

ARQUITETURA DE HARDWARE E SOFTWARE PARA A AQUISIÇÃO E GESTÃO INTEGRADA DE DADOS DE USINAS SOLARES

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5832531033>

Data de submissão: 23/04/2025

Data de aceite: 06/05/2025

Alexandre dos Santos Roque

Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – URI
Santo Ângelo, Rio Grande do Sul – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0838554349107784>

Iuri Castro Figueiró

Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – URI
Santo Ângelo, Rio Grande do Sul – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6767781948621082>

Gabriel Taborda Farias

Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – URI
Santo Ângelo, Rio Grande do Sul – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3349374465675583>

Rômulo Madrid de Mello

Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – URI
Santo Ângelo, Rio Grande do Sul – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9939963767562043>

Antônio Vanderlei dos Santos

Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – URI
Santo Ângelo, Rio Grande do Sul – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8299603681137935>

RESUMO: A obtenção de dados da geração de energia de usinas fotovoltaicas é fundamental para entender os benefícios das energias renováveis. Este estudo explora as

características técnicas que compõem as usinas On e Off-Grid, inversores e métodos de comunicação, tendo como objetivo a integração de diferentes equipamentos, com armazenamento de dados. O trabalho justifica-se pela variedade de inversores utilizados, que resulta no uso de aplicativos específicos pelas usinas, fazendo com que os usuários não tenham posse e controle sobre os dados gerados, tendo acesso a uma pequena parcela dos dados técnicos. Existem limitações de acesso a dados que impedem e dificultam a gestão da geração de energia. Assim, questiona-se: Como gerenciar e armazenar os dados de uma usina fotovoltaica, com persistência de dados e independência dos tipos e marcas de equipamentos utilizados? Como metodologia aplica-se uma pesquisa bibliográfico-exploratória sobre obtenção dos dados brutos dos equipamentos inversores, análise técnica dos meios de comunicação e especificação de hardware e software para coleta e armazenamento dos dados. Como resultados são apresentados uma base de dados e um sistema web com gráficos detalhados de ambas as instalações solares. A contribuição permite a correlação de variáveis medidas, servindo como ferramenta de apoio à decisão dos gestores.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de dados; Energia Solar; Integração de equipamentos; Energias Renováveis.

HARDWARE AND SOFTWARE ARCHITECTURE FOR DATA ACQUISITION AND INTEGRATED MANAGEMENT FROM SOLAR PLANTS

ABSTRACT: Obtaining energy generation data from photovoltaic plants is critical to understanding the benefits of renewable energies. This study explores the technical characteristics that make up the On and Off-Grid plants, inverters, and communication methods, with the objective of integrating different devices, with data storage. The work is justified by the variety of inverters used, which results in the use of specific applications by the plants, meaning that users do not have ownership and control over the generated data, and have access to a small portion of the technical data. There are data access limitations that prevent and make it difficult to manage energy generation. The research question is: How to manage and store data from a photovoltaic plant, with data persistence and independence from the types and brands of equipment used? As a methodology, bibliographic-exploratory research is applied to obtaining raw data from inverter equipment, technical analysis of communication protocols, and hardware and software specifications for data collection and storage. As a result, a database and a web system with detailed graphics of both solar installations are presented. The contribution allows the correlation of measured variables, serving as a decision-support tool for managers.

KEYWORDS: Data management. Solar Energy. Equipment integration. Renewable Energy.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve um aumento na demanda por energia e, com isso, uma evolução nos equipamentos e processos de geração de energia elétrica tem ocorrido. Tal evolução tem levado ao surgimento de novas usinas eólicas e fotovoltaicas, que são consideradas fontes renováveis e alternativas de produção de energia. Essas fontes de energia (solar, eólica e também o biogás) vem se destacando devido sua alta disponibilidade, e por causarem menores impactos sociais e ambientais (Santo Fernandes et al., 2022).

No contexto das formas de geração de energia, esta pesquisa destaca a geração de energia proveniente da radiação solar a qual pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio dos efeitos termoeletrônicos e fotovoltaicos sobre alguns materiais (EPE ENERGÉTICA, 2020). A energia solar fotovoltaica de geração distribuída tem se expandido no Brasil e a tendência é de maiores avanços, principalmente devido às quedas dos custos de aquisição e fabricação de sistemas fotovoltaicos. Segundo a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) um dado importante é a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica, onde o Brasil foi o 4º País que mais acrescentou capacidade solar fotovoltaica em 2021 no mundo, com 5,7 GW e atualmente, já está em 15 GW no Brasil, com mais de R\$ 78,5 bilhões de investimentos acumulados e mais de 450 mil empregos criados desde 2012 (ABSOLAR, 2021).

Com a crescente geração de energia solar, cresce também a importância dos dados oriundos dos equipamentos, responsáveis pela operação e controle do processo, os chamados inversores de potência. O Inversor é um equipamento desenvolvido para converter a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) (Kabalci, 2020). Atualmente existe uma grande quantidade de fabricantes de inversores, os quais possibilitam acesso limitado aos dados de geração de energia, comumente apenas o montante gerado diariamente por meio de aplicativos móveis exclusivos a cada marca e modelo. Porém a quantidade de informações que pode ser obtida dos inversores é muito maior, centenas de dados que podem ser analisados, para verificação de diferentes características relacionadas à eficiência da geração de energia elétrica, vida útil dos equipamentos, condições de operação, apenas para exemplificar algumas informações relevantes. Uma pesquisa neste âmbito justifica-se, pois, essas informações podem ser analisadas por ferramentas de modelagem, por modelos de inteligência artificial, e ainda serem utilizadas de forma estratégica pelas organizações, visando o melhor dimensionamento de usinas de geração de energia. Com o histórico de dados de geração de energia, é possível mapear características ou variáveis específicas da região de instalação, contribuindo para o investimento adequado de recursos, prever o retorno do investimento, a vida útil dos equipamentos, e melhorar o balanceamento de carga (Souza & Morgado, 2019).

Diante do exposto, o objetivo da pesquisa é apresentar uma arquitetura de hardware e software, com uma estrutura de dados de referência obtida de inversores, que permita registrar os dados da geração de energia solar de plantas fotovoltaicas. Os dados do estudo são de plantas compostas por instalações híbridas On-grid e Off-grid, localizadas no parque tecnológico Tecno-URI Missões. A estrutura criada e respectivos dados coletados são analisados, usados como referência para a presente pesquisa, além de servir como subsídio para estudos posteriores, dada a importância do histórico de geração de energia, para a compreensão de variáveis técnicas e também dos investimentos associados.

A pesquisa é organizada da seguinte forma: Inicia-se realizando uma revisão das teorias que serão utilizadas para contextualizar e caracterizar o problema, embasando os objetivos; logo após são apresentados trabalhos relacionados específicos, a pergunta problema e a metodologia utilizada, bem como, a hipótese de solução da pergunta de pesquisa. Nas seções seguintes do artigo são apresentadas a arquitetura de hardware/software proposta (testada em plantas solares reais, On e Off-Grid), e a discussão dos resultados alcançados, onde são mostrados os dados obtidos em um período monitorado. Por fim, são apresentadas as conclusões e considerações sobre a pesquisa realizada.

REFERENCIAL TEÓRICO

VISÃO GERAL SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

As fontes energéticas renováveis trazem diversas vantagens em seu uso, sendo de suma importância a produção de energia renovável para minimizar os impactos causados por crises internacionais, por exemplo pela utilização de combustíveis fósseis (petróleo) ou até mesmo por instabilidades na construção e geração através de hidroelétricas em épocas de estiagem (Sadorsky, 2012) (Wan et al., 2022).

Neste contexto, a geração de energia fotovoltaica se destaca. As células fotovoltaicas contêm um substrato semicondutor com uma junção PN que cria um campo elétrico interno. Quando a radiação atinge o semicondutor, um elétron é liberado e conduzido pelo campo elétrico para os contatos, contribuindo para a corrente elétrica. Esta corrente é reunida ligando os painéis solares individuais em série para formar uma matriz solar fotovoltaica (Kayes et al., 2005). No início do desenvolvimento das células fotovoltaicas, por volta de 1954, estas possuíam uma eficiência de 6%. Os pesquisadores Calvin Fuller (químico), Gerald L. Pearson (físico) e Daryl Chapin (engenheiro) criaram essa tecnologia. Mas somente no ano de 1959, com um novo sistema de crescimento de cristais foi possível desenvolver as células de silício policristalino (Matos, 2006).

Atualmente, devido aos avanços em pesquisa e desenvolvimento, as células fotovoltaicas apresentam eficiências significativamente superiores às iniciais. De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), os módulos comerciais atualmente alcançam eficiências entre 22% a 24%, com tecnologias mais avançadas, como as células de silício tipo PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*) e as bifaciais, impulsionando esse avanço tecnológico (ABSOLAR, 2023).

Adicionalmente, há investimentos contínuos em tecnologias emergentes, como a combinação entre de uma célula de perovskitas com outra de silício texturizado. Esta combinação atingiu uma eficiência solar de 29,2%, o que mostra que esta evolução tem tornado a energia solar cada vez mais competitiva e acessível, facilitando a expansão da geração distribuída no país e a diminuição da dependência de fontes não renováveis (JESUS, 2022).

