

SISTEMA SCADA PARA EFICIÊNCIA EM USINAS FOTOVOLTAICAS DIGITALIZADAS BASEADAS EM IEC61850: PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO

Giovanna Siqueira - gcsiqueira@id.uff.br

Mayara Helena

Izabella Pitta

Marcio Zamboti

Gilberto Figueiredo

Daniel Dias

Yona Lopes

Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia - UFF, Niterói - RJ

4.4. Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

Resumo. O setor elétrico passa por transformações, tanto integrando usinas renováveis no contexto do aumento de geração de eletricidade quanto no processo de digitalização de sistemas de energia. No entanto, a aplicação de sistemas digitais em usinas carece de exploração, resultando em lacunas nas soluções e limitações na operabilidade dessas usinas. O monitoramento dos sistemas de energia empregado atualmente se limita a medidas de tensão e corrente e dados de proteção, negligenciando dados que podem ser obtidos, tais como, medições referentes à qualidade de energia, saúde dos equipamentos entre diversos parâmetros. Nesse contexto, o presente estudo propõe um sistema de monitoramento SCADA aplicado a uma usina FV baseado na Norma IEC 61850, visando monitorar para além dos pontos de medição e proteção, mas agregando a qualidade de energia e eficiência, preenchendo lacunas na coleta de dados.

Palavras-Chave: IEC 61850, SmartGrid, Gestão de Ativos

1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico tem passado por mudanças significativas no que tange a integração de usinas renováveis e a digitalização e automação do sistema. Apesar de ocorrerem simultaneamente, essas transformações não estão completamente interligadas. O que resulta em um mal aproveitamento das tecnologias existentes no setor.

A aplicação de sistemas digitais em usinas, de grande ou mini geração, ainda carece de exploração em termos de aplicações, modelos e descrições detalhadas na literatura. Essa lacuna resulta em limitações nas soluções potenciais para muitas usinas. Tal lacuna pode prejudicar na eficiência de análise de dados obtidos e previsões.

Contudo, destaca-se que o monitoramento dessas usinas não segue uma abordagem integral na coleta de dados. O acompanhamento dos dados provenientes de usinas FVs, por exemplo, se restringe predominantemente à análise da geração de eletricidade. Essa abordagem limitada resulta em uma lacuna crítica, ao negligenciar informações essenciais relacionadas à qualidade da energia produzida e à saúde dos equipamentos de campo.

Este trabalho visa analisar e implementar um estudo de caso de uma usina FV com a concepção de um *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Este sistema abrangerá não apenas os dados provenientes dos equipamentos de campo, mas também incluirá informações sobre a eficiência energética. O objetivo é monitorar a qualidade da energia gerada, atendendo aos padrões estabelecidos pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

O artigo está estruturado em mais quatro seções. A Seção 2 retrata estudos encontrados na literatura e descreve semelhanças e diferenças entre os trabalhos relacionados e este estudo. A Seção 3 contextualiza a teoria utilizada para desenvolvimento do estudo. É descrito a eficiência energética em usinas, relatando sobre distúrbios possíveis durante a geração de eletricidade, é elucidado o monitoramento da qualidade de energia e discorrido sobre

a norma *International Electrotechnical Commission (IEC) 61850*. Em seguida, a Seção 4 aborda o proposto pelo projeto, explicitando o protocolo de comunicação, as medidas elétricas, medidas de qualidade de energia, medidas meteorológicas, o perfil de potência e os relatórios propostos. A Seção 5 apresenta a implementação e resultados, mostrando a modelagem de dados, arquitetura e equipamentos utilizados e os resultados obtidos a partir dos testes. Enfim, a Seção 6 conclui o artigo e expõe as perspectivas de trabalhos futuros.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Através de análise da literatura, é notada a relevância da aquisição de dados em usinas. O monitoramento de dados de qualidade de energia e meteorológicos podem ser vistos na história da arte.

(Nejabatkhah *et al.*, 2019) traz uma visão geral do controle de qualidade de energia em micro-redes retratando a importância da qualidade da energia. Porém, não apresenta aplicação em um supervisor, carecendo de uma aplicação real do monitoramento de usina fotovoltaica. A pesquisa de (Abdulsalam *et al.*, 2022) propõe um SCADA para monitoramento de usinas FVs com o uso do protocolo Modbus. No entanto, não existe uma implementação e o uso do protocolo Modbus não oferece interoperabilidade ao estudo.

