

OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS: UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE MONITORAMENTO UTILIZANDO ARDUINO.

Marcos Vinicius dos Santos

Ednardo Pereira da Rocha

Resumo

O presente artigo propõe-se a desenvolver um sistema de monitoramento automatizado para otimizar a operação de painéis solares fotovoltaicos no Brasil, em resposta ao crescimento significativo das fontes renováveis na matriz energética, especialmente a energia solar. O objetivo é evidenciar como a tecnologia Arduino, com o uso do sensor de corrente ACS712, pode supervisionar a entrega de energia dos sistemas solares, identificando irregularidades que impactam sua eficiência. A metodologia consiste no desenvolvimento e implementação de um sistema que monitorea em tempo real os níveis de produção elétrica, permitindo a detecção precoce de problemas, como pontos quentes, que podem comprometer a operação e reduzir ganhos. A pesquisa ressalta a importância do monitoramento para prolongar a vida útil dos componentes e reduzir a necessidade de intervenções corretivas. Os resultados esperados incluem a minimização de prejuízos financeiros decorrentes de falhas operacionais e a promoção de uma geração de energia mais eficiente, contribuindo com uma solução prática e de baixo custo para a manutenção preventiva, visando garantir um desempenho otimizado dos sistemas fotovoltaicos e apoiar a transição para uma matriz elétrica mais sustentável no Brasil.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Pontos Quentes; Monitoramento; Arduino; Manutenção Preventiva

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2023 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética brasileira tem se diversificado a cada ano, tendo como principal destaque o aumento da presença de fontes renováveis. Tal fato deve-se à necessidade de diminuição da dependência de uma fonte predominante no país, além da busca por tecnologias alternativas e sustentáveis, com o fito de substituir os meios convencionais e suprir a demanda por energia elétrica.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, em 2022, o Brasil teve um aumento considerável de 66% na capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no território nacional. Diante desse cenário de crescimento a presença das fontes renováveis na matriz elétrica deve continuar em ascensão, chegando a 85% em 2050.

No Brasil, a cada ano, mais e mais fontes alternativas de produção de energia elétrica vêm sendo implementadas, com o intuito de diversificar a matriz elétrica nacional. De acordo com os dados apresentados no Balanço Energético Nacional (BEN), através do Relatório Síntese da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), apresentado em 2023, e tendo como ano base 2022, uma das tecnologias que mais vem ganhando espaço na matriz elétrica nacional, são os sistemas de geração fotovoltaicos, principalmente as unidades de geração em nível residencial e em pequenas indústrias.

Sobre os benefícios da energia solar fotovoltaica, segundo Vieira (2017),

[...] Essa Geração Distribuída Solar Fotovoltaica (GDFV), além de propiciar benefícios ambientais relativos ao baixo impacto na biodiversidade e reduzida emissão de gases de efeito estufa, pode trazer benefícios sociais, econômicos e técnicos. Esses últimos têm forte correlação com a forma como essa geração se conecta na rede (localização e tamanho dos sistemas) e alguns benefícios em particular – tais como: diminuição das perdas nas redes, postergação de investimentos pela

redução da demanda de pico e melhoria da tensão de fornecimento às unidades consumidoras – têm impacto direto na modicidade tarifária. (Vieira, 2017, p. 19)

Diante disso, a crescente adoção de sistemas solares fotovoltaicos residenciais tem se tornado uma solução promissora para a geração de energia sustentável, visando a redução dos custos com eletricidade e a minimização do impacto ambiental. No entanto, a eficiência e a confiabilidade desses sistemas podem ser comprometidas por fatores como falhas na instalação e variações de desempenho ao longo do tempo.

Nessa perspectiva, o presente estudo busca abordar a otimização da eficiência e confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos por meio do monitoramento dos níveis de potência e corrente nos strings, utilizando a tecnologia Arduino e o sensor de corrente ACS712, buscando a identificação precoce de irregularidades pode evitar perdas significativas na geração de energia.

A justificativa para escolha desse tema se justifica pela necessidade de garantir que os sistemas fotovoltaicos operem em sua máxima capacidade, contribuindo assim para a sustentabilidade. O problema de pesquisa se concentra na questão de como otimizar a entrega de energia através do monitoramento eficaz das condições operacionais. A hipótese central é que a implementação de um sistema de monitoramento pode melhorar significativamente a detecção de problemas, aumentando a eficiência geral do sistema.