Para viabilizar a geração de energia elétrica em níveis compatíveis com demandas residenciais, comerciais ou industriais, torna-se necessário o dimensionamento e a organização dos módulos fotovoltaicos em um arranjo fotovoltaico (*strings*), que otimizam a captação da irradiância solar e a conversão energética do sistema. O arranjo fotovoltaico é uma estrutura montada com módulos ou painéis fotovoltaicos constituídos por células fotovoltaicas interconectadas. Em geral, são fabricadas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo, que converte a energia da luz solar elétrica em corrente contínua, e um inversor, que converte uma corrente contínua em corrente alternada (Mercaldo & Veneri, 2020). Desta forma, destacam-se dois sistemas principais de geração de energia, o “Off-grid” e o “On-grid” (Bortoloto et al., 2017).

SISTEMAS ISOLADOS (OFF-GRID)

O sistema “Off-grid” caracteriza-se por não estar conectado à rede elétrica principal, neste caso a energia convertida fica armazenada em um banco de baterias ou outro sistema de acúmulo de energia. Essas instalações podem produzir eletricidade durante o dia e, caso necessário, pode-se armazenar o excedente produzido, para consumo no período noturno. Instalações isoladas devem ser projetadas de acordo com as necessidades de energia elétrica do usuário, a fim de otimizar a instalação fotovoltaica (Ortega-Arriaga et al., 2021). Outro componente importante deste sistema é o controlador de carga, que visa aumentar a vida útil dos sistemas de acumuladores de energia, para que não ocorram descargas excessivas nas baterias (Paipa et al., 2018). No sistema fotovoltaico isolado o uso de dispositivos de armazenamento de energia é necessário para atender a demanda das cargas em períodos em que não há geração de energia ou a geração é insuficiente (Pinho & Galdino, 2014).

SISTEMAS LIGADOS À REDE (ON-GRID)

Diferente do modelo Off-grid, o sistema On-Grid é um sistema que gera eletricidade e é conectado à rede elétrica, por isso, chamado de “On-Grid”. Esses sistemas podem variar de pequenas estruturas em telhados residenciais e comerciais, a grandes centrais ou usinas solares de grande escala. No sistema On-Grid, em sua grande maioria, não se utiliza armazenamento de energia, pelo contrário, o sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectada (Ortega-Arriaga et al., 2021). A vantagem é dispensar a utilização de baterias e controladores de carga. Mas a principal desvantagem é necessitar do acesso à rede de distribuição. O principal uso do sistema On-Grid é no ambiente urbano, já o off-grid é vantajoso para locais remotos. Esses dois sistemas se diferenciam devido ao total de energia gerada (Chatterjee et al., 2018).

EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA

Outro ponto importante a destacar no processo de geração de energia, é a eficiência de conversão, ou rendimento, de uma célula fotovoltaica. Conceitualmente é definido como o quociente entre a potência da onda eletromagnética que incide na superfície da célula fotovoltaica e a potência elétrica disponível aos seus terminais (Liu et al., 2020). A segunda lei da termodinâmica impõe limites à taxa da eficiência da conversão fotovoltaica e a própria arquitetura das células fotovoltaicas reduz ainda mais a eficiência máxima das células. No entanto, com o crescente avanço das pesquisas já é possível encontrar estudos apresentando acima de 40% de eficiência com células de junção tripla *GaInP/GaInAs/Ge*, comercialmente ainda bem abaixo deste valor, e para células de silício abaixo de 30% (Barrutia et al., 2018). Para permitir células de alta eficiência, os dispositivos requerem uma tecnologia muito complexa como, por exemplo, processos especiais de texturização da superfície, para reduzir a refletividade da célula, ou a criação de campos elétricos na traseira da célula para reduzir a recombinação. As células mais comuns produzidas a nível industrial apresentam eficiências típicas da ordem dos 15% (Kale et al., 2018).

EQUIPAMENTOS INVERSORES E CONTROLADORES

Dentro do contexto da geração de energia fotovoltaica deve-se destacar o papel fundamental dos inversores de potência e dos controladores de carga. Inversores de potência são circuitos elétricos que transformam corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Esses equipamentos têm um papel fundamental na evolução e aprimoramento dos sistemas de geração de energia, os quais abrangem aplicações domésticas, automobilísticas e industriais (Germanos et al., 2020). A concepção mais simples de um inversor de potência pode ser obtida por uma fonte de corrente contínua controlada por um conjunto de chaves analógicas conectadas na montagem Full-Bridge ou Ponte H Completa (Dogga & Pathak, 2019) (Dogga & Pathak, 2019) (Lakshika et al., 2020).

Os equipamentos inversores possuem tipicamente uma comunicação usando o protocolo MODBUS, com o meio físico de comunicação padrão RS485, podendo ser o modelo RTU (Remote Terminal Unit) ou o TCP-IP (Transmission Control Protocol). Destaca-se também a criação de uma aliança neste contexto, a “SunSpec Alliance” a qual define um conjunto de protocolos para padronizar as informações trocadas do inversor (Colak et al., 2021). Ambos os tipos de comunicação podem ser usados para acesso aos dados do inversor em uma rede local ou pela internet. E neste caso surgem muitas formas de obtenção dos dados, pois cada fabricante pode personalizar as tabelas de dados dos inversores, com diferentes endereços de memória, particularizando a forma de obtenção de dados.

TRABALHOS RELACIONADOS E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Alguns estudos recentes destacam a ampla adoção de tecnologias para geração de energia e análises dos respectivos dados. No estudo de Calca et al. (2021) é abordada uma visão qualitativa do aproveitamento térmico e fotovoltaico da energia solar em áreas rurais no Brasil em período de doze anos (2009 a 2020), destacando os atuais avanços dessa fonte alternativa na matriz elétrica nacional e as políticas públicas de incentivo relacionadas. Os resultados apontaram que a energia solar térmica tem sido utilizada para o tratamento e dessalinização de água para o consumo humano, reaproveitamento na produção agrícola, além de outras aplicações rurais importantes. Em Rosa et al. (2018) destaca-se que a energia solar fotovoltaica está em constante crescimento em todo o mundo, mas há uma falta de estudos sobre gestão de energia e ferramentas de tomada de decisão. Por isso, é importante que investidores e gestores tenham informações sobre o desempenho e as características ideais de geração de energia em diferentes lugares e condições.

Em Mensah et al. (2018) é apresentado um estudo de viabilidade para implantação de uma usina combinada (solar e biogás) para geração de energia elétrica no Município de Itajubá, considerando uma projeção populacional para os próximos 20 anos. A pesquisa de Paiva et al. (2020) apresenta um estudo sobre o dimensionamento e avaliação a capacidade

de geração de energia elétrica a partir de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede - SFVCR, para desenvolvimento das atividades de uma granja produtora de aves no estado do Mato Grosso, baseado em dados de irradiação solar incidente no plano, disponibilizados pelo banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Em Batista et al. (2022) é apresentado outro estudo de viabilidade financeira da implantação de um sistema de geração de energia solar, para o campus do IFMT, de Tangará da Serra. O estudo foi realizado usando parâmetros de payback, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), baseado em dados de consumo monitorados no campus, onde tais dados, são a base para as análises de condições de investimento e previsão de retorno do projeto. Cabe ressaltar que nos três trabalhos analisados, Mensah et al. (2018), Paiva et al. (2020) e Batista et al. (2022), os dados da geração de energia são obtidos especificamente para cada estrutura projetada, mesmo tendo pontos em comum, como usarem dados dos inversores de potência e de dados das próprias concessionárias. Assim, destaca-se uma lacuna de pesquisa relevante, que é a adoção de arquiteturas de sistemas para aquisição e gestão de dados que sejam compatíveis com diferentes equipamentos e aplicados a diferentes projetos.

O estudo de Junior et al. (2024) apresenta a relação possível entre as condições meteorológicas e a geração de energia dos painéis fotovoltaicos, com destaque a criação e uso de ferramentas que permitam a identificação das regiões com alto potencial de geração de energia. Em Imai et al. (2020) o estudo visa otimizar o sistema de geração de energia solar fotovoltaica de uma empresa por meio da aplicação da modelagem matemática e simulação, correlacionando dados meteorológicos com especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos. O estudo mostrou a possibilidade de otimização, a qual resultou em um ganho de 2,35% na geração de energia no período de 12 meses analisado.

Em Gallardo-Saavedra et al. (2019) o estudo destaca o desafio crescente dos pesquisadores no monitoramento dos sistemas fotovoltaicos para indicar falhas que possam afetar a operação e manutenção, onde a falta de dados técnicos reais e acessíveis das plantas é um problema. Os resultados desta pesquisa fornecem informações essenciais para a identificação de modos e taxas de falha, a fim de reduzir o risco de investimento, melhorando a longevidade e o desempenho das usinas fotovoltaicas. Neste mesmo caminho, em Kalay et al. (2022) a pesquisa apresenta uma revisão sobre sistemas de aquisição de dados de usinas fotovoltaicas, dando ênfase aos dispositivos e as técnicas usadas para medir tensão, corrente, radiação solar e temperatura dos módulos fotovoltaicos. Contudo, verifica-se por meio destes estudos recentes, a necessidade constante de coleta e registro da geração de energia em bases de dados, de diversas plantas e locais, para certificação do respectivo potencial energético, identificação de variáveis, não dependendo exclusivamente de simulações.

