

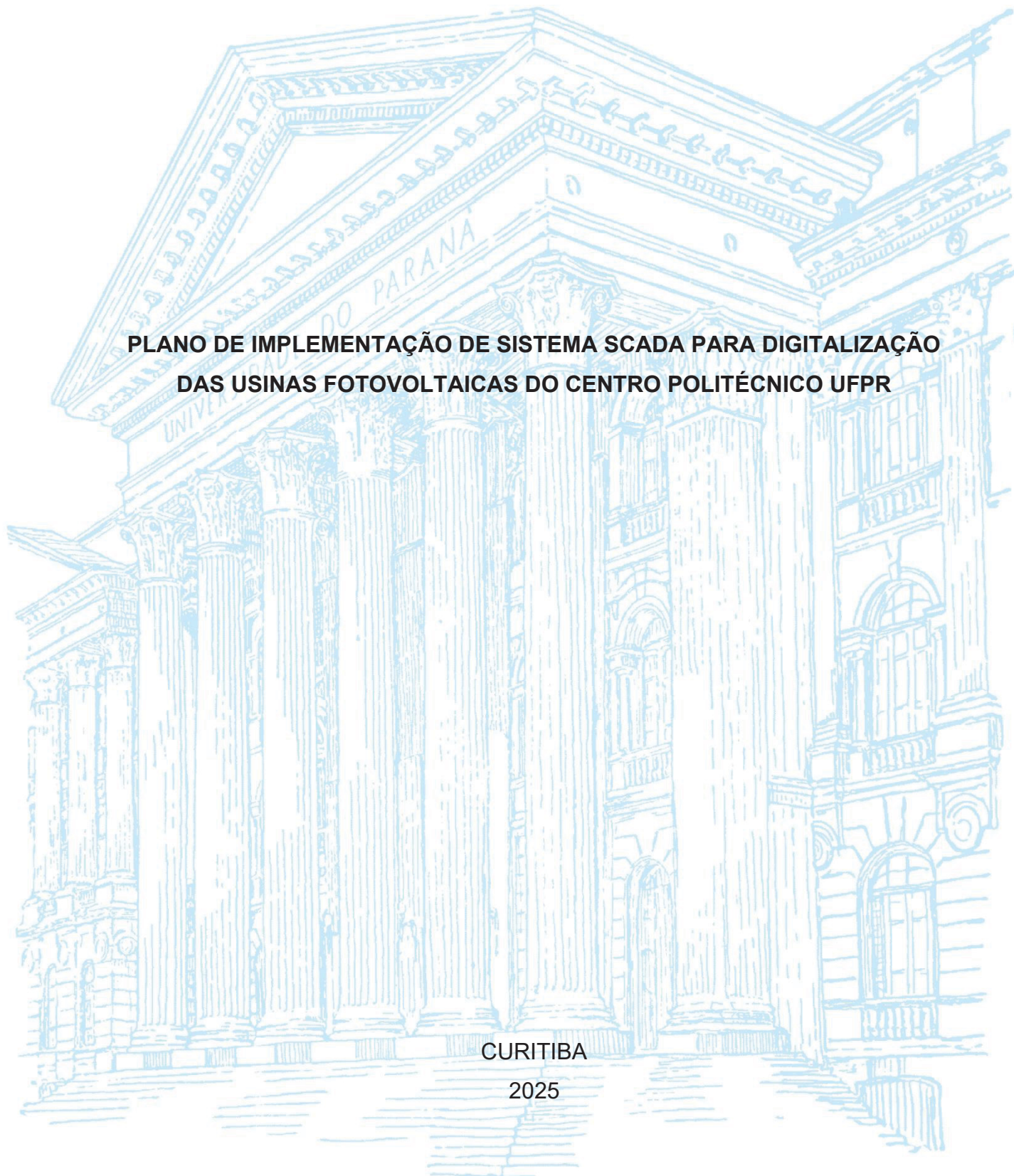
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL DE PAULA STUZATA

**PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA SCADA PARA DIGITALIZAÇÃO
DAS USINAS FOTOVOLTAICAS DO CENTRO POLITÉCNICO UFPR**

CURITIBA

2025



GABRIEL DE PAULA STUZATA

PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA SCADA PARA DIGITALIZAÇÃO DAS
USINAS FOTOVOLTAICAS DO CENTRO POLITÉCNICO UFPR

TCC apresentado ao curso de Pós-Graduação de
Gestão Estratégica em Energias Naturais
Renováveis, Universidade Federal do Paraná –
Campus Curitiba, como requisito à obtenção do
título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CURITIBA
2025

RESUMO

O avanço da geração fotovoltaica (FV) no Brasil, e sua participação na matriz energética nacional demanda soluções mais eficientes de monitoramento e gestão operacional das usinas, não só em ambientes de geração centralizada, mas também em ambientes institucionais/acadêmicos. Este trabalho tem como objetivo propor a implementação de um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para a digitalização e supervisão da saúde operacional das usinas fotovoltaicas localizadas no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A metodologia contempla o levantamento das variáveis críticas ao desempenho energético, a definição da arquitetura de rede, a parametrização da plataforma e a projeção de ganhos potenciais do sistema como um todo. Com base em estudos nacionais recentes e suas aplicações experimentais, o projeto visa explorar a temática de automação em sistemas de energia, ampliando a disponibilidade das plantas FV, reduzir perdas e contribuir para integridade da saúde operacional. Espera-se que o plano de implementação proposto sirva de base para proporcionar ganhos em eficiência energética, confiabilidade e suporte à tomada de decisão institucional.

Palavras-chave: Automação de Energia; SCADA; Usinas Fotovoltaicas; Monitoramento Operacional; Eficiência Energética.

ABSTRACT

The advance of photovoltaic Generation (PV) in Brazil and its growing share in the national energy matrix demand more efficient solutions for monitoring and operational management of power plants, not only in centralized generation environments, but also within institutional and academic settings. This study aims to propose the implementation of a SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system for the digitalization and supervision of the operational health of photovoltaic plants located at the Polytechnic Center of the Federal University of Paraná (UFPR). The methodology includes identifying critical variables affecting energy performance, defining the network architecture, configuring the supervisory platform, and projecting the system's potential gains. Based on recent national studies and its experimental applications, the project aims to explore the theme of automation in energy systems, enhancing the availability of PV plants, reducing losses, and supporting operational health integrity. It is expected that the proposed implementation plan will serve as a basis for providing gains in energy efficiency, reliability, and support for institutional decision-making.

Keywords: Energy Automation; SCADA; Photovoltaic Power Plants; Operational Monitoring; Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ARQUITETURA GENÉRICA DE REDE DE AUTOMAÇÃO.....	12
FIGURA 2 - MÓDULO FOTOVOLTAICO CANADIAN SOLAR CS3W-400	22
FIGURA 3 - FOTO DA USINA FOTOVOLTAICA DO DELT UFPR	23
FIGURA 4 - FOTO DA USINA FOTOVOLTAICA BIOLÓGICAS UFPR	24
FIGURA 5 - PIRANÔMETRO HUKSEFLUX SR30.....	26
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DE ARQUITETURA DE REDE DE AUTOMAÇÃO.....	28
FIGURA 7 – EXEMPLO DE TELA DE SINÓTICO.....	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PIRANÔMETRO HUKSEFLUX SR.....	22
TABELA 2 – QUANTITATIVO CONSOLIDADO DE VARIÁVEIS MONITORADAS...	27

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

DELT – Departamento de Engenharia Elétrica

ECA – Energia em Corrente Alternada

ECC – Energia em Corrente Contínua

EM – Estação Meteorológica

FV – Fotovoltaico(a)

IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Internacional de Eletrotécnica)

MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento de Ponto de Máxima Potência)