Os objetivos deste estudo consistem em desenvolver um sistema programável na placa Arduino para monitorar os níveis de entrega do sistema; apresentar uma alternativa de monitoramento automatizado que promova eficiência no diagnóstico de falhas; e demonstrar os efeitos dos pontos quentes sobre os painéis fotovoltaicos por meio de comparações. O método escolhido baseia-se na integração de componentes eletrônicos e software de programação, visando a acessibilidade e a fácil implementação por usuários comuns.

O presente estudo, portanto, busca desenvolver um sistema de monitoramento acessível e eficaz que permita aos proprietários de sistemas solares fotovoltaicos residenciais acompanhar em tempo real a performance de suas instalações, facilitando, assim, a identificação de irregularidades, possibilitando intervenções rápidas e informadas.

2. DESENVOLVIMENTO

Comumente é disseminado um conceito de que a manutenção dos sistemas solares fotovoltaicos não demanda de muita atenção, já que principalmente para os consumidores em escala residencial é passada uma ideia de que se for realizada uma limpeza apenas com água, periodicamente, a funcionalidade do sistema não sofre prejuízos em relação a sua produção. Entretanto, na realidade, não é bem isso que ocorre, pois vários fatores podem influenciar nos índices de geração de energia do sistema¹.

De acordo com Santos, Posser e Garcia (2020), os principais fatores de queda ou interrupção na produção dos sistemas são fatores como, acúmulo de detritos de pássaros, folhas que caem sobre os painéis, excesso de poeira, etc. Tal fato pode ocasionar o surgimento de “pontos quentes”, que são locais onde se pode observar um grande aumento na temperatura, devido às perdas com o efeito Joule. Esse mesmo problema, pode ser aferido na parte inferior dos painéis solares e ocasionado após a limpeza com água, já que ocorre um acúmulo de resíduos, na parte inferior das placas e que acaba por influenciar os níveis de potência e produção de energia elétrica do sistema.

Para facilitar o entendimento, alguns conceitos precisam ser apresentados, como o de potência elétrica que, de acordo com Villate (2019), pode ser definida como a taxa temporal de gasto ou absorção de energia, medida em Watts(W). De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (S.I.), uma unidade de Watt corresponde a um Joule por segundo. A aferição da potência elétrica pode ser obtida calculando-se o produto entre a tensão e a corrente elétrica de um dado circuito. Este conceito também será aplicado para a definição de potência medida posteriormente.

Um outro conceito que é necessário entender é o de corrente elétrica, que é medida em Ampéres (A), no S.I. e, que segundo Villate (2019), pode ser definida como o fluxo de cargas de condução que ocorre dentro de um material condutor. Ele também afirma que a densidade de corrente elétrica é dada pela relação entre a quantidade de carga transferida em um determinado intervalo de tempo.

Considerando o que foi citado por Santos, Posser e Garcia (2020), se faz necessário uma forma melhor de monitoramento dos sistemas solares fotovoltaicos, já que normalmente a forma usual, através da simples observação a olho nu, não se mostra tão eficiente para determinar se os níveis de atuação do sistema encontram-se nos padrões que foram estabelecidos em projeto. Também é importante frisar que os painéis, em sua maioria, são instalados em locais de difícil acesso, como telhados ou locais de altitude elevada, a fim de evitar problemas decorrentes de sombreamento de estruturas, ou elementos próximos aos locais da instalação

¹ Conceituação retirada do Curso Eletricista De Sistemas De Energias Renováveis desenvolvido pelo Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG). Disponível em: https://www.ifmg.edu.br/betim/extensao/energife/apostila-curso-instalador-de-sistemas-fotovoltaicos-pronatec-200-horas_menor.pdf

Tendo em vista os problemas identificados anteriormente, o presente artigo desenvolveu um sistema de monitoramento automatizado capaz de aferir e acompanhar os níveis de entrega do sistema. É importante destacar também que os componentes utilizados para o desenvolvimento do projeto, por se tratar de elementos compatíveis com a tecnologia Arduino, são de fácil manuseio e de baixo custo, fazendo assim com que o sistema possa ser implementado sem grandes dificuldades, até mesmo como um componente integrado do sistema de geração.