Desta forma, este artigo procura tratar a seguinte pergunta de pesquisa: Como gerenciar e armazenar os dados de uma usina fotovoltaica, com persistência de dados e independência dos tipos e marcas de equipamentos utilizados? Como hipótese de

solução, o presente estudo explora as características técnicas que compõem duas plantas de geração de energia fotovoltaicas, seus equipamentos inversores e os métodos de comunicação, para assim, propor uma arquitetura geral que sirva de base e referência para realizar a integração de diferentes marcas de equipamentos, com alta conectividade e persistência de dados. Assim, contribui-se com o desenvolvimento sustentável, com o processo de gestão da informação referente a geração de energia, criando uma base de dados mais completa, com mais variáveis coletadas dos equipamentos inversores.

METODOLOGIA

A fim de respondermos à pergunta de pesquisa e alcançarmos o objetivo, classifica-se a pesquisa como aplicada pelo seu de interesse prático. Quanto a seu objetivo é uma pesquisa explicativa, pois visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a dificuldade na obtenção de dados de plantas fotovoltaicas, assim como compreender os fenômenos que influenciam a geração de energia em determinadas regiões. Em função da abordagem do problema a pesquisa classifica-se como qualitativa, pois se verifica a efetividade do método de coleta de dados com a arquitetura proposta, permitindo uma análise técnica e qualificada das informações, para assim, no futuro permitir a aplicação de outros métodos sob os dados armazenados.

Assim, de acordo com os trabalhos relacionados e o problema/hipótese abordado, os procedimentos metodológicos envolvem a análise técnica das plantas fotovoltaicas instaladas, (detalhando painéis e inversores utilizados), estudo dos métodos e protocolos de comunicação dos inversores, definição do hardware de comunicação, estruturação de uma base de dados, desenvolvimento de scripts de comunicação para registro em banco de dados local e remoto (nuvem), e desenvolvimento de site para validação e disponibilização dos relatórios do projeto.

Na próxima seção é apresentada a arquitetura e os procedimentos metodológicos aplicados em cada camada da arquitetura proposta.

A ARQUITETURA DE HARDWARE E SOFTWARE PARA GESTÃO INTEGRADA DOS DADOS DAS USINAS SOLARES

Esta seção apresenta os resultados efetivos da presente pesquisa, tendo como base os estudos dos trabalhos relacionados apresentados, onde verifica-se a carência de uma arquitetura abrangente, que contemple um sistema de gestão de dados flexível para diferentes plantas fotovoltaicas. No presente estudo, o enfoque é dado em uma representação com linguagem mais acessível, visando a análise ampla de gestores e administradores das organizações. Assim, destaca-se a proposta de uma arquitetura para gestão integrada dos dados de usinas fotovoltaicas com base em sistemas On-grid e Off-grid, a qual é organizada de forma simplificada em uma estrutura de três camadas. A seguir, a Figura 1 apresenta a referida arquitetura.

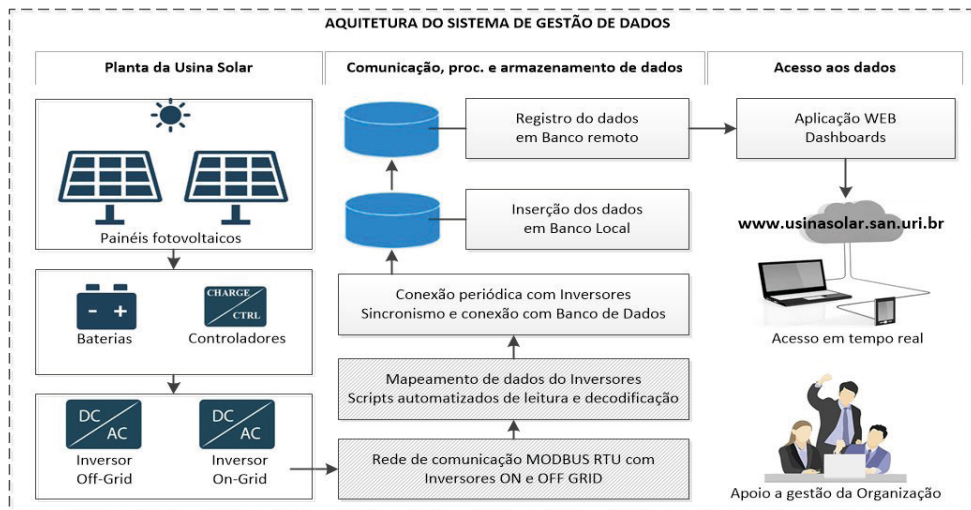


Figura 1. Representação da arquitetura proposta para os sistemas de gestão de dados da usina solar.

FONTE: Do Autor.

A primeira camada da arquitetura é representada pela definição específica das características da planta solar a ser instalada no local, considerando análise técnica prévia de engenheiros eletricitas, projeto e configuração da instalação. Ainda nesta camada, verificam-se especificações dos equipamentos de hardware e software usados para operação do sistema, dando ênfase na forma de comunicação com os mesmos.

Na segunda camada (parte central da Figura 1), é apresentada e proposta uma sequência de passos a serem seguidos como uma organização base para a principal parte do sistema de gestão de dados da usina solar. Tais passos contemplam a definição de uma rede de comunicação MODBUS RTU, normalmente em topologia de barramento, que conecta os inversores com os sistemas de análise, coleta e registro em bases de dados. Nesta camada destaca-se a conectividade com diferentes tipos e marcas de inversores, por meio do mapeamento de suas tabelas de dados e da conexão persistente com os sistemas online de apresentação dos dados.

Por fim, a terceira camada da arquitetura apresenta o projeto de uma aplicação WEB, capaz de ler e apresentar de forma dinâmica (em dashboards visuais) diferentes tipos de informações compiladas das usinas solares. Tais informações organizadas em gráficos de análise temporal, são acessíveis em qualquer dispositivo móvel ou computador via Internet, tendo ainda recursos específicos para visualização dos gestores da organização. Nas subseções seguintes serão detalhadas informações técnicas da implementação de cada uma das camadas da arquitetura.

CAMADA 1: PLANTA DA USINA SOLAR, HARDWARES E ESPECIFICAÇÃO DE INVERSORES

A primeira camada da arquitetura é composta pela análise e especificação técnica dos equipamentos que compõem ambas as plantas On-Grid e Off-Grid da usina solar instalada no parque tecnológico. Considerando que a instalação e configuração seguiu um projeto previamente executado por empresa habilitada, é focado neste ponto nas especificações que são relevantes para análise e coleta de dados, objeto da presente pesquisa, e que podem ser generalizadas para outras instalações futuramente. A planta da usina “On-Grid” possui capacidade máxima de geração de 30,36 KWp, sendo composta por 92 painéis/ módulos fotovoltaicos de 330 Wp, que são conectados eletricamente, formando grupos em série e paralelo, para assim, atingir os requisitos de tensão e corrente do equipamento inversor. A seguir, a Figura 2 apresenta as especificações técnicas do Inversor trifásico GOODWE, modelo GW25K-MT, utilizado na referida planta.


	Entrada (CC)	
	Máxima tensão de entrada	1100V
	Faixa de tensão de máxima potência	200 ... 950V
	Máxima corrente entrada por MPPT	25A
	Número de MPPT	3
	Número de entradas CC	2/2/2
	Saída (CA)	
	Tensão de saída 1Φ	220 V
	Potência de saída	27,5 kW
	Frequência CA	60 Hz
	Corrente de saída	40A
	Máxima eficiência do inversor	98,7%
	Informações gerais	
	Temperatura ambiente	-20 °C ... 60 °C
	Grau de proteção	IP65
	Umidade relativa do ar	Até 100% - sem condensação

Figura 2. Especificações do Inversor SMT GW25K-MT.

Fonte: Adaptado de Goodwe.com.

Os 92 módulos utilizados são do fabricante ZNSHINESOLAR, modelo ZXP6-72-330/P, os quais operam, em condições de teste padrão (STC) de irradiação de 1000 W/ m², AM 1,5 e temperatura da célula de 25 °C. Os principais dados elétricos do módulo nestas condições são: potência nominal de 330Wp, tensão de operação 37,5V, corrente de operação 8,80A, eficiência do módulo de 16,97%, temperatura de operação de até 45° e tensão máxima do sistema de 1500V. O tipo de célula utilizada na fabricação do módulo é de Silício Poli Cristalino, tendo peso total aproximado de cada módulo em 21,5 kg. A instalação foi realizada no solo e em arranjo que pode ser visualizado na Figura 3.



Inversor e sistema de proteção



Figura 3. Registro da instalação On-Grid no parque tecnológico Tecno-URI Missões.

FONTE: Do Autor.