Segundo (Madeti and Singh, 2017) é apresentado um sistema de monitoramento de usinas FVs na sua concepção generalizada. A revisão apresenta blocos de medidas que devem ser obtidas, dados e cálculos que devem ser considerados. Apesar da revisão apresentar como deve ser instrumentado, monitorado e calculado, a revisão não apresenta o modelo de dados que pode ser usado para usinas digitalizadas proposto na Norma.

Já o ponto principal do artigo de (Elgargouri *et al.*, 2013) é apresentar um sistema de micro grade baseado na norma IEC 61850, que consiste em um sistema de monitoramento de micro grade, um conversor de protocolo que transforma dados seriais em dados IEC 61850 e controladores de recursos de energia distribuídos para diversos nós DER. O artigo também discute a importância dos protocolos de comunicação na operação bem-sucedida das redes elétricas e como a norma IEC 61850 pode resolver problemas de interoperabilidade na automação de serviços públicos de energia. No entanto, o artigo não apresenta um estudo de caso.

Já (Ustun *et al.*, 2019) apresenta abordagem alternativa para evitar a redução da geração de eletricidade solar FV, utilizando veículos elétricos como armazenamento para evitar problemas de sobretensão na rede elétrica. O artigo descreve um modelo de comunicação baseado em IEC 61850 para gerenciamento de carga e descarga de veículos elétricos, a fim de maximizar a geração de eletricidade solar FV em residências. (Aghenta and Iqbal, 2019) apresenta um SCADA com *Internet of Things (IoT)* demonstrando valores básicos de medição em tempo real com dispositivos *OpenSource*. Porém, não houve monitoramento da qualidade de energia.

(Rohmingtluanga *et al.*, 2023) apresenta um sistema SCADA para monitoramento da captação de água. O sistema SCADA faz uso de dados de qualidade de energia como potências reativa, aparente, fator de potência e frequência. O estudo conclui que o monitoramento em tempo real do sistema de captação, por meio do SCADA, resulta em melhorias significativas na eficiência geral e redução de custos operacionais. Entretanto, o estudo não apresenta um modelo para obtenção dos dados da planta, o uso de *Intelligent Electronic Devices (IEDs)*, protocolos normatizados e uma Interface Homem Máquina (IHM).

Apesar de haver um estudo na área de monitoramento de FVs segundo a Norma, o presente artigo visa contribuir por meio da implementação prática e estudo de caso envolvendo equipamentos de teste em bancada para a implementação de um sistema de monitoramento da geração e eficiência energética do sistema. Além disso, apresenta um modelo de dados segundo a Norma, implementado e funcional. Por fim, o estudo contribui com uma prova de conceito funcional com equipamentos de mercado desde *Intelligent Electronic Devices (IEDs)* até um supervisor SCADA sem o uso de protótipos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Eficiência Energética em Usinas

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é de suma importância para a garantia da vida útil e do adequado funcionamento dos aparelhos que compõem um sistema elétrico. No Brasil, o documento que indica métricas, procedimentos e padrões necessários para a avaliação da QEE em sistemas de distribuição de até 69 kV é o Módulo 8 do PRODIST segundo (ANEEL, 2017). Esse documento deve ser seguido por:

- Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- Centrais geradoras;
- Distribuidoras;

- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Os fenômenos tratados no documento da (ANEEL, 2017) são separados em fenômenos de regime permanente e transitório. Os de regime permanente são tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência. Já os fenômenos de longa duração é concentrado em variações de tensão em curta duração.

As grandezas elétricas avaliadas neste trabalho são: harmônicos, desequilíbrio de corrente, interrupção de tensão, fator de potência e, por fim, a variação de frequência. Todos os fenômenos avaliados nesse trabalho concentram-se em dados de regime permanente.

- **Harmônicos**

A introdução de harmônicos em redes de energia elétrica são fenômenos que causam distorções em formas de ondas de tensão e corrente. Um dos indicadores descritos na literatura é a distorção harmônica total (THD) sendo adotado em referências mundiais. Entretanto, esse parâmetro não é suficiente para quantificar a influência de harmônicos no sistema de acordo com (Teixeira, 2009). O segundo parâmetro é a distorção total de demanda (DTD) que quantifica a distorção harmônica de corrente em relação à corrente da carga. Por fim, outro parâmetro bem difundido é o fator K comumente usado para avaliação de conteúdo harmônico em cargas, principalmente em transformadores segundo (Ling and Eldridge, 2021). Seu objetivo é prevenir o sobreaquecimento do equipamento devido à presença de componentes harmônicas conforme (SEL, 2023). É importante notar que o fator K aqui avaliado é o indicador de presença harmônica na rede, o que é diferente do fator k especificado em transformadores de potência, que indica a capacidade térmica extra do equipamento. Esse ponto é abordado com mais detalhes na ANSI/IEEE C57.110.