2.1. Componentes dos sistemas e seus respectivos conceitos

Para a melhor compreensão do sistema, é indispensável o estudo da estrutura dos componentes contidos no sistema solar fotovoltaico para que se possa ter uma melhor compreensão acerca de como a automatização do sistema de monitoramento irá atuar e quais os benefícios ele poderá trazer após sua intervenção. Segundo Carvalho (2018), o sistema solar fotovoltaico mais utilizado em instalações residenciais, consiste em um sistema composto por strings, que é uma estrutura que consiste em um conjunto de conexões de módulos solares ligados em série, com a finalidade de manter uma corrente contínua (CC), circulando pelo circuito.

O fluxo de carga em sistemas fotovoltaicos apresenta características de corrente contínua, mas que resulta em uma potência variável ao longo do dia. Essa variação é atribuída às mudanças na tensão gerada pelos módulos solares, que ocorrem devido à alteração na angulação entre o sistema e a posição do sol durante o período de insolação plena. Quando os raios solares incidem sobre os painéis, eles provocam o movimento dos elétrons nas moléculas, liberando energia que é então captada pelo sistema. Tal fenômeno é possível observar a partir do modelo simplificado de uma célula fotovoltaica presente na obra de Carvalho (2018), o que facilita a compreensão do funcionamento e eficiência desses sistemas.

Tal modelo ideal da célula fotovoltaica pode ser visualmente resumido na **Figura 1**.

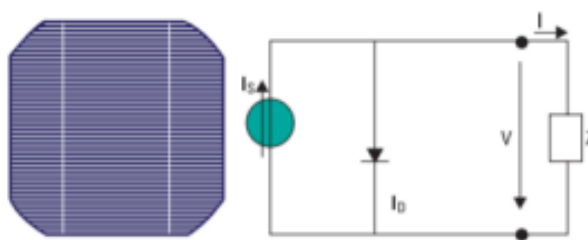


Figura 1 - Modelo ideal da célula fotovoltaica. Fonte: Pereira e Oliveira (2011).

Segundo Pereira e Oliveira (2011), os componentes internos do modelo ideal da célula fotovoltaica, apresentados na Figura 1, são descritos da seguinte forma:

- I_S – corrente elétrica gerada sobre a célula na presença de luz.
- I_D – corrente elétrica gerada pelo diodo.
- V – tensão de saída.
- I – corrente de saída.
- Z – carga em paralelo com o circuito.

A célula solar fotovoltaica tem a composição do seu circuito representada por um esquema simplificado através da exemplificação demonstrada na **Figura 2**.

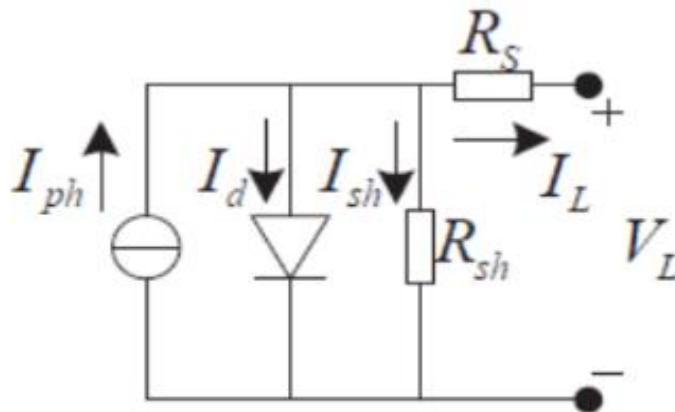


Figura 2 – Circuito equivalente em função do diodo, padrão para a descrição eléctrica de células e módulos fotovoltaicos. Fonte: (Yu et al., 2017).

Segundo Marques *et al.*(2020), os componentes internos do circuito equivalente em função do diodo, apresentados na Figura 2, são descritos da seguinte forma:

- I_{ph} – corrente eléctrica gerada na célula sobre a presença de luz.
- R_s – resistência em série com o circuito.
- R_{sh} – resistência em paralelo com o diodo.
- I_d – corrente eléctrica gerada pelo diodo.
- I_{sh} – corrente eléctrica gerada sobre o resistor R_{sh} .
- I_L – corrente de saída do circuito.
- V_L – tensão de saída do circuito.

De acordo com SANTOS, POSSER e GARCIA (2020), as células fotovoltaicas são dispostas nos módulos de forma a ficarem simétricas entre si, possibilitando posteriormente que os arranjos sejam montados de formas variáveis, de acordo com cada projeto e com a necessidade de cada sistema.