Foram instalados 06 arranjos (*strings*) na usina fotovoltaica, compostos por 15 módulos ligados em série. A tensão em cada módulo é de 37.5V, resultando em uma tensão de saída de 562.5V, valores que estão dentro da faixa de tensão máxima de potência do inversor (200 à 950V). A corrente máxima de cada *string* é de 15A, sendo admitida corrente máxima de 25A por MPPT no inversor especificado. Como será utilizado uma *string* por MPPT, a corrente atingirá no máximo 15 A. A potência instalada total do inversor é de 25 kW e a potência instalada em módulos é de 30,36 kW, assim a potência de painéis é 17.65% maior que a potência instalada de inversor, fato que não interfere na operação da usina devido a tolerância e ao respeito às especificações técnicas suportadas pelos equipamentos.

A unidade consumidora à qual está conectado ao sistema de microgeração possui disjuntor geral trifásico de 630A. A potência instalada do inversor resulta em uma corrente de 40A, sendo o sistema de geração compatível com as especificações para realizar o despacho do sistema de microgeração. Como segunda etapa da camada 1, também é especificada a usina solar “Off-grid”, que mesmo sendo menor serve de base para a integração de um sistema de monitoramento com diferentes tipos de geração de energia. Cabe ressaltar que este é um exemplo, um estudo de caso que mostra a aplicação da referida arquitetura de monitoramento da geração de energia. A Figura 4 ilustra um exemplo de instalação Off-Grid.

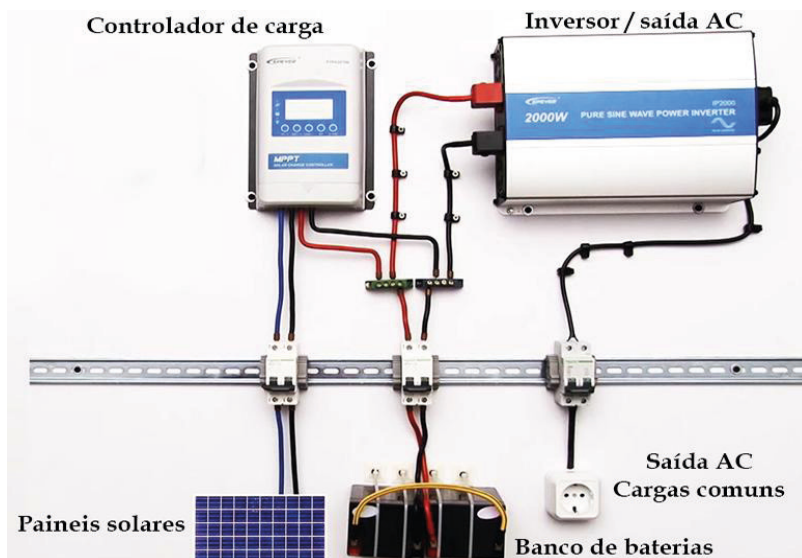


Figura 4. Exemplo de uma instalação Off-Grid.

Fonte: Adaptado de Epever.com.

A usina solar Off-Grid é composta por 8 módulos fotovoltaicos policristalinos de 335Wp, com um inversor solar de 2000VA, dois controladores de carga EPEVER MPPT XTRA 4210N, e um banco de baterias como sistema de armazenamento. O sistema de armazenamento constitui-se de 4 baterias Moura 12MS234, sendo cada par conectado em paralelo e associado a um dos controladores de carga EPEVER, responsáveis pelo gerenciamento da energia gerada pelo sistema solar off-grid. Sendo assim, tem-se dois sistemas de armazenamento com capacidade de 12 V e capacidade nominal de 234Ah/120hs. Na sequência este sistema é conectado ao Inversor solar, para assim gerar uma saída alternada AC para alimentar equipamentos de uso doméstico comum ou sistemas de iluminação convencionais. Neste caso, devido ao tamanho reduzido e o foco ser o monitoramento da geração e armazenamento de energia, o sistema possui como carga de teste a própria iluminação e computadores desktop do laboratório de pesquisa.

A instalação dos painéis para o sistema Off-Grid foi realizada no telhado do parque tecnológico, com sua instalação elétrica direcionada ao laboratório de pesquisa, onde se encontram os controladores, inversores e o banco de baterias. A Figura 5 a) apresenta a foto do telhado com a instalação realizada, e a Figura 5 b) apresenta uma foto do laboratório onde se encontram os referidos equipamentos.



Figura 5. Registro da instalação Off-Grid no Tecno-URI Missões.

FONTE: Do Autor.

Tais dados técnicos das usinas são relevantes para análise e correlação futura com os dados de geração de energia coletados, permitindo assim, uma verificação real da eficiência dos equipamentos ao longo do tempo, em relação também às características ambientais da região. Deste modo, na camada 1 da arquitetura é fundamental o levantamento dos dados técnicos dos arranjos fotovoltaicos, módulos e inversores utilizados, os quais vão compor uma parte fundamental da base de dados criada.

CAMADA 2: MODELO DE COMUNICAÇÃO, PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

A camada 2 contempla a definição de uma rede de comunicação MODBUS RTU, em topologia de barramento, que conecta os equipamentos inversores com os sistemas de análise, coleta e registro em bases de dados. Nesta camada destaca-se a conectividade com diferentes tipos e marcas de inversores, por meio do mapeamento de suas tabelas de dados e da conexão persistente com os sistemas online.

Existem várias opções de interface de comunicação nesses dispositivos, no caso da integração dos dispositivos de geração de energia solar e o computador, a interface utilizada é a serial, com conectores RS485, onde ambas são conectadas através de cabos que possuem na outra ponta um conversor USB. Essas portas seriais que são abertas na conexão entre computador e os inversores, são nomeadas COM no Windows e tty em Linux. No caso do presente projeto, foi utilizado um computador com sistema operacional Linux Mint para fazer a extração dos dados. Para demonstrar a conexão e visualização dessas portas, feita por meio do terminal, a Figura 6 apresenta em destaque as portas ttyXRUSB0 e ttyXRUSB1.


```
/dev/tty17 /dev/tty32 /dev/tty48 /dev/tty63 /dev/ttyS2 /dev/ttyS7
/dev/tty18 /dev/tty33 /dev/tty49 /dev/tty7 /dev/ttyS20 /dev/ttyS8
/dev/tty19 /dev/tty34 /dev/tty5 /dev/tty8 /dev/ttyS21 /dev/ttyS9
/dev/tty2 /dev/tty35 /dev/tty50 /dev/tty9 /dev/ttyS22 /dev/ttyXRUSB0
/dev/tty20 /dev/tty36 /dev/tty51 /dev/ttyprintk /dev/ttyS23 /dev/ttyXRUSB1
/dev/tty21 /dev/tty37 /dev/tty52 /dev/ttyS0 /dev/ttyS24
/dev/tty22 /dev/tty38 /dev/tty53 /dev/ttyS1 /dev/ttyS25
gabriel@gabriel-Nitro-AN515-54:~$
```

Figura 6. Execução de comando para checar a disponibilidade dos dispositivos conectados.

FONTE: Do Autor.

Além da conexão serial, outra parte fundamental é o tipo de comunicação padronizado pela maioria dos equipamentos, que tem como base o protocolo Modbus atuando sobre o serial, através da conexão de entrada RS485. O protocolo Modbus é implementado no dispositivo do fabricante, sendo especificado nos manuais quais são os registradores de dados disponíveis para leitura. Apesar do protocolo ser aberto, cada fabricante pode restringir ou não o acesso a estes dados. Muitos fabricantes disponibilizam as especificações do protocolo, destacando-se assim, que para adotar a presente arquitetura é necessário solicitar e ter acesso aos mapas de registradores de cada equipamento.

De modo geral, o Modbus é um protocolo de comunicação de dados que está na camada 7 (camada de aplicação) do modelo de referência de redes OSI e disponibiliza uma comunicação do tipo cliente-servidor (IDA, 2006). Existe também um padrão para a estrutura de dados trafegada na rede, que é denominado frame. O frame é subdividido em 2 partes: PDU (do inglês, *protocol data unit*) que é a parte dos dados enviados pelo cliente e ADU (do inglês, *application data unit*) que é construído do lado do cliente que inicia uma transação, englobando cabeçalho de endereço e checagem de erro ao final da estrutura (IDA, 2006). A Figura 7 apresenta a estrutura de uma requisição Modbus.

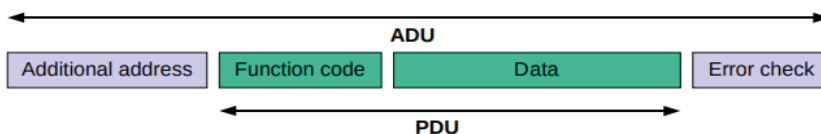


Figura 7. Ilustração da estrutura de uma requisição no protocolo Modbus.

FONTE: Do Autor.

Cada parte desta mensagem de requisição ou frame tem uma função, descritas da seguinte forma: *Additional address*: é o cabeçalho onde constam as informações de endereço para onde essa requisição deve ser enviada; *Function code*: é o código de função que deve ser executado ao ser realizada a requisição; *Data*: são os dados que são enviados na requisição, esses dados podem ser parâmetros para execução de alguma função específica, ou podem ser dados que estão sendo retornados via resposta da requisição; e *Error check*: é o campo de checagem de erro a partir do método CRC, que consiste em uma técnica baseada em divisão binária, checado pelo dispositivo que recebe a mensagem (NIU, 2014).