PN – Potência Nominal

UFV – Usina Fotovoltaica

ISO – *International Organization for Standardization*

SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition*

ISA – *International Society of Automation*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 CONTEXTO	4
1.2 OBJETIVOS	5
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	5
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 JUSTIFICATIVA	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 METODOLOGIA DE COLETA DE MATERIAIS	7
2.2 SELEÇÃO E ANÁLISE DE LEITURA.....	8
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
3.1 CONCEITOS DE SISTEMAS SCADA.....	10
3.1.1 LEITURA DE VARIÁVEIS	10
3.1.2 GESTÃO DE ALARMES	10
3.1.3 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM).....	11
3.1.4 BLOCO DE COMUNICAÇÃO.....	11
3.1.5 BANCO DE DADOS.....	12
3.2 ARQUITETURA DE REDE DE AUTOMAÇÃO.....	12
3.3 PARÂMETROS DE PERFORMANCE.....	14
3.3.1 PRODUTIVIDADE DE ARRANJO – <i>ARRAY YIELD</i> (Y_a).....	14
3.3.2 PRODUTIVIDADE FINAL – <i>FINAL YIELD</i> (Y_f).....	14
3.3.3 PRODUTIVIDADE DE REFERÊNCIA– <i>REFERENCE YIELD</i> (Y_r).....	15
3.3.4 TAXA DE PERFORMANCE – <i>PERFORMANCE RATIO</i> (TP).....	15
3.3.5 PERDAS NORMALIZADAS DE CAPTURA DO ARRANJO – <i>ARRAY</i> <i>CAPTURE LOSSES</i> (L_c).....	15
3.3.6 PERDAS DO INVERSOR – <i>INVERTER LOSSES</i> (L_i)	16
3.3.7 EFICIÊNCIA DE ARRANJO – <i>ARRAY EFFICIENCY</i> (η_{PV}).....	16
3.3.8 EFICIÊNCIA DO INVERSOR – <i>INVERTER EFFICIENCY</i> (η_{INV}).....	16
3.3.9 EFICIÊNCIA DO SISTEMA – <i>SYSTEM EFFICIENCY</i> (η_{SIS})	16
3.3.10 FATOR DE CAPACIDADE DE UTILIZAÇÃO – <i>CAPACITY UTILIZATION</i> <i>FACTOR</i> (FC)	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 DESCRIÇÃO GERAL SOBRE LOCALIDADE DAS INSTALAÇÕES	18
4.2 DETALHAMENTO TÉCNICO DAS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS.....	18

4.2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO DAS INSTALAÇÕES	18
4.2.2 INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA DELT	19
4.2.3 INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA BIOLÓGICAS	20
4.3 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE MONITORAMENTO.....	21
4.4 AQUISIÇÃO DE DADOS GERACIONAIS E METEOROLÓGICOS	23
5 DESENVOLVIMENTO	24
5.1 LEVANTAMENTO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE	24
5.1.1 VARIÁVEIS ELÉTRICAS.....	24
5.1.2 VARIÁVEIS AMBIENTAIS	25
5.1.3 VARIÁVEIS OPERACIONAIS	26
5.1.4 VARIÁVEIS DE DESEMPENHO	26
5.1.5 QUANTITATIVO TOTAL DAS VARIÁVEIS	27
5.2 DEFINIÇÃO DE ARQUITETURA DE AUTOMAÇÃO	27
5.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	28
5.3.1 TELAS DE SUPERVISÃO (SINÓTICOS).....	29
5.3.2 CONFIGURAÇÃO DE ALARMES	30
5.3.3 REGISTRO HISTÓRICO/AMOSTRAGEM DE DADOS	30
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	32
6.1 TRABALHOS FUTUROS	33
8 REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

Esta seção contará com aspectos introdutórios do trabalho, detalhando contextualização, objetivos e justificativa acerca da temática escolhida.

1.1 CONTEXTO

A matriz energética brasileira vem passando por transformações significativas nas últimas décadas, impulsionadas pela crescente inserção de fontes renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), a geração de energia elétrica no Brasil em 2023 apresentou uma participação expressiva da energia hidráulica (cerca de 60%), seguida pela fonte eólica e solar, cuja capacidade instalada vem crescendo de forma acelerada. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) destaca que a energia fotovoltaica tem se consolidado como uma das principais responsáveis pela diversificação e sustentabilidade da matriz elétrica nacional, apresentando crescimento anual em torno de 30% nos últimos cinco anos.

Apesar dos avanços, a integração da energia solar fotovoltaica ao sistema elétrico apresenta desafios técnicos relevantes para a operação segura e eficiente do sistema. A variabilidade e intermitência que são típicas dessa forma de geração demandam mecanismos de monitoramento e controle para garantir a estabilidade da rede elétrica e a qualidade do fornecimento. Conforme apontado por Silva et al. (2022), a falta de visibilidade em tempo real e a dificuldade na gestão remota das UFVs podem comprometer a confiabilidade operacional, evidenciando a necessidade de sistemas avançados que permitam a supervisão contínua e intervenções rápidas, garantindo otimização do processo produtivo energético.

Neste contexto, a automação desempenha papel fundamental para otimizar o desempenho das UFVs e garantir sua integração eficiente no sistema elétrico nacional. Os sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) são ferramentas essenciais para a automação das plantas fotovoltaicas, permitindo o monitoramento remoto, controle em tempo real e coleta sistemática de dados operacionais, os quais fundamentam a tomada de decisão e a manutenção preditiva (Nascimento, 2021). A adoção de um sistema SCADA adequado possibilita melhorias

significativas na gestão energética e contribui para a sustentabilidade e expansão do setor solar no Brasil.

O presente trabalho retoma conceitos principais de análise de performance já realizada por Stuzata (2023), com mesmo material de estudo, indicadores de desempenho levantados, impactos e parâmetros de influência na degradação do sistema de geração fotovoltaica em questão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo geral o estudo, especificação e planejamento estruturado da implementação de um Sistema SCADA para monitoramento em tempo real, a saúde operacional das Usinas Fotovoltaicas do Centro Politécnico da UFPR.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Levantamento e Proposição de variáveis de interesse que serão monitorados no processo;
- Elaboração de Arquitetura de Rede a ser utilizada;
- Especificação e Parametrização de Sistema SCADA, e seus requisitos de funcionamento;
- Projeção de resultados atingíveis e ganhos potenciais com o processo de digitalização.

1.3 JUSTIFICATIVA

A crescente participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira impõe a necessidade de desenvolver sistemas de automação que atendam às especificidades das UFVs, promovendo maior eficiência e confiabilidade na operação. Embora existam estudos internacionais consolidados, não se observa a mesma robustez na literatura nacional quanto à especificação técnica de sistemas

SCADA adaptados ao contexto brasileiro, especialmente voltados para aplicação das usinas do centro politécnico da UFPR. Possui relevância ao contribuir para o aprimoramento dos processos de automação nas UFVs, apoiando a expansão ótima do sistema, aliado a conceitos de *Smart-Grids*. Dessa forma, pode se otimizar o desempenho das usinas, sendo uma das premissas importantes o mapeamento de onde a Universidade pode estar perdendo dinheiro em perdas que são remediáveis ou apresentam medidas corretivas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para iniciar o trabalho proposto, foi feita uma pesquisa com base de dados de materiais de embasamento científico (artigos acadêmicos, livros, revistas, teses, dissertações), que tratem da temática de especificação de sistemas supervisórios para aplicação em sistemas fotovoltaicos e correlatos.

Visando uma busca mais refinada de conteúdo, de viés construtivo para este trabalho, foi utilizada uma metodologia de coleta de materiais baseada na procura por palavras-chave que definem o macro tema.

2.1 METODOLOGIA DE COLETA DE MATERIAIS

Com o intuito de afunilar o material encontrado, foi seguida a diretriz de filtragem dos documentos escolhidos, uma vez que existe um grande volume de artigos e materiais científicos de orientação semelhante.