A seguir, é possível verificar a disposição de como ficam distribuídas as células sobre os módulos, como mostra a **Figura 3**:

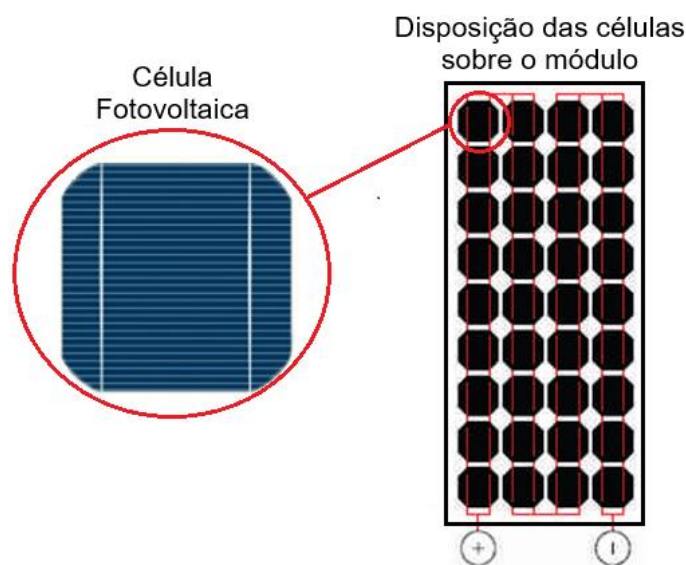


Figura 3 - Disposição das células fotovoltaicas sobre os painéis. Fonte: Curso Eletricista De Sistemas De Energias Renováveis (IFMG). Adaptado pelo autor.

Figura 4 - Montagem padrão do sensor ACS712. Fonte: Adaptado pelo autor.

A montagem do circuito e disposição dos materiais foi efetuada de acordo com a representação na **Figura 5**:

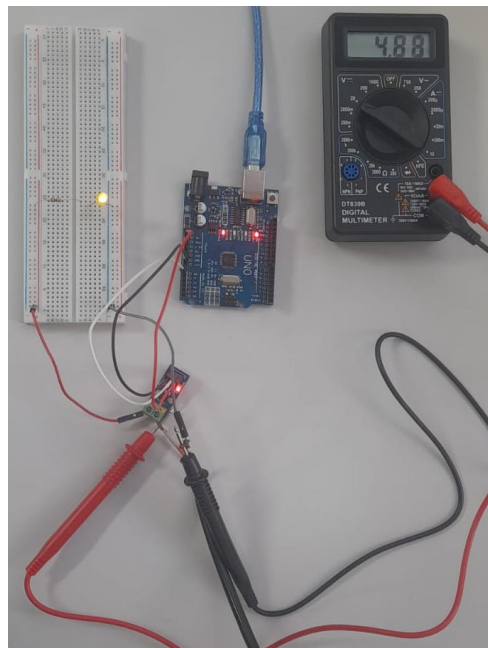


Figura 5 - Circuito montado com todos os componentes. Fonte: Autoria própria.

3. CONCLUSÃO:

Ao realizar as medições, foi possível simular cenários em que o sistema é afetado por pontos quentes. Utilizando o Software IDE, foram registrados valores que confirmam as discussões anteriores deste trabalho.

Na Figura 6, é possível observar que a corrente elétrica se mantém em torno de 1,12 A, enquanto a potência gerada pelo módulo atinge aproximadamente 18,88 W, valores obtidos quando o módulo solar opera em plena carga, sem a influência de pontos quentes.