O protocolo Modbus define como os dados são identificados: os dados são armazenados em registradores (16 bits) e cada um deles é endereçado por um número único que varia de 0 a 65536 (número máximo de inteiros com 2 bytes). A organização desses dados é chamada de modelo de dados e é totalmente específica do fornecedor do inversor. Os mapas Modbus são documentos que listam onde os dados são armazenados (endereço do registro, por exemplo, 40194), o nome dos dados (ex: tensão na fase 1, em volts) e como eles são armazenados (como um número inteiro de 16 bits, em um registrador somente de leitura). Tendo como base este modelo de comunicação a ser utilizado, segue-se então para a etapa de extração automatizada dos dados dos equipamentos.

ALGORITMO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O algoritmo de aquisição e extração de dados foi desenvolvido na linguagem de programação Javascript, sendo executado através do NodeJs (ambiente de execução JavaScript). Outra ferramenta utilizada no desenvolvimento foi o Typescript, que serve para inferir tipagem forte na linguagem base, que por padrão, não possui. Outra peça fundamental para acelerar o desenvolvimento, foi o consumo de uma biblioteca para abstração da conexão Modbus, de modo que, com poucas configurações e maior agilidade, já seja possível realizar a leitura dos equipamentos. Essas configurações são: *Bauds*: a taxa que a conexão deve seguir, é uma unidade de medida que mensura a quantidade de vezes em que ocorre oscilação de sinal eletrônico por segundo na rede (GALLOWAY, 2012); e Caminho da porta do dispositivo: como no projeto foi utilizado Linux, o caminho das portas seriais ficam em /dev/tty* onde “*”, é um número variável de acordo com a ordem de conexão no computador. Na comunicação USB do Arduino, por exemplo, o sufixo é ACM, seguido do número de ordem de conexão. Já no caso de um controlador de carga solar, o sufixo pode ser o XUSB, como é possível ver na Figura 6.

A Figura 8 apresenta o arquivo de configuração das conexões com os equipamentos, ilustrando nas linhas de código 13 a 15 e 17 a 19, as referidas configurações de *baudrate* (taxa de comunicação) e caminho da porta de comunicação com o dispositivo.

```
8 export const DEVICE_CONFIG: DeviceEnvConfig = {
9   arduino: {
10     baudRate: '9600',
11     devicePathPort: '/dev/ttyACM0',
12   },
13   epever: {
14     baudRate: '115200',
15     devicePathPort: epeverDevicePathPort,
16   },
17   goodwe: {
18     baudRate: '9600',
19     devicePathPort: '/dev/ttyACM0',
20   },
21 };
```

Figura 8. Trecho do arquivo de configuração da conexão Modbus com o dispositivo servidor.

FONTE: Do Autor.

Além das configurações de conexão, existem também as configurações de leitura que são criadas a partir das especificações da implementação do protocolo Modbus por parte do fabricante. A Figura 9 apresenta um trecho de exemplo destes arquivos de configuração (em inglês), que detalham a organização dos registradores que contém os dados relevantes a serem lidos do equipamento.

Numb er	Variable name	Addr ess	Function code	Description	Unit	Times
A1	Over temperature inside the device	2000	02 (read)	1 The temperature inside the controller is higher than the over-temperature protection point. 0 Normal		
A2	Day/Night	200C	02 (read)	1-Night, 0-Day		
A3	PV array input voltage	3100	04 (read)	Solar charge controller--PV array voltage	V	100
A4	PV array input current	3101	04 (read)	Solar charge controller--PV array current	A	100

Figura 9. Exemplo com trecho de informações dos registradores de dados do protocolo Modbus de um equipamento.

FONTE: Do Autor.

Geralmente, essa especificação é apresentada em forma de tabela, em alguns casos isso está especificado em um arquivo “.csv” produzido pelo fabricante, ou em uma tabela em arquivo PDF. Independente da fonte, esses dados precisam ser coletados e automatizados no código fonte do sistema, para assim, realizar a leitura organizada dessas informações. No caso da presente pesquisa, o formato utilizado foi o JSON pelo fato de ser agnóstico a linguagens (BRAY, 2014), com isso, em trabalhos futuros, a mesma estrutura pode ser reaproveitada em outro projeto. A Figura 10 apresenta o formato JSON utilizado.

```
1 {
2   "A1": {
3     "variableName": "Over temperature inside the device",
4     "databaseColumnName": "overTemperatureInsideTheDevice",
5     "functionOperationTypes": "r",
6     "address": "2000",
7     "functionCode": "02",
8     "description": "1 The temperature inside the controller is higher than the over-temperature protection
point. 0 Normal"
9   },
10  "A2": {
11    "variableName": "Day/Night",
12    "databaseColumnName": "isNight",
13    "functionOperationTypes": "r",
14    "address": "200C",
15    "functionCode": "02",
16    "description": "1-Night, 0-Day"
17  },
18 }
```

Figura 10. Trecho convertido da tabela para o formato JSON.

FONTE: Do Autor.

Feita a conversão dos dados, percorre-se toda a relação dos endereços dos registradores para poder ler os dados um a um, aplicar alguma técnica de processamento ao dado lido (se necessário), e salvar os dados em um banco de dados. Atualmente o sistema está configurado para gravar a cada 5 minutos os dados dos registradores dos equipamentos. A Figura 11 apresenta um fluxograma geral do conjunto de etapas para executar o registro de dados.

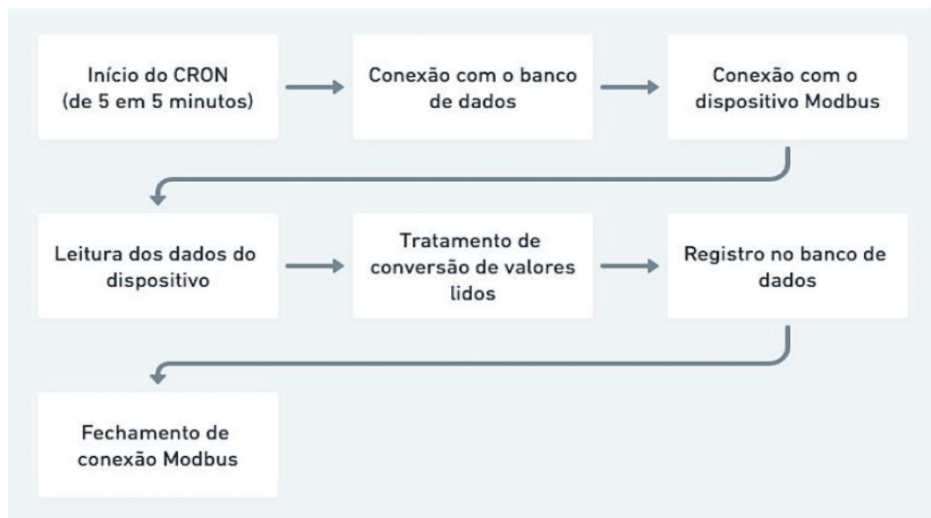


Figura 11. Fluxograma geral de funcionamento do algoritmo com as etapas de registro de dados.

FONTE: Do Autor.

O banco de dados está estruturado de tal forma que para cada marca de dispositivo diferente, há uma tabela com seus dados. Porém, para não misturar os registros de dois equipamentos iguais, foi adicionada uma coluna a mais para identificar de qual dispositivo o dado está sendo registrado, um identificador único. Outro ponto relevante a destacar é o volume de dados gerado, levando em consideração que na atual configuração os dados são lidos em intervalos de 5 minutos. Com um dispositivo apenas sendo lido nessa frequência, são gerados 288 registros no banco de dados por dia. Em uma semana temos 2016, em 30 dias 8.640, em 90 dias 25.920 e em 360 dias 103.680. Por outro lado, adequando essas informações à configuração atual de equipamentos desta pesquisa, podemos multiplicar por 3 toda a estimativa feita anteriormente, o que no ano estaríamos gerando 311.040 registros.

Se ainda for aprofundado para cada dado registrado, devemos levar em conta que, para cada linha registrada no banco de dados, existem em média 100 colunas. Cada coluna faz referência a um registrador lido de um dispositivo específico que diz respeito a uma variável do equipamento. Então, onde temos um banco de dados com 311.040 registros, estamos falando em média de 311.040.000 unidades de dados registrados. Esta informação é relevante para estimarmos o uso de dados em sistemas de comunicação e também o uso de espaço de armazenamento em computação em nuvem.

Destaca-se que na dashboard de visualização no sistema web, são mostradas apenas 4 variáveis a fim de exemplo, porém, todos os dados lidos permanecem armazenados e disponíveis para uso em pesquisas futuras, inclusive podem servir como base para aplicações de técnicas de inteligência artificial. Com a aplicação de extração dos dados pronta, a próxima etapa é o desenvolvimento da aplicação WEB, transformando dados brutos em informações relevantes da geração de energia.

CAMADA 3: ACESSO AOS DADOS, APLICAÇÃO WEB PARA GESTÃO DA INFORMAÇÃO DA PLANTA SOLAR

O servidor de dados foi desenvolvido com a mesma linguagem de programação que o leitor dos dispositivos, o que há de diferente é o uso da biblioteca *express* (BROWN, 2019), para trabalhar com o recebimento de requisições do protocolo http. De modo geral, as responsabilidades do servidor de dados são: receber as requisições dos clientes (no caso do projeto, a dashboard é o único cliente, ainda assim é possível escalar para vários outros se fosse o caso), tratativa de requisições, processamento de requisições, consulta do banco de acordo com as especificações da requisição e resposta da requisição com os dados. A Figura 12 apresenta uma visão geral da aplicação WEB desenvolvida e seus atores principais.