Esse trabalho concentra-se na supervisão de harmônicos total na rede (THD) de tensão.

- **Desequilíbrio de corrente**

Apesar de não ser um tópico abordado em qualidade de energia, desequilíbrio de corrente pode acarretar uma circulação indevida na corrente de neutro, podendo prejudicar equipamentos. Desequilíbrio de tensões ou correntes são fenômenos que acontecem devido diferença de cargas ou assimetria da geração. Existem diversos fatores que podem levar o desequilíbrio de corrente em sistemas trifásicos equilibrados. Dentre várias possibilidades, podem ocorrer devido à componente de sequência nula, componente de sequência negativa ou até mesmo por um curto-circuito em concordância com (Correia and Bronzeado, 2001).

- **Interrupção de tensão**

O parâmetro de interrupção de tensão se encaixa tanto em indicador de qualidade de energia como também em indicador de continuidade de serviço em conformidade com (ANEEL, 2017) podendo ser classificada em interrupção temporária (ITT) ou momentânea (IMT) para curta duração.

- **Fator de Potência**

O fator de potência (FP) mede a quantidade de energia consumida que é efetivamente convertida em trabalho útil, indicando a eficiência do uso da energia. Ou seja, o FP é um parâmetro que mostra a eficiência com que a energia transmitida é convertida em trabalho útil e deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa (P) e reativa (Q). (ANEEL, 2017) estabelece que, para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o FP no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo.

- **Variação da Frequência**

Segundo (Dugan and Granaghan, 2004), variações de frequência são definidas como o desvio da frequência fundamental do sistema a partir do valor nominal especificado (50 ou 60 Hz, por exemplo). A frequência do sistema está diretamente relacionada à velocidade rotacional dos geradores que alimentam a rede elétrica e pequenas variações no seu valor instantâneo podem ser observadas durante a busca do equilíbrio dinâmico entre carga e geração. A taxa de variação da frequência e sua duração dependem das características da carga e do tempo de resposta dos sistemas de controle de geração às variações de carga.

3.2 IEC 61850

A Norma IEC 61850 de (IEC, 2010) estabelece um modelo padronizado para automação de sistemas de energia, promovendo a interoperabilidade entre equipamentos de diversos fornecedores. Seu modelo expansível e orientado a objetos abrange requisitos de comunicação, descrição de linguagem e testes de conformidade. A norma define protocolos como *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE), *Sampled Values* (SV) e *Manufacturing Message Specification* (MMS).

O protocolo GOOSE permite a transmissão rápida de mensagens com tempo restrito, usado amplamente para serviços de proteção. O SV é utilizado para enviar amostras digitais de tensão e corrente. Já o protocolo MMS possibilita a comunicação em tempo real dos dados com o sistema de supervisão e controle.

A norma IEC 61850 adota um modelo hierárquico de orientação a objetos, onde os dispositivos físicos possuem endereços de rede fixos, sendo compostos por *Logical Device* (LD) e *Logical Node* (LN). Os LNs representam as funções ou equipamentos dos dispositivos físicos, enviando dados através do protocolo MMS para sistemas de supervisão e controle.

Além disso, a norma estabelece requisitos de controle e monitoramento para avaliar a qualidade da energia. Em relação ao sistema de monitoramento, a Norma propõe índices de qualidade de energia, eventos como relatórios de distúrbios na rede, informações sobre equipamentos e processos sensíveis à rede, além de dados necessários para determinar a necessidade de reforço ou reconstrução da rede de abastecimento, entre outros aspectos relevantes.

Para alcançar esses objetivos, é adotada uma modelagem de nós lógicos específicos para a realização das medidas.

4. PROPOSTA

O sistema de monitoramento proposto neste trabalho abrange duas implementações distintas, uma voltada para o SCADA local e outra para o SCADA remoto, implementada por meio de um sistema web. Ambos os sistemas são espelhos, ou seja, as informações obtidas no sistema local são refletidas no monitoramento remoto.