Dessa forma, para início do processo de seleção dos textos, foram selecionadas combinações de palavras-chave que são coerentes com a proposta deste trabalho de conclusão de curso.

Reunindo termos como “Sistemas Fotovoltaicos”, “Energia Solar” e “Usinas Fotovoltaicas”, é possível estabelecer qual será o objeto de estudo, e consequentemente a fundamentação do assunto técnico que será abordado. Dessa maneira, já se torna factível detalhar o direcionamento da busca para um âmbito mais específico.

Na sequência, o objetivo é reunir termos que contemplem a avaliação qualitativa do material de estudo, portanto, foram escolhidas as palavras “Sistemas Supervisórios”, “SCADA” e “Monitoramento”, possibilitando um direcionamento ainda mais adequado para compor as referências bibliográficas.

Por fim, em se tratando de um estudo que aborda aspectos quantitativos desses sistemas, termos como “Modelagem”, “Dimensionamento” e “Especificação” foram incluídos nas buscas.

2.2 SELEÇÃO E ANÁLISE DE LEITURA

Após definição das palavras-chave utilizadas na busca, baseado nos resultados obtidos, filtrou-se primeiramente os artigos pela exclusão de resultados duplicados encontrados na plataforma, e na sequência fazendo uma análise qualitativa dos produtos encontrados, de maneira a avaliar ano de publicação, leitura de títulos, resumos e conclusões e alinhamento de palavras mantendo a coesão com o que foi buscado, determinando a relevância do artigo para esta revisão bibliográfica.

O objetivo, portanto, é avaliar o panorama científico nacional a respeito do monitoramento operacional de usinas fotovoltaicas via SCADA e tecnologias associadas, avaliando avanços, lacunas e contribuições de valor ao tema.

Foram selecionados ao todo, após aplicar o filtro descrito anteriormente, quatro trabalhos científicos. São apresentados na sequência.

Segundo Melo (2023), propõe a implementação de um sistema SCADA utilizando a plataforma ScadaBR, voltado à supervisão de uma usina fotovoltaica em regime de geração distribuída. O projeto integrou sensores ambientais (temperatura, irradiação) e medições elétricas (tensão, corrente) com um servidor local, operando com comunicação via Modbus RTU. O trabalho busca avaliar praticidade e viabilidade técnica do sistema, mensurando tempo de resposta, simplicidade de configuração, escalabilidade e desempenho em geral.

Segundo Pontes (2021), desenvolve o estudo de uma solução complementar entre SCADA e IoT, com foco no monitoramento remoto de uma usina FV de 254 kWp e uma estação solarimétrica. Integrando comunicação Wi-Fi com microcontroladores ESP32 e sensores ambientais, o sistema foi projetado com visualização multiplataforma, permitindo acesso remoto por dispositivos móveis. O trabalho busca avaliar a acessibilidade, confiabilidade da comunicação sem fio e robustez da interface de visualização, que conta com digitalização e monitoramento descentralizados. A integração de dados meteorológicos e elétricos, e a proposta de disponibilizá-los em tempo real, amplia a capacidade de diagnóstico operacional da planta.

Segundo Müller, descreve a aplicação de um sistema SCADA em uma usina FV de médio porte operada pela empresa Proengel. O projeto foi orientado para fins de análise de eficiência energética, operacional e financeira. A solução contemplou a aquisição de dados em tempo real, alarmes personalizados, análise de perdas

energéticas e um módulo específico para cálculo de payback. O trabalho busca exemplificar como o SCADA pode ser instrumento decisivo na gestão estratégica de plantas solares, especialmente no suporte à tomada de decisão, elemento fundamental no avanço da maturidade operacional de sistemas FVs.

Segundo Relva (2017), tem por objetivo estudar a composição de elementos que modelam a irradiação solar para geração fotovoltaica, caracterizando a solarimetria e a radiação solar, e desenvolvendo seu equacionamento, vinculando à normas e critérios de classificação, a partir de dados medidos em solo por uma estação solarimétrica.

Segundo Siqueira et al. (2024), apresentaram um artigo científico que propõe aplicação da norma IEC61850 no desenvolvimento de um sistema SCADA, voltado ao monitoramento avançado de usinas fotovoltaicas. O estudo, realizado em contexto acadêmico com simulação de operação real, buscou elevar o grau de interoperabilidade e inteligência da supervisão ao incluir parâmetros como qualidade de energia, alarmes estruturados e diagnósticos automatizados de falhas. Os autores buscam ponderar ganhos de eficiência operacional e facilidade na integração de dispositivos multi-fabricantes, apontando caminho para digitalização de plantas FV.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCEITOS DE SISTEMAS SCADA

Sistemas SCADA tem origem do acrônimo *Supervisory Control and Data Acquisition*, em tradução livre, controle supervisão e aquisição de dados. Estes sistemas constituem uma das bases da automação industrial, sendo utilizados para supervisão, aquisição de dados, geração de alarmes e controle em tempo real de processos contínuos ou discretos. Em plantas fotovoltaicas, o SCADA permite a visualização em tempo real de variáveis como tensão, corrente, potência, temperatura dos módulos, status de inversores e condições meteorológicas (DAVID; LEITE; SANTOS, 2022). Isso permite avaliar seus comportamentos e chegar a novas variáveis qualitativas, avaliando a saúde operacional da planta em seu pleno funcionamento.

O SCADA é estruturado em sua composição especialmente pela leitura de variáveis (*tags*), gestão de alarmes, interface homem-máquina (IHM), bloco de comunicação, e banco de dados.

3.1.1 LEITURA DE VARIÁVEIS

As variáveis do processo, também conhecidas como *tags* de comunicação, são os dados aquiridos pelo sistema supervisão, das grandezas medidas em campo, e aquiridas e disponibilizadas ao SCADA.

3.1.2 GESTÃO DE ALARMES

Definição não só de alarmes, mas também de eventos, trata-se da especificação de limites e limiares para o comportamento das variáveis de processo, com lógica de prioridade para eventos relevantes, de maneira a indicar eventos anômalos e potenciais inconsistências no processo produtivo.

Conforme normativa ISA-18.2 (2016), é essencial que a lógica de alarme evite a “avalanche de eventos”, situação comum em arquiteturas mal planejadas, que pode comprometer a eficiência da resposta humana ao sistema. Recomenda-se critérios de

prioridade, agrupamento de alarmes e categorização adequada como boas práticas de engenharia.

3.1.3 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM)

Refere-se ao comportamento do usuário com o sistema, visualização gráfica e telas de sinótico, bem como interação com os dados disponibilizados.

3.1.4 BLOCO DE COMUNICAÇÃO

Contempla toda a comunicação de campo e interação do supervisório com o processo, especialmente pelos protocolos de comunicação industrial. Tais protocolos devem ser confiáveis, padronizados e compatíveis com os equipamentos do sistema. Entre os mais utilizados para Usinas FV, destacam-se *Modbus RTU/TCP*, *OPC UA*, e *IEC 61850*.

Modbus RTU/TCP é um protocolo aberto amplamente usado em sistemas SCADA, devido à sua simplicidade e suporte por fabricantes de inversores, medidores e sensores. Permite comunicação mestre-escravo em redes RS-485 ou via Ethernet.

OPC UA advém de “*Open Platform Communications – Unified Architecture*”, protocolo de padrão moderno, independente de plataforma, que permite interoperabilidade entre diversos sistemas industriais, além de recursos como autenticação, criptografia e modelagem orientada a objetos.

IEC 61850 é um protocolo criado especificamente para subestações elétricas, permitindo comunicação entre IEDs (Intelligent Electronic Devices), inclusive para relés e dispositivos de proteção. É comumente utilizado em plantas de geração, por sua robustez e suporte a topologias em tempo real.