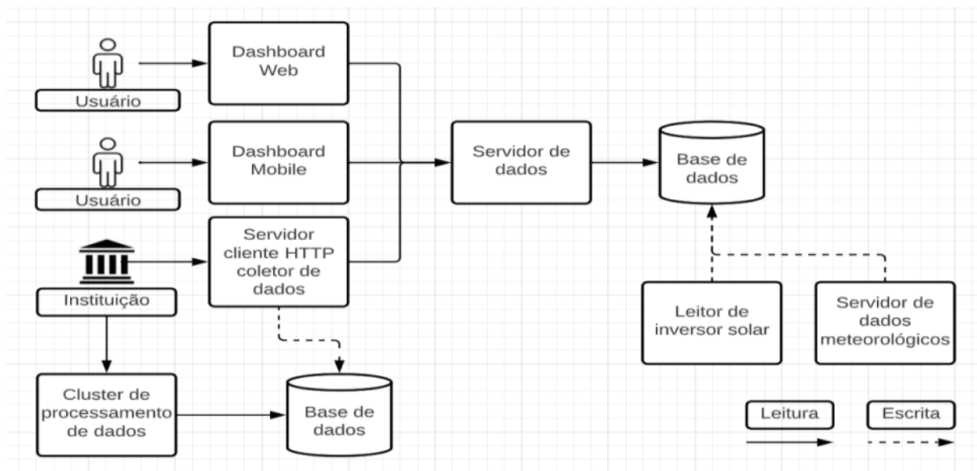


Figura 12. Fluxograma geral com as partes que compõem a aplicação WEB de gestão dos dados.

FONTE: Do Autor.

O único processamento a mais, que envolve dependências externas, que ocorre nesse servidor, é a mesclagem dos dados do dispositivo com os dados climáticos que são registrados em paralelo em outro servidor. Os dados climáticos são registrados na mesma cadência, que o dos dispositivos (5 min), portanto, para cada registro realizado em um equipamento de geração solar, terá um registro das condições climáticas da região no dado momento.

A dashboard, também não foi diferente das demais aplicações quanto a linguagem de programação, a diferença aqui é que foi utilizado um framework chamado *React*, criado pelo time do Facebook ou, Meta, que ajuda a acelerar o desenvolvimento, principalmente quando a aplicação em questão deve ser uma SPA (do inglês, *Single Page Application*). Ao trocar de página, não é feita uma nova requisição ao servidor para baixar novamente o HTML, CSS e Javascript, já está tudo disponível. Para ser possível transitar de páginas sem fazer requisições novas, isso é feito através do Javascript, que altera a renderização do conteúdo totalmente no lado do cliente, e apenas conteúdos que estão em servidores que passam por requisições para atualizar na página. Essa arquitetura promove um isolamento de responsabilidades entre o *front-end* e *back-end* pois nesse modelo, o *front-end* só é responsável por renderizar os dados com base em requisições individuais feitas para um dado específico, enquanto o *back-end* deve apenas servir dados ao invés de juntar dados com HTML (BROWN, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo a coleta ou extração de dados efetivada e automatizada, é possível consumir os dados extraídos para geração de gráficos das variáveis específicas que esses equipamentos fornecem, assim, transformando-as em informações prontas para a análise dos gestores da organização (essas variáveis podem variar de acordo com o equipamento e o fabricante).

Neste sentido, foram realizados vários registros dos gráficos apresentados em tempo real pelo sistema WEB desenvolvido, mostrando a efetividade da coleta, registro e envio dos dados da geração de energia. Os primeiros gráficos são relativos ao sistema Off-Grid, provenientes do controlador de carga Epever MPPT XTRA 4210N. As principais informações apresentadas neste estudo de caso, que considera as principais variáveis para análise são: entrada de energia da matriz fotovoltaica (em watts), tensão da bateria (em volts), nível de bateria (em percentual) e entrada de tensão da matriz fotovoltaica (em volts). Por se tratar de um sistema Off-Grid, as informações referentes ao banco de baterias utilizado são fundamentais. As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam estes gráficos registrados durante os testes.

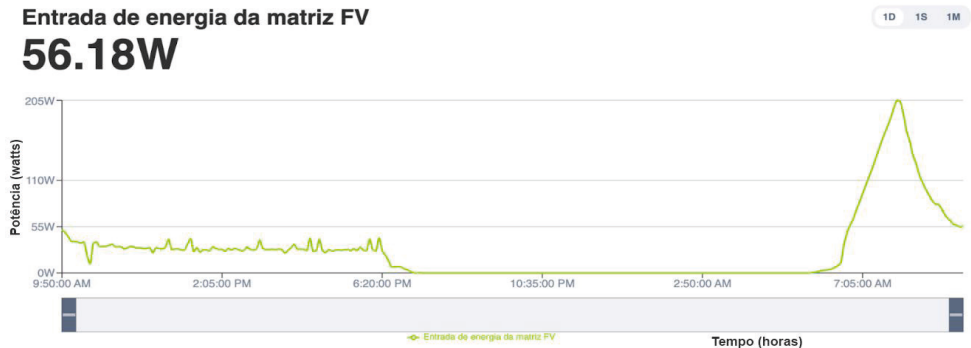


Figura 13. Gráfico da variável “Entrada de energia da matriz FV”.

FONTE: Do Autor.

Tensão da Bateria

14.48V

1D 1S 1M



Figura 14. Gráfico da variável “Tensão de bateria” em função do tempo.

FONTE: Do Autor.

Nível de Bateria

100%

1D 1S 1M



Figura 15. Gráfico da variável “Nível de bateria” em função do tempo.

FONTE: Do Autor.

Entrada de tensão da matriz FV

37.66V

1D 1S 1M

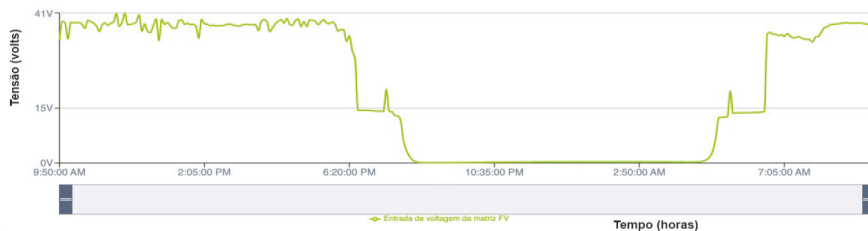


Figura 16. Gráfico da variável “Entrada de tensão da matriz FV”.

FONTE: Do Autor.

Do mesmo modo, um segundo e diferente tipo de equipamento inversor também foi testado durante o estudo da arquitetura proposta nesta pesquisa. Os dados foram extraídos do inversor Goodwe modelo SMT GW25K-MT, utilizado na usina solar On-Grid, mostrando novamente a efetividade do processo de extração de dados em tempo real, com o registro e envio dos dados da geração de energia. As principais informações apresentadas neste outro estudo de caso de análise são: alimentação de energia à rede (em watts), energia

alimentada a rede no dia (em KW/h), corrente da rede na fase 1 (em Amperes) e tensão da rede da fase 1 (em volts). As Figuras 17, 18, 19 e 20 apresentam estes gráficos registrados durante os testes. Observa-se na Figura 17 que a geração termina por volta de 6:45 PM (fim da tarde) e inicia às 7:30 AM (início da manhã).



Figura 17. Gráfico da variável “Alimentação de energia à rede” durante um dia em watts.

Fonte: Do Autor



Figura 18. Gráfico da variável “Energia alimentada à rede” em KW/h.

Fonte: Do Autor



Figura 19. Gráfico da variável “Corrente da fase 1” durante um dia.

Fonte: Do Autor



Figura 20. Gráfico da variável “Tensão da rede da fase 1” durante um dia.

Fonte: Do Autor

Com estes gráficos o gestor pode fazer diferentes tipos de análises e inferências, de forma segura e com base em dados técnicos. Por exemplo, na Figura 21 é realizada a análise de um período maior de visualização (semana de 02 a 09/12/2022 - sistema Off-Grid), podendo verificar o padrão de relações entre diferentes variáveis e seus efeitos. Esse padrão é observado na Figura 21 com a área destacada em verde, demonstrando o típico comportamento padrão da geração de energia na região. De outro modo, na mesma semana observada no gráfico é possível observar na área destacada em vermelho, uma anormalidade, que gerou uma queda abrupta na geração voltando logo em seguida ao normal.