O sistema é dividido em cinco módulos distintos. O primeiro módulo destina-se à aquisição de medidas elétricas, enquanto o segundo é dedicado à coleta de dados meteorológicos. O terceiro módulo concentra-se na obtenção de medidas relacionadas à qualidade de energia. O quarto módulo apresenta dados gráficos do perfil de carga da usina e, por fim, o quinto módulo é destinado à geração de relatórios.

Todos esses módulos implementados no supervisório obtêm os dados dos equipamentos via protocolo MMS por meio de um barramento de comunicação. A proposta de um modelo de usina digitalizada seguindo as descrições da Norma, os dispositivos de aquisição de dados e comunicação devem atender aos requisitos estabelecidos na mesma. A arquitetura detalhada pode ser visualizada na Fig. 1.

Cada módulo descrito possui atributos normatizados. Dessa forma, as seções seguintes descrevem as funções e os atributos mapeados para o framework desta proposta.

4.1 Medidas elétricas

O módulo de medidas elétricas abarca informações de cada fase da usina. Os parâmetros apresentados neste módulo incluem: tensão (V), corrente (A), fator de potência, potência ativa, potência reativa e frequência. Para a aquisição desses dados por meio do protocolo MMS, conforme descrito na norma IEC 61850, é necessário a obtenção dos nós lógicos relacionados às medidas elétricas. A Tab. 2 descreve os nós lógicos necessários com seus respectivos atributos:

4.2 Medidas de Qualidade de Energia

O módulo de qualidade de energia fornece informações sobre o desequilíbrio de corrente, distorção harmônica por fase, interrupção de tensão, e fator de potência da usina. Além disso, inclui um sistema de alarme para detectar e sinalizar situações de sobrecorrente. A Tab. 2 descreve os nós lógicos necessários com seus respectivos atributos:

4.3 Medidas Meteorológicas

Os dados fornecidos pelo módulo de medidas meteorológicas são a respeito da temperatura ambiente, umidade, radiação solar, direção, velocidade do vento, pressão e pluviosidade. A Tab. 3 refere-se ao nó lógico de medições meteorológicas mostrando os dados utilizados no estudo.