A escolha do protocolo depende do grau de interoperabilidade desejado, número de dispositivos e da complexidade da arquitetura de rede. Em projetos acadêmicos, o *Modbus* tende a ser o mais escolhido justamente por sua ampla acessibilidade e documentação, sendo um protocolo aberto (Souza et al., 2020).

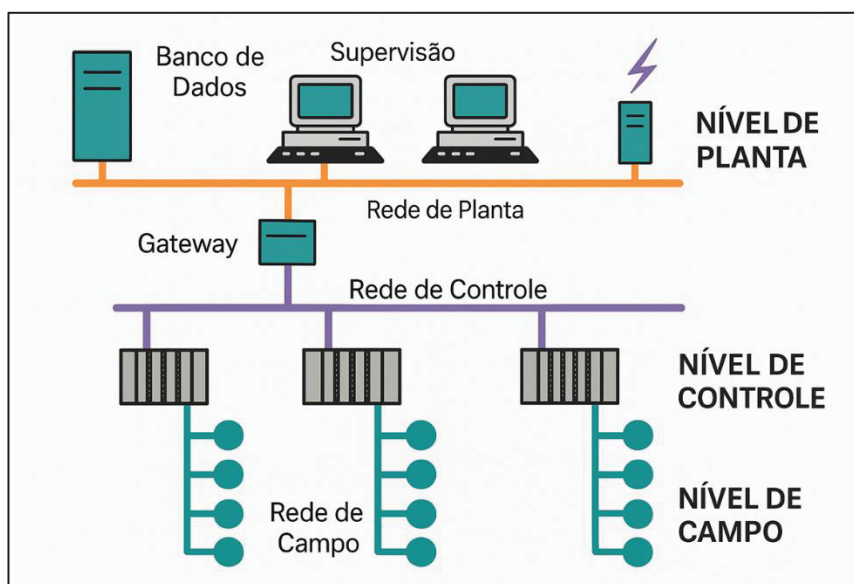
3.1.5 BANCO DE DADOS

Diz respeito a toda armazenagem e histórico de dados adquiridos pelo sistema, podendo interagir com bancos de dados comerciais, e permitindo análises de longo prazo, identificação de falhas recorrentes e otimizações operacionais.

3.2 ARQUITETURA DE REDE DE AUTOMAÇÃO

A estrutura de automação para supervisão de uma planta fotovoltaica é organizada em uma arquitetura em camadas (níveis), permitindo segmentação das funções e simplificação da manutenção. Adota-se divisão típica em quatro camadas principais: Nível de Campo (Sensoriamento e Medidores), Nível de Controle (CLPs/RTUs), Nível de Supervisão (SCADA) e Nível de TI (Gonçalves et al., 2021).

FIGURA 1 – ARQUITETURA GENÉRICA DE REDE DE AUTOMAÇÃO



FONTE: Pantoja Industrial (2010)

3.2.1 NÍVEL DE CAMPO

Responsável pela aquisição de dados primários por meio de sensores físicos e medidores de campo. Envolvem sensores meteorológicos (piranômetros, células de referência); medidores de energia, módulos de comunicação de inversores. Os dados

desse nível são críticos para o cálculo de indicadores de desempenho e detecção de falhas.

3.2.2 NÍVEL DE CONTROLE

Nesse nível, os dados dos sensores são tratados por Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) ou *Remote Terminal Units* (RTUs), responsáveis pela leitura e condicionamento dos sinais, conversão analógico-digital, implementação de lógicas de alarme e intertravamentos locais, e principalmente, comunicação com o nível supervisão.

Em muitos casos, inversores de frequência modernos já possuem funções de RTU integradas, facilitando sua incorporação em redes industriais *Modbus*.

3.2.3 NÍVEL DE SUPERVISÃO

Nesta camada reside o servidor SCADA e o sistema supervisão, efetivamente. Será responsável pela visualização em tempo real das variáveis medidas, armazenamento de históricos, geração de relatórios periódicos, alertas e alarmes para operação remota ou local, e interface com o usuário.

Plataformas como Elipse E3 e SCADA BR são frequentemente utilizadas em ambientes acadêmicos e industriais brasileiros.

3.2.4 NÍVEL DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO (TI)

Responsável pelos serviços de rede, integração com sistemas corporativos e de apoio à decisão. Envolverá a interação com servidores de banco de dados externo (SQL, NoSQL), Interfaces web para acesso remoto (via VPN, HTTPS), Backup de dados e segurança cibernética, e integração com disponibilização de dados corporativos.

3.3 PARÂMETROS DE PERFORMANCE

Desenvolvida pela Comissão Internacional de Eletrotécnica, IEC (*International Electrotechnical Commission*), a normativa IEC 61724 (1998), apresenta a formulação de indicadores de performance de sistemas fotovoltaicos, de maneira a avaliar qualitativamente seu desempenho a partir de dados quantitativos obtidos das medições das respectivas usinas.

Na sequência, serão abordados parte dos parâmetros apresentados pela norma, que serão utilizados e servirão de base para compor o estudo de performance dos sistemas analisados.

3.3.1 PRODUTIVIDADE DE ARRANJO – ARRAY YIELD (Y_a)

Este indicador quantifica o total de horas de um determinado dia que os módulos da usina precisam operar na potência nominal (P_n) para gerar energia em corrente contínua (E_{cc}) que foi produzida pelo arranjo neste respectivo dia, como definido em (1).

$$Y_a = \frac{E_{cc}}{P_n} = \left[\frac{kWh}{kWp} \right] = [h] \quad (1)$$

Este mesmo parâmetro pode ser replicado para maiores espaços de tempo, como semanas, meses e anos.

3.3.2 PRODUTIVIDADE FINAL – FINAL YIELD (Y_f)

Este indicador quantifica o total de horas de um determinado dia que os módulos devem trabalhar em potência nominal (P_n) para gerar energia em corrente alternada (E_{ca}) na saída dos inversores neste respectivo dia, como definido em (2), podendo também ser replicado para maiores espaços de tempo.

$$Y_f = \frac{E_{ca}}{P_n} = \left[\frac{kWh}{kWp} \right] = [h] \quad (2)$$

3.3.3 PRODUTIVIDADE DE REFERÊNCIA– REFERENCE YIELD (Yr)

Este indicador visa criar um referencial de produtividade, avaliando, com base na irradiação nas Condições Padrões de Teste ($G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$), relacionar com a irradiação solar em uma hora incidente no plano dos módulos (IPDM) de um determinado dia, de maneira a quantificar o número de horas para chegar na mesma contribuição energética no arranjo para o respectivo dia, como evidenciado em (3).

$$Y_r = \frac{I_{PDM}}{G_0} = [kWh/kWp] = [h] \quad (3)$$

3.3.4 TAXA DE PERFORMANCE – PERFORMANCE RATIO (TP)

Essa métrica relaciona sua Produtividade Final com sua Produtividade de Referência, que a partir do valor padrão encontrado para referencial produtivo, é possível indicar a parcela disponível de energia após levar em conta suas perdas, de maneira a quantizar quão próximo o sistema está da operação ideal, em termos de performance. O indicador é explicitado em (4).

$$TP [\%] = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (4)$$

3.3.5 PERDAS NORMALIZADAS DE CAPTURA DO ARRANJO – ARRAY CAPTURE LOSSES (Lc)

Este parâmetro tem como resultado as perdas de operação dos painéis (arranjo), como no caso de perdas por cabeamento, sujidades ou dissipação térmica. Seu valor numérico pode ser obtido pela diferença entre a Produtividade de Referência (Y_f) e a Produtividade de Arranjo (Y_a), de maneira a avaliar qual o total de horas que o arranjo precisa trabalhar para gerar igual quantidade das perdas apresentadas. Sua equação está definida em (5)

$$L_c = Y_r - Y_a = [kWh/kWp] = [h] \quad (5)$$

3.3.6 PERDAS DO INVERSOR – INVERTER LOSSES (Li)

Quantifica, em horas, a geração de energia necessária para gerar igual quantidade de perdas apresentadas pelo inversor, a exemplo de perdas ou insuficiências apresentadas pelo dispositivo. O parâmetro está explicitado em (6).