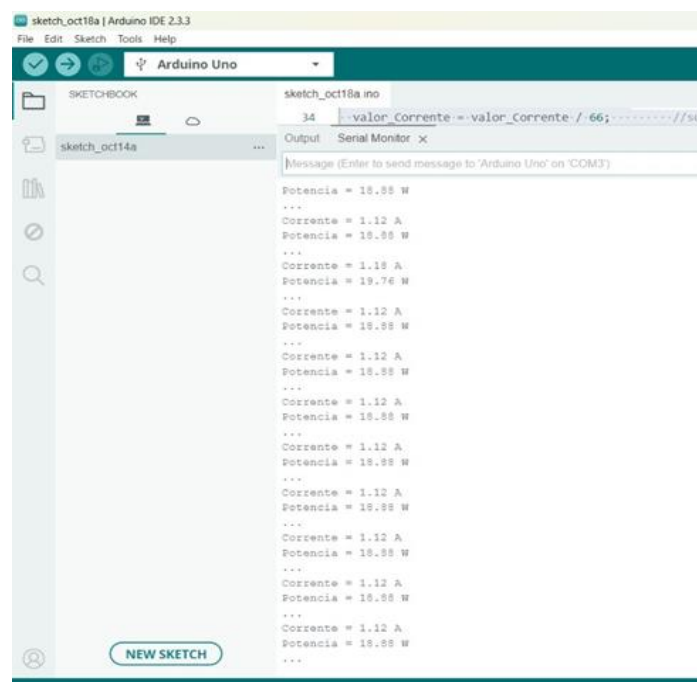


Figura 6 - Apresentação no IDE 2.3.3, de valores à plena carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo essa mesma linha de interpretação, foi simulado o que acontece com os valores, quando é posto um bloqueio sobre uma área parcial do painel fotovoltaico.

Para essa simulação, foi efetuado o bloqueio parcial da área total do painel. Nessa situação os valores de corrente e consequentemente de potência sofrem uma drástica mudança, como é observado na **Figura 7**, a seguir:

```

sketch_oct18a.ino
39 Serial.println(" A");
40
41 potencia = valor_Corrente * tensao;
42
43 Serial.print("Potencia = ");

Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to "Arduino Uno" on "COM3")

...
Corrente = 0.64 A
Potencia = 10.76 W
...
Corrente = 0.64 A
Potencia = 10.76 W
...
Corrente = 0.64 A
Potencia = 10.76 W
...
Corrente = 0.69 A
Potencia = 11.64 W
...
Corrente = 0.69 A
Potencia = 11.64 W
...
Corrente = 0.64 A
Potencia = 10.76 W
...
Corrente = 0.64 A
Potencia = 10.76 W
...
Corrente = 0.64 A
Potencia = 10.76 W
...
Corrente = 0.69 A
Potencia = 11.64 W
...

```

Figura 7 - Apresentação no IDE 2.3.3, de valores à plena carga. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda situação observada na Figura 7, os valores apresentados sofrem uma grande redução, em decorrência do ponto quente que agora está instaurado sobre o painel. Nas medições durante essa etapa, a corrente elétrica que era de aproximadamente 1,12A, caiu para 0,64A e a potência fornecida, que era de 18,88W caiu para 10,76W.

Tabela 1 – Análise dos valores de potência e corrente sob influência do ponto quente.

MEDIÇÕES	VALORES (PLENO)	VALORES (COM PONTOS QUENTES)	PERCENTUAL
Potência (W)	18,88 W	10,76 W	- 43,01%
Corrente (A)	1,12 A	0,64 A	- 42,86%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, foi possível aferir uma redução circunstancial de 43,01% da potência e 42,86% da corrente produzida no módulo monitorado, o que é evidenciado também pela intensidade da lâmpada LED disponível no circuito demonstrado nas figuras a seguir.