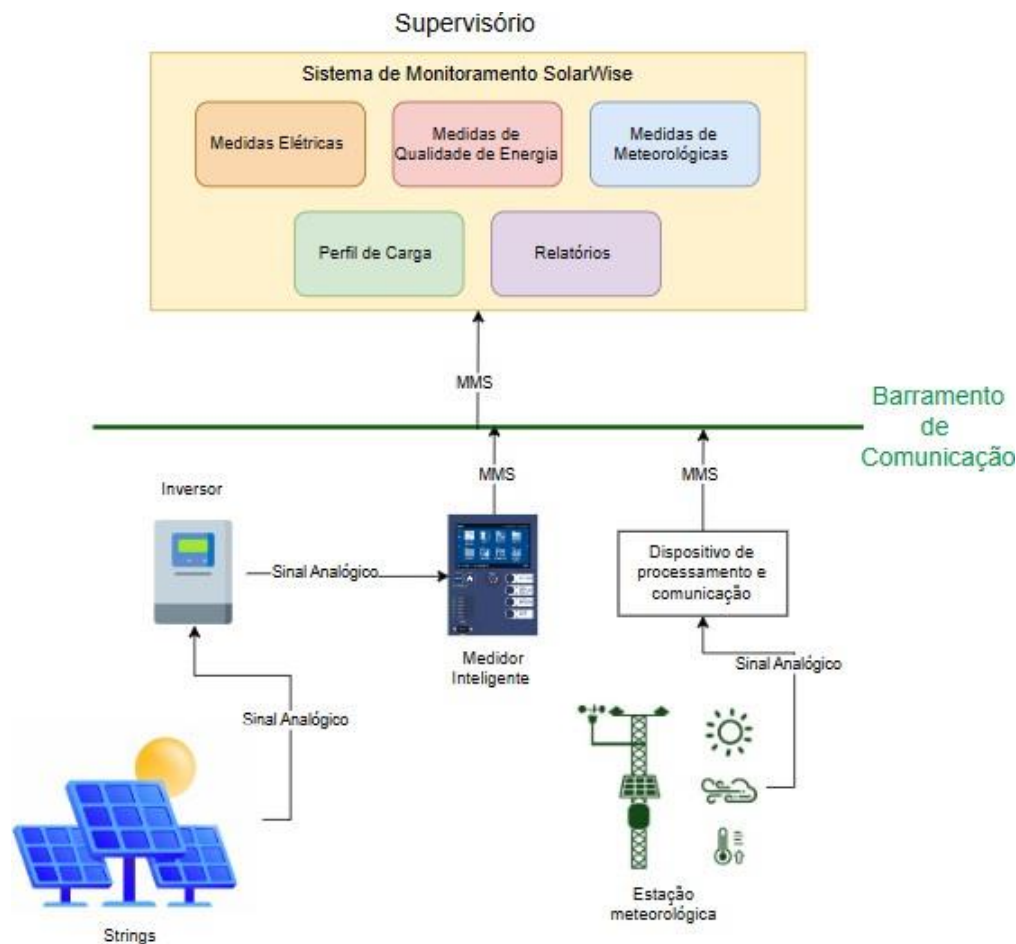


Figura 1: Arquitetura da usina FV

4.4 Perfil de potência

O perfil de potência é representado graficamente como a variação da potência ao longo do tempo. Esse dado é monitorado com o atributo da potência trifásica no campo de dados elétricos já descritos no módulo de medidas elétricas. O modelo de monitoramento permite que esse dado possa ser obtido para análise de três formas distintas: diariamente, semanalmente e por fim, mensalmente.

O Objetivo desse módulo é poder contribuir para a avaliação de picos e vales conforme a demanda de energia e a intermitência do fornecimento de energia dada as condições climáticas.

5. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Essa seção apresenta o modelo de implementação para o SCADA local. O supervisório realizado visa mostrar dados mais específicos para ser possível analisar a qualidade da energia gerada. Para isso, foram injetadas no IED por meio da mala de teste Omicron CMC 356 valores de tensão e corrente. O supervisório desenvolvido integra-se com o IED e apresenta duas situações implementadas. A primeira é referente ao funcionamento da usina FV em regime permanente e o segundo cenário demonstra as possíveis anomalias tal como variação de frequência, desequilíbrio de corrente, harmônicos e interrupção de tensão.

5.1 Modelagem de dados

Para obter os dados necessários para avaliar a qualidade da geração de eletricidade foram obtidos os nós lógicos da norma IEC 61850 que podem ser visualizados na Tab. 4

Tabela 1: Grupos de nós lógicos módulo medidas elétricas

Função	Logical Node	Dado	Descrição
Medidas elétricas			
Medição AC	MMXU	TotW	Total potência Ativa
		TotVAr	Total potência Reativa
		TotVA	Total potência Aparente
		TotPF	Total potência Fator de Potência
		Hz	Frequência
		A	Corrente de fase
Medição DC	MMDC	Watt	Potência
		Amp	Corrente
		Vol	Tensão

Tabela 2: Grupos de nós lógicos módulo de medidas de qualidade de energia

Função	Logical Node	Dado	Descrição
Medição Harmônicos	MHAI	HA	Sequência de Harmônicos ou Interharmônicos corrente
Sequência e desequilíbrio	MSQI	ImbNgA	Desequilíbrio de sequência negativa da corrente

Tabela 3: Grupos de nós lógicos módulo de medidas meteorológicas

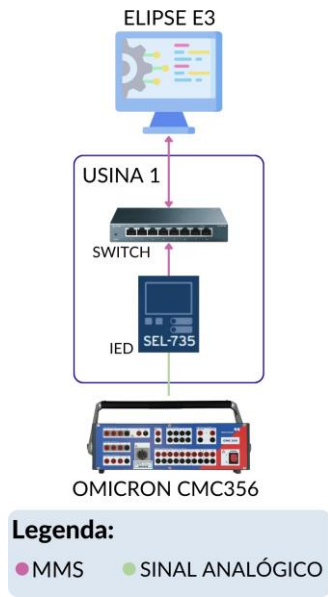
Função	Nó Lógico	Dado	Descrição
Medidas Meteorológicas			
Informação Meteorológica	MMET	EnvTmp	Temperatura ambiente
		EnvHum	Umidade
		DffInsol	Radiação solar difusa
		DctInsol	Radiação solar direta
		DI Dur	Duração de luz solar
		HorInsol	Radiação solar horizontal total
		HorWdDir	Direção horizontal do vento
		HorWdSpd	Velocidade horizontal do vento
		VerWdDir	Direção vertical do vento
		VerWdSpd	Velocidade vertical do vento
		EnvPres	Pressão
		RnFll	Pluviosidade

Tabela 4: Nós lógicos utilizados no estudo.