$$Li = Ya - Yf = \left[kWh / kWp \right] = [h] \quad (6)$$

3.3.7 EFICIÊNCIA DE ARRANJO – ARRAY EFFICIENCY (η_{PV})

Este indicador relaciona a eficiência do arranjo de módulos fotovoltaicos a partir de sua geração, vinculando-o a irradiação solar incidente no plano do módulo (I_{PDM}) e a área de captação solar (quantidade de módulos) referida ao arranjo (A_a), de acordo com o explicitado em (7).

$$\eta_{PV}[\%] = \left(\frac{E_{cc}}{I_{PDM} \cdot A_a} \right) * 100\% \quad (7)$$

3.3.8 EFICIÊNCIA DO INVERSOR – INVERTER EFFICIENCY (η_{INV})

Indica a eficiência total do inversor, relacionando a geração de energia CA com a geração de energia CC do referido inversor em operação, tal qual explicitado em (8).

$$\eta_{INV}[\%] = \left(\frac{E_{CA}}{E_{CC}} \right) * 100\% \quad (8)$$

3.3.9 EFICIÊNCIA DO SISTEMA – SYSTEM EFFICIENCY (η_{SIS})

Este indicador apresenta a eficiência do sistema, em porcentagem, relacionando a energia CA gerada, levando em consideração a irradiação solar incidente (I_{PDM}) e a área do arranjo (A_a), sendo explicitado em (9).

$$\eta_{SIS}[\%] = \left(\frac{E_{CA}}{I_{PDM} \cdot A_a} \right) * 100\% \quad (9)$$

3.3.10 FATOR DE CAPACIDADE DE UTILIZAÇÃO – *CAPACITY UTILIZATION FACTOR* (FC)

O parâmetro referido relaciona a geração de energia CA de determinado dia e o comparativo com o valor quantitativo gerado em caso de operação na potência nominal nas 24 horas do respectivo dia, sendo apresentado em (10).

$$FC = \frac{E_{CA}}{(P_n \cdot 24h)} = Yf/24h = [kWh/kWp \cdot h] \quad (10)$$

Trata-se, portanto, de um indicador adimensional.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais de estudo deste trabalho, abrangendo aspectos gerais e técnicos a respeito das instalações fotovoltaicas, equipamentos de medição relacionados a aquisição de dados, plataforma institucional já existente para aquisição de dados, bem como metodologia utilizada para especificar sistema supervisorio.

4.1 DESCRIÇÃO GERAL SOBRE LOCALIDADE DAS INSTALAÇÕES

Ambas as instalações estão localizadas na cidade de Curitiba – PR, no Sul do Brasil, à altitude de 934m acima do nível do mar; com valor de latitude 25°29' S e valor de longitude 49°17' W. Sendo caracterizado pelo clima subtropical úmido, a capital paranaense possui verões amenos e invernos rigorosos, com média de temperatura anual em 16,5°C (A menor média de temperaturas entre as capitais do país) e precipitação anual tem volume de 1500mm aproximadamente, e irradiação solar média anual em 512,5W/m² (INMET,2018).

4.2 DETALHAMENTO TÉCNICO DAS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS

Neste detalhamento técnico, serão abordadas especificidades acerca dos módulos fotovoltaicos instalados nas plantas solares, bem como as características gerais e dimensões delas.

4.2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO DAS INSTALAÇÕES

As duas plantas solares contam com o mesmo modelo de módulo fotovoltaico, tratando-se do modelo *Canadian Solar* CS3W-400, que conta com potência nominal de 400 Wp. Cada painel possui área de captação solar de aproximadamente 2,12m² e 144 células de tecnologia silício policristalino. Apresenta eficiência de módulo de 17,9%.

FIGURA 2 – MÓDULO FOTOVOLTAICO CANADIAN SOLAR CS3W-400



FONTE: Canadian Solar (2022)

4.2.2 INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA DELT

A instalação fotovoltaica do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT), é composta pela potência nominal de usina de 96 kWp, contando com 240 módulos fotovoltaicos instalados no telhado e conectados à um Inversor ABB PVS-100 de 100kVA, apresentando 6 entradas MPPTs, ligadas a 12 *strings*. A área de captação solar, portanto, é de aproximadamente 508,8m². A Usina FV em questão é apresentada na figura 3.

FIGURA 3 – FOTO DA USINA FOTOVOLTAICA DO DELT UFPR



FONTE: Universidade Federal do Paraná (2020)

A posição dos módulos fotovoltaicos possui orientações alternadas em 180° quanto ao seu ângulo azimutal para cada fileira, como explicitado na figura 3. Os ângulos azimutais dos módulos ($\theta_{a,mod}$) variam entre 72° e 252° , assumindo o Sul Angular Azimutal como 0° , e a inclinação dos módulos ($\theta_{i,mod}$) é igual a 15° .

4.2.3 INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA BIOLÓGICAS

A instalação fotovoltaica do Departamento de Ciências Biológicas é composta pela potência nominal de aproximadamente 1,059 MWp, contando com 2648 módulos instalados ao longo de *carports*, fazendo com que esta usina seja a planta fotovoltaica sobre estacionamento de maior capacidade no Brasil (UFPR, 2020). Os painéis estão distribuídos sob conexão de seis inversores da ABB PVS-175 de 175kVA, tendo ao todo 72 entradas MPPTs, que por sua vez estão ligadas a 92 *strings*. A área de captação solar é de aproximadamente 5613,8 m². A Usina FV em questão é apresentada na figura 4.

FIGURA 4 – FOTO DA USINA FOTOVOLTAICA BIOLÓGICAS UFPR



FONTE: Universidade Federal do Paraná (2020)

Os painéis estão orientados ao longo dos *carports* em formato semelhante a metade de um semicírculo, como explicitado na Figura 4. Os ângulos azimutais dos módulos ($\theta_{a,mod}$) variam entre 83° e 187° , assumindo o Sul Angular Azimutal também como 0° , e a inclinação dos módulos ($\theta_{i,mod}$) varia entre $1,9^\circ$ a 8° .

4.3 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE MONITORAMENTO

A estação meteorológica é a unidade responsável pela aquisição e monitoramento de dados relacionados aos aspectos meteorológicos da região de Curitiba onde os sistemas fotovoltaicos estão localizados, sendo ela encontrada dentro do departamento de Engenharia Elétrica da UFPR (DELT). Na estação, são reunidos instrumentos e sensores que farão as medições relacionadas a climatologia local, que serão de extrema relevância para continuidade do estudo de performance das plantas fotovoltaicas, obtendo informações como a temperatura, precipitação acumulada diária, irradiação solar, umidade do ar, pressão, velocidade e direção do vento.

Diante dos instrumentos da Estação Meteorológica, destaca-se a relevância do dispositivo chamado Piranômetro, que é responsável pelas medições de irradiação

solar incidente. Ela conta com dois destes dispositivos, onde um está orientado horizontalmente a 0° para leitura de irradiação solar horizontal, enquanto o outro dispositivo está orientado à inclinação de 15° e ângulo azimutal 0° , para leitura da irradiação solar no plano do módulo inclinado.

Os pirômetros instalados são do fabricante *Hukseflux*, modelo SR30, de sensores que satisfaz requisitos do sistema de monitoramento FV da classe A e B em conformidade IEC 61724-1 (2017), de especificações técnicas listadas na sequência pela Tabela 3. O dispositivo é apresentado na figura 5.