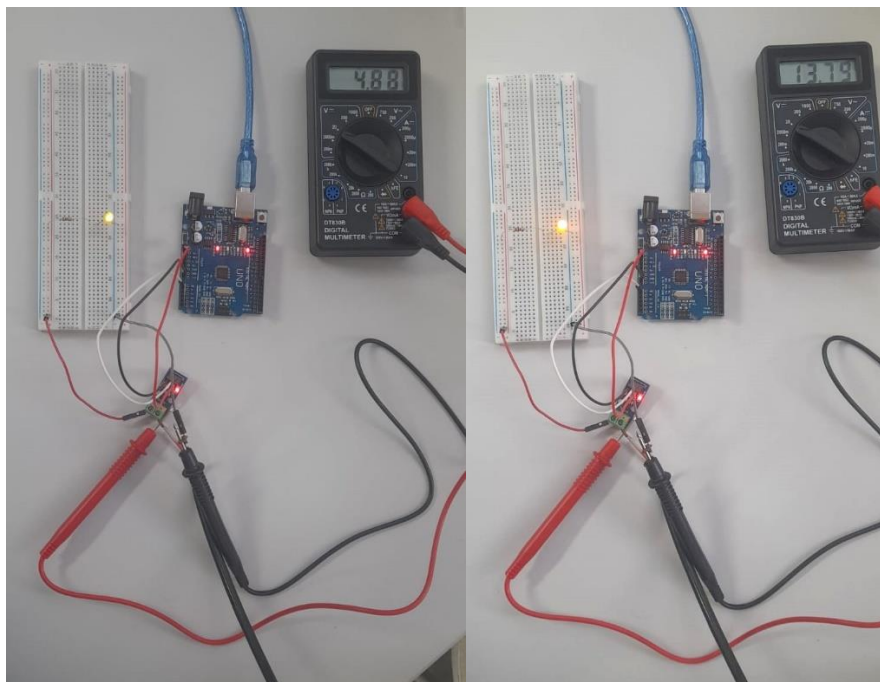


Figura 8 - Demonstração da intensidade do brilho da lâmpada sobre a influência do ponto quente – à esquerda, com influência; à direita, a pleno funcionamento. Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante considerar, também, que o desenvolvimento e a exploração da tecnologia Arduino é algo que deixa em aberto uma infinidade de possibilidades de execução, principalmente por se tratar de uma tecnologia relativamente barata e de fácil manuseio.

Observando os resultados obtidos com este projeto, pode-se concluir que os pontos quentes, podem fazer com que o sistema opere com uma capacidade reduzida, promovendo assim uma baixa eficiência do sistema e gerando perdas para o projeto.

Também é possível constatar a importância das manutenções preventivas nos sistemas, para que se possa ter um rendimento adequado e que atenda a necessidade a qual foi designado.

Portanto, é possível concluir que ao aplicar métodos de monitoramento mais precisos, o diagnóstico de sinistros pode ser efetuado de forma rápida e mais adequada, o que leva o Arduino a ser uma alternativa consideravelmente eficiente, já que os resultados apresentados podem ser aferidos em tempo real além de serem entregues com muita precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. . ELETRICISTA DE SISTEMAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Minas Gerais, 2023. 122 p. Disponível em: https://www.ifmg.edu.br/betim/extensao/energife/apostila-curso-instalador-de-sistemas-fotovoltaicos-pronatec-200-horas_menor.pdf. Acesso em: 19 out. 2024.

CARVALHO, Felipe Porto Rodrigues. Introdução ao sistema solar fotovoltaico e aplicação de comissionamento na planta solar IFCE-Maracanaú. 2018. 111 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/45056>. Acesso em: 17 out. 2024.

Empresa de Pesquisa Energética (2023). Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese 2023, ano base 2022. EPE. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 16 out. 2024.

JÚNIOR, Ernesto de Freitas Moscardini; RÜTHER, Ricardo; VERGARA, Lizandra Garcia Lupi. Avaliação do conhecimento em O&M de sistemas fotovoltaicos por profissionais do mercado de energia solar brasileiro. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 8, n. 2, p. 131-139, 2017.

SILVEIRA ALVES MARQUES, H.; SOARES DE MOURA, Ézio; RAYMUNDO DE ALCÂNTARA NETO, J.; MORAES SILVA, A.; BRESSAN RIFFEL, D. INFLUÊNCIA DE PONTOS QUENTES NA CURVA

CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, [S. l.], 2020. DOI: 10.59627/cbens.2020.825. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/825>. Acesso em: 20 out. 2024.

PEREIRA, Filipe Alexandre de Sousa; OLIVEIRA, Manuel Ângelo Sarmento. CURSO TÉCNICO INSTALADOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. 1. ed. [S.l.]: Publindústria, 2011.

SANTOS, A.; SOARES POSSER, L.; BOSCATO GARCIA, S. ASPECTOS DE MANUTENÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, [S. l.], 2020. DOI: 10.59627/cbens.2020.999. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/999>. Acesso em: 16 out. 2024.

SILVA, Igor Alexandre Dutra e. Sensor tensão-corrente inteligente com monitoramento e controle on-line por smartphone. 2016. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/151012>. Acesso em: 21 out. 2024.

VIEIRA, Daniel. Método para determinação do tipo de incentivo regulatório à geração distribuída solar fotovoltaica que potencializa seus benefícios técnicos na rede. 2017.

VILLATE, Jaime E.. Eletricidade, Magnetismo e Circuitos. Jaime E. Villate. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 3. ed. Porto: Autor, 2019. 318 p. Disponível em: <https://doi.org/10.24840/978-972-99396-6-2>. Acesso em: 18 out. 2024.

Yu, K. et al. Parameters Identification Of Photovoltaic Models Using An Improved Jaya Optimization Algorithm. Energy Conversion And Management, V. 150, P. 742–753, Out. 2017.