Nó Lógico	Descrição
MMXU	Dados de medições trifásicas
MHAI	Harmônicos e inter-harmônicos
MSQI	Sequência e desequilíbrio
GGIO	Processo genérico de entrada/saída

5.2 Arquitetura de *Lestbed*

Os testes foram realizados com a arquitetura mostrada na Fig. 2(a). Portanto, um computador com o Software Elipse E3 de acordo com (Elipse Software, 2023), representado no retângulo verde na Fig. 2(b) onde foi desenvolvido o supervisor. O SCADA se comunicou com o IED por meio do protocolo MMS. O IED *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) 735, representado no retângulo amarelo na Fig. 2(b), foi utilizado como dispositivo eletrônico inteligente com medição de qualidade de energia. Além da conexão com o supervisor, o SEL 735 estava conectado por sinal analógico com a mala de testes Omicron CMC356, representada no retângulo vermelho na Fig. 2(b). A mala de testes atuou injetando valores de tensão e corrente no IED.



(a) Arquitetura

(b) Equipamentos utilizados

Figura 2: Testbed aplicado no estudo de caso

5.3 Mala de testes - OMICRON CMC356

A realização dos dois casos da usina FV foram parametrizados em dois programas da Omicron englobados no Test Universe 4.20 da (Omicron Energy, 2023b). O primeiro foi o State Sequencer desenvolvido pela (Omicron Energy 2023a) onde foi desenvolvido o cenário de regime permanente da usina. Os valores foram estipulados próximos ao nominal da Usina FV de Iguaba, na Fig. 3 estão separados em 4 estados colocados em *loop* para aproximação ao caso real de uma usina.

	1		2		3		4	
Nome	Estado 1		Estado 2		Estado 3		Estado 4	
V L1-E	13,80 V	0,00 °	13,80 V	0,00 °	13,80 V	0,00 °	13,80 V	0,00 °
V L2-E	13,80 V	-120,00 °	13,80 V	-120,00 °	13,80 V	-120,00 °	13,80 V	-120,00 °
V L3-E	13,80 V	120,00 °	13,80 V	120,00 °	13,80 V	120,00 °	13,80 V	120,00 °
I L1	3,620 A	0,00 °	3,580 A	0,00 °	3,550 A	0,00 °	3,520 A	0,00 °
I L2	3,620 A	-120,00 °	3,580 A	-120,00 °	3,550 A	-120,00 °	3,520 A	-120,00 °
I L3	3,620 A	120,00 °	3,580 A	120,00 °	3,550 A	120,00 °	3,520 A	120,00 °
V(2)-1	66,40 V	0,00 °	66,40 V	0,00 °	66,40 V	0,00 °	66,40 V	0,00 °
V(2)-2	66,40 V	-120,00 °	66,40 V	-120,00 °	66,40 V	-120,00 °	66,40 V	-120,00 °
V(2)-3	66,40 V	120,00 °	66,40 V	120,00 °	66,40 V	120,00 °	66,40 V	120,00 °
I(2)-1	5,000 A	0,00 °	5,000 A	0,00 °	5,000 A	0,00 °	5,000 A	0,00 °
I(2)-2	5,000 A	-120,00 °	5,000 A	-120,00 °	5,000 A	-120,00 °	5,000 A	-120,00 °
I(2)-3	5,000 A	120,00 °	5,000 A	120,00 °	5,000 A	120,00 °	5,000 A	120,00 °
CMC Rel	0 output(s) active		0 output(s) active		0 output(s) active		0 output(s) active	
Trigger		2,500 s		2,500 s		2,500 s		2,500 s

Figura 3: Valores de tensão e corrente injetados pela mala

O outro *software* utilizado foi o PQ Signal Generator que possibilita a realização de ensaios referentes a qualidade de energia. O ensaio foi separado em quatro estados com duração de 5 segundos. Conforme é possível visualizar na Fig. 4, o primeiro estado ocorre a variação de corrente para 59,4 Hz; o segundo ocorre uma interrupção de tensão; o terceiro adiciona um harmônico de terceira ordem com magnitude de 12 V e 36° na fase A. O quarto apesar de estar com o nome de magnitude de tensão foi o ensaio referente ao de desequilíbrio de corrente em que em cada fase foram injetados valores diferentes de corrente (3,62 A, 3,00 A e 3,85 A).