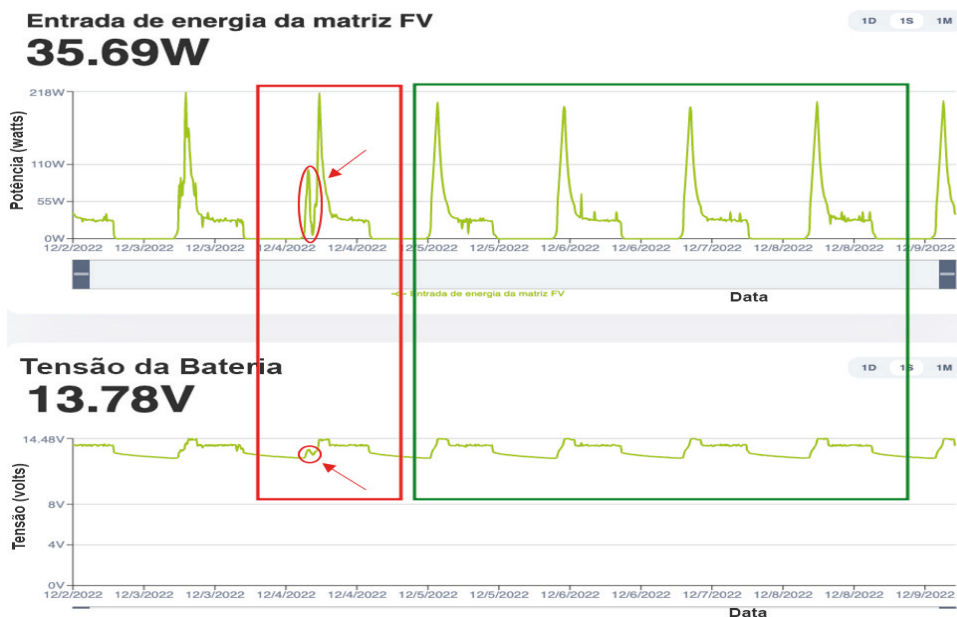


Figura 21. Exemplo da relação entre diferentes variáveis observadas no período de uma semana.

Fonte: Do Autor

Ao mesmo tempo em que a variável “Entrada de energia da matriz” sofre alteração, os reflexos disso são visualizados no gráfico da variável “Tensão da bateria”, onde verifica-se a mesma anormalidade em relação ao padrão observado nos outros dias. Esse tipo de correlação entre variáveis caracteriza apenas um exemplo entre os diversos tipos de análises que podem ser realizadas com um sistema de monitoramento em tempo real da geração de energia, e principalmente com o registro histórico destes dados proporcionado pela presente arquitetura de aquisição de dados das usinas.

Outro tópico interessante de salientar na obtenção dos dados, é o registro e correlação de outras variáveis que não são obtidas pelo inversor, mas que impactam diretamente na produção de energia elétrica, e no funcionamento do equipamento. Neste estudo usamos a variável “clima”, correlacionando a condição climática no momento das aquisições de dados dos equipamentos.

No protótipo da *dashboard* do sistema desenvolvido, ao passar o mouse por cima do gráfico, é possível visualizar em um quadro pequeno sobreposto, o horário do registro e quais eram as condições climáticas naquele momento na cidade de Santo Ângelo (dados climáticos extraídos de API da *OpenWeather* - <https://openweathermap.org/api>). Para complementar a análise apresentada anteriormente, a ilustração apresentada na Figura 22 utiliza o mesmo período de da Figura 21, destacando o momento do mesmo evento anômalo.

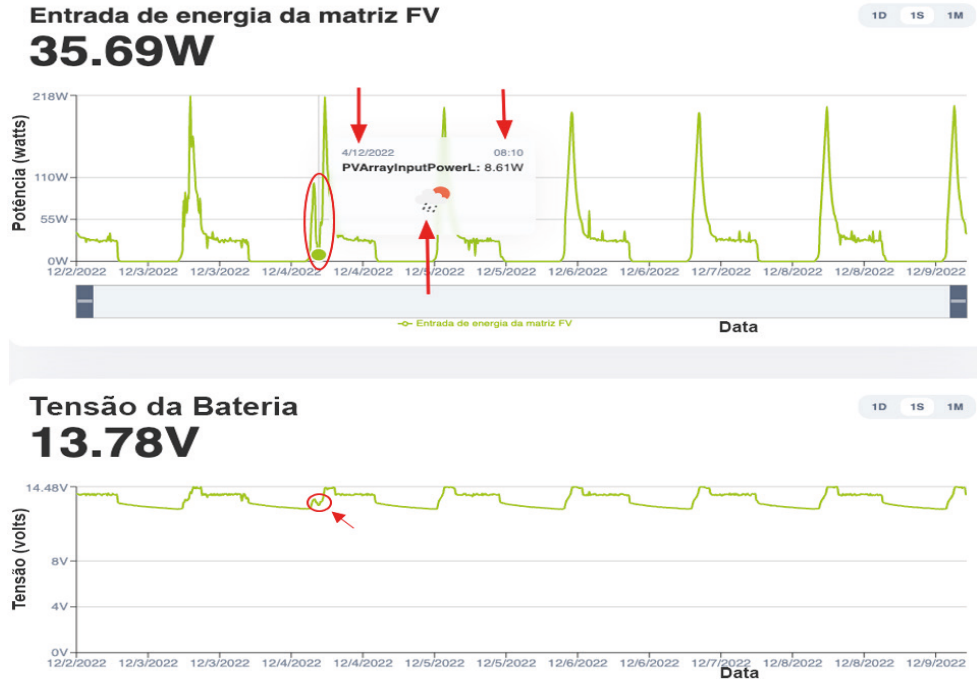


Figura 22. Relação entre variáveis observadas destacando o registro do status climático chuvoso.

Fonte: Do Autor

Verifica-se que em 04 de dezembro de 2022, às 08:10h (horário médio de pico de entrada de energia) estava registrando um tempo chuvoso, o que contrasta bastante em relação aos outros dias que apresentavam dias ensolarados ou com poucas nuvens. Nesse mesmo horário, em dias ensolarados, a média é de aproximadamente 160W na entrada de energia, já nesse dia específico em que estava chovendo, foi registrado 8.61W o que traz a uma redução de quase 95% na entrada de energia da matriz de geração. Outro exemplo de análise de variável para a mesma data é o nível de bateria, visualizado na Figura 23, o qual em dias ideais apresenta no mesmo horário 99% de carga, o que neste caso mostra o contraste com o dia chuvoso, em que a carga se encontra em 65%.

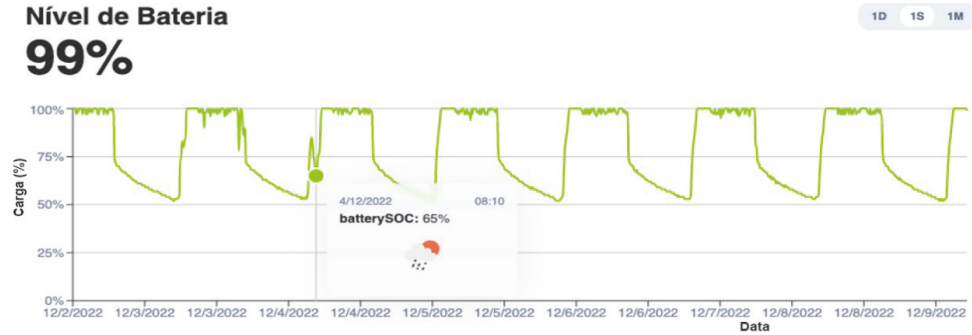


Figura 23. Análise do nível de bateria considerando o clima chuvoso.

Fonte: Do Autor

Por fim, tais gráficos e análises mostram a relevância do registro permanente dos dados da geração de energia. Os dados utilizados na presente pesquisa ainda podem ser usados futuramente em outros estudos. Como mencionado, o sistema de monitoramento WEB apresenta algumas variáveis, porém a base de dados extraída dos equipamentos é muito maior, contendo 97 atributos passíveis de análise posterior, disponíveis no repositório <https://github.com/usinasolarURISAN/database-OnOffGrid>. Considerando a apresentação em gráficos e também o registro da base de dados completa, constata-se que é possível utilizar tais resultados como ferramenta de apoio à decisão dos gestores de organizações. Assim, é tratada a pergunta da presente pesquisa, mostrando a viabilidade de armazenar e gerenciar os dados mais amplos das usinas, considerando diferentes plantas e equipamentos utilizados, possível devido a integração proposta na arquitetura em camadas. As informações auxiliam na análise de viabilidade do investimento realizado, bem como na verificação de variáveis que influenciam a geração de energia solar na região. Exemplo disso é o impacto dos fatores meteorológicos na eficiência da geração de energia fotovoltaica.

CONCLUSÕES

A geração de energia solar está se expandindo no Brasil e, com isso, cresce a importância dos dados gerados pelos equipamentos responsáveis pela operação e controle do processo. É fundamental que esses dados sejam coletados e analisados de forma eficiente para permitir uma gestão efetiva da geração de energia e uma análise precisa do retorno de investimento. Devido a utilização de equipamentos inversores diferentes ser comum nas usinas, principalmente com o crescimento do mercado de energia solar, e muitas vezes caracterizar-se como uma desvantagem, a arquitetura apresentada neste estudo permite justamente reduzir esse problema, possibilitando a coleta e armazenamento de dados brutos de equipamentos de diferentes fabricantes. Tal tarefa tem como requisitos a utilização do mesmo tipo de comunicação, o protocolo aberto MODBUS, e a obtenção das tabelas de registradores de dados dos equipamentos, por meio de acordo com os fabricantes.