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PIRANÔMETRO HUKSEFLUX SR30

Parâmetro Técnico	Valor
Offset	$<2 \text{ W/m}^2$
Incerteza de Calibração	$<1,2\%$
Incerteza de Inclinação	$\pm 1^\circ$
Resolução de Irradiação	$0,05 \text{ W/m}^2$
Medição Máxima	4000 W/m^2
Classe	A
Tipo	Hemisférico
Tempo de Resposta	$< \pm 0.4 \%$

FONTE: Manual Hukseflux (2023)

FIGURA 5 – PIRANÔMETRO HUKSEFLUX SR30



FONTE: HukSeflux (2018)

Além dos dispositivos apresentados anteriormente, a estação meteorológica também conta com termômetros ambientes para sensoramento da temperatura local e pluviômetro para medição do nível das chuvas localizadas.

4.4 AQUISIÇÃO DE DADOS GERACIONAIS E METEOROLÓGICOS

O levantamento dos dados de geração/medição dos inversores, bem como dados climatológicos obtidos pela estação meteorológica pode ser efetuada diretamente por um banco de dados externo, desenvolvido no próprio departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná (DELT UFPR), de forma que o banco possui uma interface gráfica de visualização, que viabiliza exportar planilhas em arquivos de formato “.csv”. Na exportação, é possível selecionar a amostragem de tempo que se deseja selecionando o intervalo de aquisição destas informações, além do intervalo de visualização, com definição das datas de início e fim da coleta de dados.

5 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, será detalhada toda a especificação técnica do sistema e informações necessárias para sua implementação, incluindo o levantamento de variáveis de interesse (*Tageamento*), arquitetura de automação exemplo a ser proposta para o sistema de supervisão e esboço de desenvolvimento do sistema SCADA e seus elementos.

5.1 LEVANTAMENTO DE VARIÁVEIS DE INTERESSE

Este levantamento envolve a qualificação das variáveis do processo, para então quantificação total e dimensionamento do sistema, uma vez que o parâmetro quantitativo das variáveis monitoradas é de suma importância na especificação de um sistema SCADA. Este processo não se limita somente à coleta de dados, mas também de sua classificação conforme sua natureza, onde adotaremos a tipologia de variáveis: elétricas, ambientais, operacionais e de desempenho.

Dessa forma, podemos estruturar adequadamente o *tageamento* do SCADA e garantir que o sistema seja capaz de garantir diagnósticos mais completos, tanto em tempo real, quanto na análise histórica via relatórios.

5.1.1 VARIÁVEIS ELÉTRICAS

Serão a base para avaliação das medições de energia, especialmente para monitorar a saúde operacional, fluxo de potência, e anomalias de natureza elétrica; desde os módulos até o ponto de conexão com a rede. Serão considerados, neste caso, abordagens com elementos de campo, equipamento de potência, e ponto de conexão com a rede, em dados disponíveis para aquisição. Enunciando-as:

Tensão em corrente contínua por cada string: monitorada individualmente em todas as 12 strings da usina DELT e nas 92 strings da usina BIO.

Corrente em corrente contínua por cada string: igualmente medida em cada uma das strings de ambas as usinas.

Potência em corrente contínua por cada string: calculada a partir da multiplicação da tensão e corrente, permitindo avaliar a performance individual de cada conjunto.

Tensão em corrente contínua por cada rastreador do ponto de máxima potência (MPPT), monitorada em cada uma das 6 entradas MPPT do inversor da usina DELT e em cada uma das 72 entradas MPPT dos inversores da usina BIO.

Corrente em corrente contínua por cada MPPT, complementa o monitoramento do ponto de operação ótima dos módulos.

Potência em corrente contínua por cada MPPT, obtida em tempo real para avaliar perdas e desbalanceamentos.

Tensão em corrente alternada na saída do inversor, medida na saída de cada um dos inversores (um na usina DELT e seis na usina BIO).

Corrente em corrente alternada na saída do inversor, medida em cada inversor, permitindo verificar o equilíbrio trifásico.

Potência em corrente alternada na saída do inversor, variável de referência para avaliar a eficiência de conversão.

Energia acumulada no ponto de conexão com a rede (PCC), medição já adquirida por medidor dedicado e disponível para coleta.

Nesta etapa, portanto, são observadas ao todo 314 variáveis que serão necessárias no levantamento, levando em consideração todas as strings/MPPTs presentes nos sistemas.

5.1.2 VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Essas são as variáveis obtidas pela estação meteorológica instalada, e serão compartilhadas para consideração em ambas as plantas. Permitem estabelecer correlação das condições do ambiente com sua influência na produção energética, auxiliando no cálculo dos parâmetros de performance apresentados, que levam em consideração a irradiação medida, por exemplo. Enunciando-as:

Temperatura ambiente, influenciando diretamente no comportamento elétrico dos módulos.

Umidade relativa do ar e Pressão atmosférica, como variáveis de apoio, para avaliações meteorológicas secundárias.

Irradiação solar global horizontal, parâmetro de referência para quantificação da disponibilidade energética.

Irradiação solar no plano dos módulos, valor fundamental para os cálculos de produtividade e eficiência.

São observadas ao todo cinco variáveis.

5.1.3 VARIÁVEIS OPERACIONAIS

Estas são associadas ao estado funcional da usina e dos equipamentos de potência, sobretudo para monitoração de sua operação, e elaboração posterior de alarmes críticos do funcionamento do sistema. Enunciando-as:

Estado de operação de cada inversor (ligado/desligado/falha), variável qualitativa essencial para diagnóstico.

Número de falhas registradas por cada inversor, permite construir histórico de ocorrências.

Portanto, como estão dispostos 7 inversores no total, são observadas 14 variáveis operacionais, ao todo.

5.1.4 VARIÁVEIS DE DESEMPENHO

Estas serão fundamentais para diagnóstico da saúde operacional da planta, trazendo os 10 parâmetros de performance previamente apresentados: Produtividade de Arranjo (Y_a), Produtividade Final (Y_f), Produtividade de Referência (Y_r), Taxa de Performance (TP), Perdas Normalizadas de Captura do Arranjo (L_c), Perdas do Inversor (L_i), Eficiência de Arranjo (η_{PV}), Eficiência do Inversor (η_{INV}), Eficiência do Sistema (η_{SIS}), Fator de Capacidade de Utilização (FC).

Cada um dos 10 parâmetros será analisado em distintas abordagens: por usina (duas), por inversor (sete) e parâmetros globais do sistema (conjunto das duas usinas), totalizando 100 variáveis.

5.1.5 QUANTITATIVO TOTAL DAS VARIÁVEIS

A seguir, é apresentada tabela consolidada com todas as variáveis consideradas.

TABELA 2 – QUANTITATIVO CONSOLIDADO DE VARIÁVEIS MONITORADAS

Natureza	Usina DELT	Usina BIO	Ambientais	Globais	Total
Variáveis elétricas	36	278	–	–	314
Variáveis ambientais	–	–	5	–	5
Variáveis operacionais	2	12	–	–	14
Variáveis de desempenho	20	70	–	10	100
Total geral	58	360	5	10	433

FONTE: O autor (2025)

Dessa forma, temos 433 *tags* no total, contemplando todas as medições elétricas, ambientais, operacionais e de desempenho, que serão essenciais para estruturação do Sistema SCADA.

5.2 DEFINIÇÃO DE ARQUITETURA DE AUTOMAÇÃO

A etapa para definir arquitetura de rede de automação é fundamental para implementação do sistema de monitoramento às usinas, uma vez que estabelecerá a organização hierárquica entre as camadas de campo, controle, supervisão, e suas interações. A arquitetura pode ser descrita em diferentes camadas, seguindo modelos de referência consolidados, como o ISA-95, que orientam a integração entre processos físicos e sistemas de informação (ISA, 2010).

