp. 643-647, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366523.

- Woyte, A., Richter, M., Moser, D., Reich, N., Green, M., Mau, S., and Beyer, H.G., 2014. Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems: Good Practices for Monitoring and Performance Analysis. IEA-PVPS Task 13, Subtask 2: Report IEA PVPS T13-03: 2014. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme.
- Woyte, A., Richter, M., Moser, Mau, S., D., Reich, N., Jahn. U., 2013. Monitoring of photovoltaic systems: good practices and systematic analysis. In: Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, p. 3686–3694.
- Xu, R., Ni, K., Hu, Y., Si, J., Wen, H., Yu, D., 2017. Analysis of the Optimum Tilt Angle for a Soiled PV Panel. Energy Conversion and Management, vol. 148, pp. 100–109.
- Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., & Oliveira, S. H. F. de., 2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Oficina de texto.

ONLINE MONITORING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS PERFORMANCE USING THE METHOD OF PERIODIC LINEAR REGRESSION

Abstract. *This paper presents an analysis of the application of the periodic linear regression method to the merit indices Final Productivity (YF) and Reference Productivity (YR). As a case study, photovoltaic systems installed at Campus Itumbiara of the Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás (IFG), were used. A software for monitoring and managing electrical energy (SMGE) was developed to calculate the figure of merit and apply linear regression. The study analyzed data from photovoltaic systems installed on rooftops and on the ground. The results, obtained from data covering the period from July 2022 to August 2023, show that variations in system efficiency can be detected through changes in the slope of the regression lines. Sudden variations in the slope of the linear regressions were observed after cleaning the solar panels, which resulted in an increase in energy conversion efficiency. Furthermore, natural events such as rain also positively influenced efficiency. The results highlight the importance of cleaning photovoltaic panels, whether scheduled or resulting from natural events such as rain.*

Keywords: *Figure of Merit, Photovoltaic System, Efficiency*