Com isso, adotando a arquitetura proposta, pode-se registrar os dados de maneira permanente, e possibilitar a correlação de diferentes variáveis climáticas e técnicas, o que é fundamental para a compreensão da efetividade do sistema de geração de energia. Como resultados destacam-se o sistema WEB desenvolvido, os tipos de equipamentos controladores e inversores mapeados, a base de dados criada, e as possibilidades de análises que o sistema permite, agregando valor ao processo de gestão das usinas solares do Parque Científico e Tecnológico, além de auxiliar na tomada de decisão sobre futuros investimentos em energia limpa. Como trabalhos futuros pode-se destacar a utilização da base de dados por outros pesquisadores para estudos relacionados à eficiência de geração de energia solar, a correlação de variáveis usando Inteligência Artificial, e também para análise da vida útil e desempenho técnico de diferentes equipamentos utilizados.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Energia Solar Fotovoltaica No Brasil. <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-fotovoltaica-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/>, Acesso em 20-10-2024.

ABSOLAR, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Ranking lista os painéis solares mais eficientes de 2023. São Paulo: ABSOLAR, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/ranking-lista-os-paineis-solares-mais-eficientes-de-2023/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BATISTA, G. P., Ferreira, R. A., de Faria, J. G., Fiirst, W. G., de Souza, S. S. F., & dos Anjos Lima, F. P. Análise da viabilidade financeira de implantação de um sistema de geração fotovoltaico no IFMT campus avançado Tangará da Serra. **Brazilian Journal of Development**, 8(5), 40317-40334, 2022.

BARRUTIA, L., Garcia, I., Barrigón, E., Ochoa, M., Lombardero, I., Hinojosa, M., ... & Algora, C. "Development of the lattice matched GaInP/GaInAs/Ge triple junction solar cell with an efficiency over 40%". Em *Spanish Conference on Electron Devices (CDE)* (pp. 1-4), IEEE, 2018.

- BORTOLOTO, V. A., Souza, A. J., Gois, G., Martins, M. A., Berghe, M. J., & Montanha, G. K. “Geração de Energia Solar On Grid e Off Grid”. Em *VI JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica*, 2017.
- CALCA, M. V. C., Raniero, M. R., Anacleto, K. B., Franco, J. R., Dal Pai, A., & de Lima Caneppele, F. (2021). Uma perspectiva sobre o aproveitamento térmico e a conversão direta da energia solar em áreas rurais no Brasil. **Research, Society and Development**, 10(6), e9810615610-e9810615610, 2021.
- COLAK, A. M., Tawada, Y., Inzunza, R., & Ambo, T. “Evaluation of Interoperability Functions via Modbus-TCP for Photovoltaic Inverters”. Em *10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)* (pp. 111-115), IEEE, 2021.
- CHATTERJEE, S., Kumar, P., & Chatterjee, S. A techno-commercial review on grid connected photovoltaic system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 81, 2371-2397, 2018.
- DOGGA, R., & Pathak, M. K.. Recent trends in solar PV inverter topologies. **Solar Energy**, 183, 57-73, 2019.
- EPE ENERGÉTICA, EPE–Empresa de pesquisa energética. **Atlas da Eficiência Energética–Brasil**. epe.gov.br, 2020.
- JUNIOR, Renato Afonso, José Luis Domingos, Ghunter Paulo Viajante, Raphael de Aquino Gomes, Aylton José Alves, and Cleiber Nichida. “Monitoramento Online do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Através do Método de Regressão Linear Periódica.” Em *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 2024.
- GALLARDO-SAAVEDRA, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Pérez, O. Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants. **Elsevier Energy**, 183, 825-836, 2019.
- GERMANOS, R. A. C., Catalani, F., Cabral, J. S., & Menegatti, C. R. Inversores de Potência: Conceitos teóricos e demonstração experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 42, 2020.
- IDA. 2006. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b. p. 2. Disponível em <https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- NIU, K., Chen, K., Lin, J., & Zhang, Q. T. Polar codes: Primary concepts and practical decoding algorithms. **IEEE Communications magazine**, 52(7), 192-203, 2014.
- GALLOWAY, B., & Hancke, G. P. Introduction to industrial control networks. **IEEE Communications surveys & tutorials**, 15(2), 860-880, 2012.
- BRAY, T. The javascript object notation (json) data interchange format (No. rfc7159). **Rfc-Editor.org**, ISSN: 2070-1721, 2014.
- BROWN, E. Web development with node and express: leveraging the JavaScript stack. **O’Reilly Media**, 2019.
- IMAI, H. E., Bósio, L. F., Silva Junior, A. A. D., Berto, L. K., Yamaguchi, N. U., & Rezende, L. C. S. H. Simulação computacional como ferramenta de otimização na geração de energia solar fotovoltaica. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, e20190343. 2020.

- JESUS, Fernando. Painéis solares fotovoltaicos atingem novo recorde de eficiência de 29,2%. Portal Energia, 17 maio 2022. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/paineis-solares-fotovoltaicos-recorde-eficiencia/>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- LAKSHIKA, K. H., Boralessa, M. K. S., Perera, M. K., Wadduwage, D. P., Saravanan, V., & Hemapala, K. M. U. Reconfigurable solar photovoltaic systems: A review. **Heliyon**, 6(11), 2020.
- KABALCI, E. Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods. **Solar Energy**, 198, 247-274, 2020.
- KALAY, M. Ş., Kılıç, B., & Sağlam, Ş. Systematic review of the data acquisition and monitoring systems of photovoltaic panels and arrays. **Elsevier Solar Energy**, 244, 47-64, 2022.
- KALE, A. S., Nemeth, W., Harvey, S. P., Page, M., Young, D. L., Agarwal, S., & Stradins, P. Effect of silicon oxide thickness on polysilicon based passivated contacts for high-efficiency crystalline silicon solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 185, 270-276, 2018.
- KAYES, B. M., Atwater, H. A., & Lewis, N. S. Comparison of the device physics principles of planar and radial p-n junction nanorod solar cells. **Journal of applied physics**, 97(11), 114302, 2005.
- LIU, Y., Li, Y., Wu, Y., Yang, G., Mazzarella, L., Procel-Moya, P., ... & Sun, B. High-efficiency silicon heterojunction solar cells: materials, devices and applications. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, 142, 2020.
- MATOS, F. B. Modelamento computacional do comportamento de células fotovoltaicas baseado nas propriedades físicas dos materiais. **Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade Federal de Uberlândia**, Faculdade em Engenharia Elétrica, Pós em Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG, 2006.
- MENSAH, J. H. R., Gnonhoue, O. G., Ogoulola, C. E. G., & Santos, I. F. S. D. Avaliação energética e econômica de uma usina de geração de energia solar fotovoltaica-biogás em Itajubá, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, 5(11), 1009-1023, 2018.
- MERCALDO, L. V., & Veneri, P. D. Silicon solar cells: materials, technologies, architectures. **Solar Cells and Light Management**, Elsevier, 35-57, 2020.
- ORTEGA-ARRIAGA, P., Babacan, O., Nelson, J., & Gambhir, A. Grid versus off-grid electricity access options: A review on the economic and environmental impacts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 143, 110864, 2021.
- PAIPA, E. A. L., Serrano, M. A. L., & Mora, S. B. S. Controlador de carga PWM eficiente y de bajo costo para sistemas fotovoltaicos autónomos. **Respuestas**, 23(S1), 6-13, 2018.
- PAIVA, M. L., de Azevedo, J. C. R., & Júnior, J. U. Avaliação da aplicabilidade de sistema fotovoltaico conectado à rede em uma granja no Mato Grosso. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 11(1), 274-288, 2020.
- PINHO, J. T., & Galdino, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de trabalho de energia solar-GTES. **CEPEL-DTE-CRESESB**, 2014.
- ROSA, C. B., Siluk, J. C. M., Michels, L., Rigo, P. D., & Rediske, G. A gestão da energia solar fotovoltaica sob a ótica da bibliometria. **Tecno-Lógica**, 22(2), 113-119, 2018.

SADORSKY, P. Modeling renewable energy company risk. **Energy Policy**, 40, 39-48, Elsevier, 2012.

SANTO FERNANDES, L. E., Medrado, R. C., Miranda, R. L., de Melo Filho, J. B., de Carvalho Filho, M., & Bezerra, W. R. P. "Integração de Sistema de Armazenamento em Usina Híbrida Eólica-Solar: Estudo de caso no Município de Casa Nova, Bahia". *Em Cong. Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 2022.

SOUSA, M., & Morgado, S. Avaliação da viabilidade económica da energia solar fotovoltaica: Estudo de caso da polícia de segurança pública. **Revista da UI_IPSantarém**, 7(2), 48-67, 2019.

JUNIOR, J. U., Junior, E. F. C., & Tiepolo, G. M. "Análise do Desempenho de dois anos de Operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR". *Em Cong. Brasileiro Energia Solar-CBENS*, 2014.

WAN, Z., Li, Y., An, J., Wang, X., Cheng, L., & Liao, Y. Exploring water-level fluctuation amplitude in an approach channel under the regulation of a dual cascade hydro-plant in the dry season. **Water Supply**, 22(4), 4159-4175, 2022.