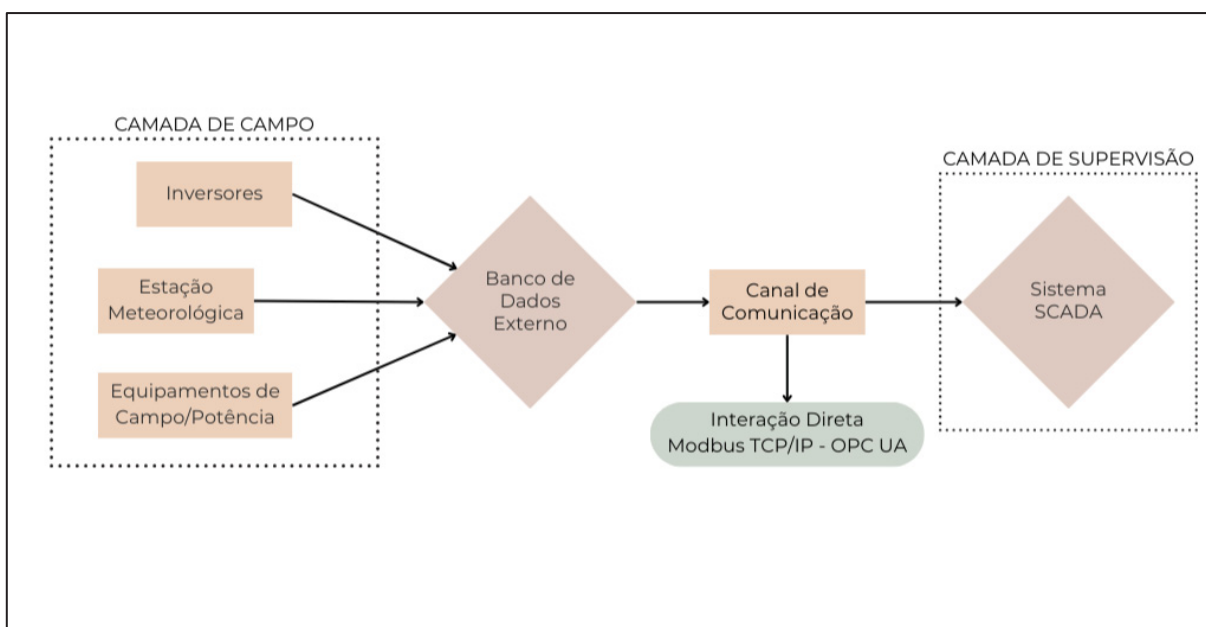
Levando em consideração que já existe um banco de dados externo, dedicado à aquisição dos dados provenientes dos equipamentos de campo, a topologia de comunicação entre eles e o sistema supervisor, pode ser a interação direta do

SCADA com o banco, via canal *Modbus TCP/IP* ou *OPC UA*, protocolos abertos, de amplo uso, e que garantem compatibilidade com os inversores já existentes, possibilitando ainda integrações futuras.

Essa abordagem possibilita comunicação de baixa latência e intermitência de dados entre os elementos de rede, visto o canal direto de interação. Isso assegura a escalabilidade e confiabilidade dos dados aqisitados.

Na sequência, é apresentado fluxograma esquemático, apresentando diagrama de arquitetura de rede de automação, utilizada para monitoramento das usinas.

FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DE ARQUITETURA DE REDE DE AUTOMAÇÃO



FONTE: O autor (2025)

5.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Por fim, tratamos especificamente dos elementos essenciais que compõe o sistema supervisório, e que serão base para garantir a visibilidade em tempo real, controle remoto e suporte à tomada de decisão, com uma análise qualificada do processo.

Serão abordados – e destacam-se, essencialmente – as seguintes funcionalidades presentes no SCADA: Telas de Supervisão (Sinóticos), Configuração

de Alarmes, e Registro Histórico/Amostragem de Dados. Estes conceitos serão explorados na sequência desta seção.

Segundo as normativas IEC 62682 e ISO 11064, para desenvolvimento eficiente do SCADA, é essencial considerar os elementos enunciados na sequência.

Hierarquia de visualização, telas gerais de supervisão e telas detalhadas por equipamento ou setor.

Integração de protocolos, Modbus, OPC UA e outros padrões industriais para comunicação confiável com CLPs e outros sistemas.

Gestão de alarmes, configuração de limites, priorização, temporização e registro histórico.

Históricos e trending, amostragem adequada, compressão de dados e visualização gráfica.

Segurança e acessos, controle de usuários, logs de operação e autenticação.

Interface intuitiva, uso de cores, ícones e animações discretas para facilitar leitura rápida.

5.3.1 TELAS DE SUPERVISÃO (SINÓTICOS)

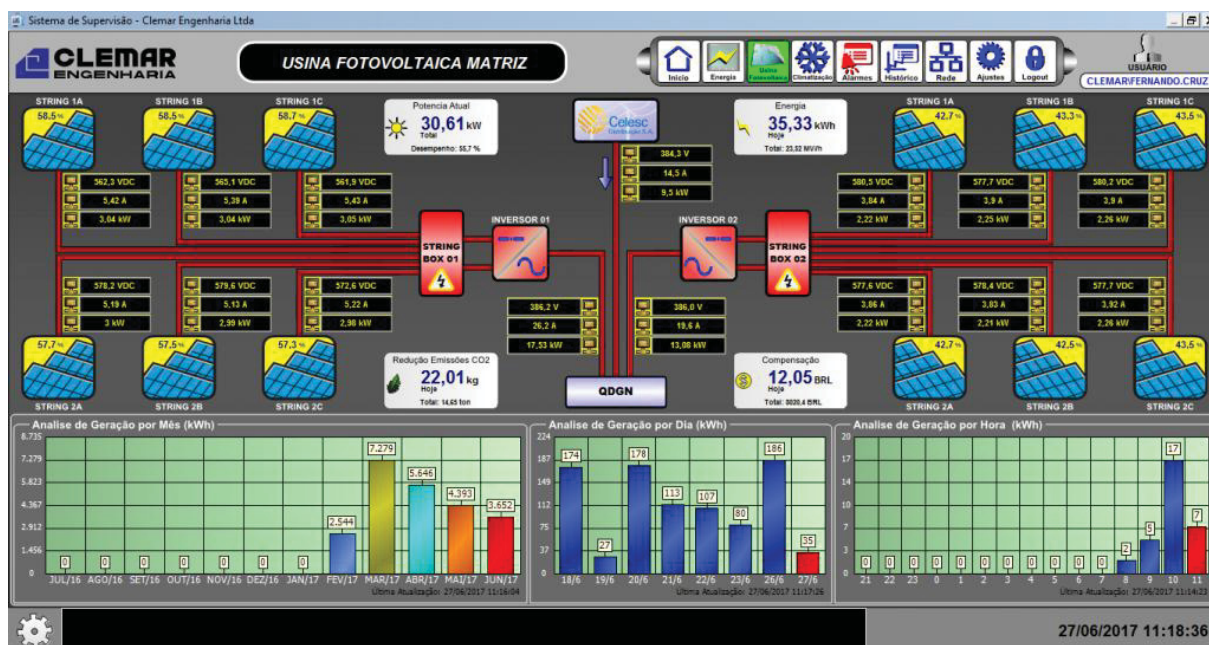
As telas de supervisão, também chamadas de sinóticos, devem representar o processo de forma intuitiva e objetiva, permitindo que o operador visualize rapidamente o estado de equipamentos, fluxos e variáveis críticas. Para o caso proposto neste trabalho, as telas também envolveriam a visualização em tempo real e histórico dos parâmetros de performance, realizando medições da saúde operacional dos sistemas.

A criação dessas telas deve seguir princípios de ergonomia visual, com cores padronizadas para indicar status (normal, alerta, falha) e elementos gráficos que reflitam fielmente o processo físico. O uso de indicadores analógicos e digitais, gráficos de tendência e animações discretas é recomendado para facilitar a interpretação, sem gerar distrações, ou desgaste ocular ao usuário.

A normativa que rege a Alta Performance Visual, pensando na ergonomia do usuário, trata-se da ISO 9241.

Na sequência, é apresentado exemplo de tela de sinótico com aplicação e presença mercadológica-comercial.

FIGURA 7 – EXEMPLO DE TELA DE SINÓTICO



FONTE: Clemar Engenharia - Elipse Software (2017)

5.3.2 CONFIGURAÇÃO DE ALARMES

Os alarmes no SCADA devem ser configurados com base em faixas de tolerância bem definidas, evitando notificações redundantes ou desnecessárias. Para isso, é fundamental estabelecer prioridades e categorias de alarmes (crítico, médio, baixo), seguindo recomendações das normas IEC 62682 e ISO 11064, que orientam boas práticas na gestão de alarmes. Cada alarme deve incluir informações de contexto, hora de ocorrência e ações corretivas sugeridas, de modo a permitir respostas rápidas e consistentes, e um histórico adequado.

Para proposta de projeto, é importante setar alarmes nas variáveis operacionais, que imediatamente alertarão sobre o estado de funcionamento, bem como limiares mínimos e máximos de operação sob as variáveis elétricas, a fim de encontrar uma regularidade de operação e identificar comportamentos anômalos.

5.3.3 REGISTRO HISTÓRICO/AMOSTRAGEM DE DADOS

O histórico de dados deve ser estruturado para permitir análises de desempenho, manutenção preditiva e até mesmo relatórios auditados. Recomenda-se a definição de taxa de amostragem adequada para cada variável, evitando excesso

de dados que comprometam armazenamento e processamento, bem como descarte programado de dados antigos.

Variáveis de processo com mudanças rápidas exigem amostragem mais frequente, como grandezas elétricas, especialmente em pontos de medição na rede; enquanto variáveis lentas podem ser registradas com intervalos maiores como parâmetros de performance global e as variáveis ambientais, por exemplo.

Segundo recomendação da normativa ISA-18.2, os históricos devem possibilitar visualização gráfica e tabular, permitindo comparar a produção entre diferentes setores da usina, identificar perdas ou falhas de equipamentos e avaliar a performance ao longo do tempo. A compressão e organização eficiente dos dados garantem que o sistema SCADA opere com agilidade mesmo em plantas com grande volume e tráfego de dados.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Dentro do contexto de automação e supervisão de usinas fotovoltaicas, especialmente no âmbito de sistemas *SCADA*, este trabalho pôde explorar diversos aspectos conceituais e práticos quanto a implementação de um sistema dedicado ao monitoramento, bem como aspectos técnicos para seu desenvolvimento, com base em normativas internacionais (IEC, ISA) bem definidas ao longo do documento.

A revisão bibliográfica proporcionou uma base teórica relevante para estruturar o trabalho, reunindo informações essenciais sobre supervisão, controle e automação de sistemas. Os trabalhos analisados evidenciaram a importância de soluções que integrem confiabilidade, disponibilidade e manutenção, permitindo compreender melhor como os elementos interagem diretamente no desempenho operacional das plantas.

Além disso, a literatura revisada destacou o papel das ferramentas e sistemas supervisórios na otimização de processos, que ofereceram inspiração para definir as diretrizes metodológicas do trabalho. Assim, o conjunto de referências consultadas auxiliou a nortear o raciocínio técnico, correlacionando fundamentos teóricos com a aplicação em projetos já existentes.

A temática explorada ao longo do trabalho, demonstra-se como uma solução eficaz, e torna-se cada vez mais difundida em projetos de energia. A definição adequada de sua especificação para supervisão operacional torna-se uma ferramenta estratégica para garantir maior disponibilidade, transparência, e controle sobre os próprios processos produtivos.

Segundo Stuzata (2023), foi possível observar a grande influência que características ambientais (temperatura do ar ambiente, precipitação acumulada, sombreamentos), estruturais (orientação geográfica dos painéis), temporais (desgaste ao longo do tempo) exercem sobre o desempenho dos sistemas. Estes também são significativamente impactados por fatores externos, a exemplo do acúmulo de impurezas e sujidades na superfície das placas; e desligamentos do sistema, que prejudicam o bom funcionamento das usinas, degradando a qualidade e a quantidade de energia gerada pelas usinas.

Um método como o proposto no trabalho, auxiliaria no processo de mitigação e mapeamento dessas inconformidades, uma vez que se projetam principalmente o

ganho de capacidade de detecção de falhas, redução no tempo de resposta a eventos anômalos e a melhoria na compreensão/análise das causas de redução de eficiência energética. A implantação de um sistema supervisor contribui diretamente para manutenção da saúde operacional e aumento da vida útil da planta, impactando positivamente tanto a operação cotidiana, quanto o planejamento estratégico das usinas.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Por se tratar de um plano orientativo de implementação de um sistema *SCADA*, futuros trabalhos podem explorar não só a integração parcial ou integral do proposto no trabalho, como também a prototipagem e validação do sistema, já traduzindo os dados reais em um ambiente de monitoração completa, ofertada por softwares disponíveis no mercado, incluindo oportunidades de adoção de técnicas de inteligência artificial para predição de falhas, modelos de manutenção preditiva, e análises econômicas sobre o processo.

Por fim, ressalta-se o potencial de expansão do trabalho a outras realidades, uma vez que as etapas seguidas podem ser aplicadas em outras usinas fotovoltaicas, seja da iniciativa pública ou privada, com participação ou influência da universidade.

8 REFERÊNCIAS

BRASIL. EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, “**BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023**”. DISPONÍVEL EM: <
<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf> >
 ACESSO EM: 10 abril 2023.

MELO, G. H. S. “**Implementação de sistema supervisório com SCADABR em usina de geração distribuída fotovoltaica**”. MEDIANEIRA, 2023. DISPONÍVEL EM:
 <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31737>>. ACESSO EM: 2 JULHO 2025.

PONTES, W. M. C. S. “**Implantação de Estação Solarimétrica e de Sistema Supervisório com Scadabr e Plataforma IoT em usina fotovoltaica na UNILAB-CE**” FORTALEZA, 2021. DISPONÍVEL EM:
 <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58064>>. ACESSO EM: 2 JULHO 2025.

MÜLLER, M. L. “**Sistema Supervisório e Aquisição de Dados de uma Usina de Geração Fotovoltaica**”. FLORIANÓPOLIS, 2017. DISPONÍVEL EM:
 <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197642>>. ACESSO EM 2 JULHO 2025.

SIQUEIRA, G.; HELENA, M.; PITTA, I.; ZAMBOTI, M.; FIGUEIREDO, G.; DIAS, D.; LOPES, Y. “**SISTEMA SCADA PARA EFICIÊNCIA EM USINAS FOTOVOLTAICAS DIGITALIZADAS BASEADAS EM IEC61850**”. RIO DE JANEIRO, 2024. DISPONÍVEL EM: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2524>>. ACESSO EM: 2 JULHO 2025.

MELO, G. H. S. “**Implementação de um sistema de controle supervisório e aquisição de dados para usinas de geração distribuída voltada à energia solar fotovoltaica**”. CAMPO MOURÃO, 2023. DISPONÍVEL EM:
 <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31737>>. ACESSO EM 2 JULHO 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 61850 – “Communication networks and systems for power utility automation”*. GENEBRA, 2013. DISPONÍVEL EM: <<https://webstore.iec.ch/en/publication/6007>>. ACESSO EM: 5 SETEMBRO 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC 62682:2022 – Management of alarm systems for the process industries**”. GENEBRA, 2022. DISPONÍVEL EM: <<https://webstore.iec.ch/en/publication/65543>>. ACESSO EM: 29 AGOSTO 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11064-1:2000 – Ergonomic design of control centres — Part 1: Principles for the design of control centres**. Genebra: ISO, 2000. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11064:-1:ed-1:v1:en> Acesso em: 29 ago. 2025.