Nome	Tipo
1 Frequência 1	Frequência
2 Interrupção de Tensão 1	Interrupção de Tensão
3 Harmônicas 1	Harmônicas
4 Magnitude de Tensão 1	Magnitude de Tensão
	<Selecionar o tipo de estado>

Figura 4: Estados do teste no PQ Signal Generator

5.4 IED SEL 735

Visto que os valores nominais injetados pela mala foram 13,8V e 3,62A para tensão e corrente, respectivamente, o IED foi parametrizada no *software* Software acSEerator QuickSet alterando a relação de transformação para a tensão multiplicando os valores por 1000 e a relação de transformação de corrente com os valores multiplicados por 10. Outra alteração feita foi para que os *PushButtons* ao serem pressionados ascendessem um LED (*Light Emitting Diode*) e que no caso de dois botões pressionados, outro LED fosse aceso.

5.5 SCADA Local - Elipse E3

No SCADA local os atributos pegos pela norma IEC 61850 são observados na Tab. 5

Tabela 5: Atributos utilizados no estudo de caso

Atributo	Função
MHAI.MX.ThdA.phsA.instCVal.mag.f	Distorção harmônica total da corrente da fase A
MHAI.MX.ThdA.phsB.instCVal.mag.f	Distorção harmônica total da corrente da fase B
MHAI.MX.ThdA.phsC.instCVal.mag.f	Distorção harmônica total da corrente da fase C
MSQI.MX.ImbNgA.instmag.f	Modelo do dispositivo físico
GGIO.ST.Ind07.stVal	LED 7 do painel frontal do IED
MMXU.MX.Hz.instMag.f	Frequência
MMXU.MX.PhV.phsA.instCVal.mag.f	Tensão da fase A
MMXU.MX.PhV.phsB.instCVal.mag.f	Tensão da fase B
MMXU.MX.PhV.phsC.instCVal.mag.f	Tensão da fase C
MMXU.MX.A.phsA.instCVal.mag.f	Corrente na fase A
MMXU.MX.A.phsB.instCVal.mag.f	Corrente na fase B
MMXU.MX.A.phsC.instCVal.mag.f	Corrente na fase C
MMXU.MX.W.phsA.instCVal.mag.f	Potência ativa na fase A
MMXU.MX.W.phsB.instCVal.mag.f	Potência ativa na fase B
MMXU.MX.W.phsC.instCVal.mag.f	Potência ativa na fase C
MMXU.MX.TotW.instMag.f	Potência ativa Total
MMXU.MX.PF.phsA.instCVal.mag.f	Fator de Potência

Os LEDs foram utilizados devido ao laboratório realizado para o estudo de caso não apresentar sensores para obtenção de dados meteorológicos.

O primeiro cenário ensaiado mostrado na Fig. 5 apresenta os valores nominais da Usina FV de Iguaba, no retângulo verde são mostrados os dados de tensão, corrente e potência ativa nas três fases e também a frequência. Em vermelho está o gráfico mostrando os valores da potência ativa total dos últimos 5 minutos medidos. Em amarelo estão os dados de qualidade de energia, como o fator de potência, desequilíbrio de corrente e distorção harmônica total das três fases. Em rosa, estão os dados meteorológicos de temperatura ambiente, nível de chuva, radiação solar, umidade e velocidade do vento.

O outro cenário ensaiado pode ser visualizado no link a seguir <https://youtu.be/56y2rs9Nz1U>. No vídeo a tela do supervisor e do IED estão sincronizadas. Na tela do IED está disposto um gráfico da tensão e da corrente da fase A ao longo do tempo. O cenário consiste em quatro testes de qualidade de energia e um que mostra as atribuições dos *pushbuttons* com os dados meteorológicos.

O primeiro teste demonstra a variação da frequência com o valor mínimo mostrado de 59,4 Hz. Ao mostrar a interrupção de tensão, as tensões das 3 fases ficam zeradas e o gráfico do IED mostra apenas o ruído lido da



Figura 5: Supervisório da usina em funcionamento

malha de testes. O teste dos harmônicos aparecem na coluna de qualidade de energia que se observa a variação da distorção harmônica total nas três fases. O desequilíbrio de corrente chega ao valor de 7,26 e verificam-se as correntes diferentes entre as fases no bloco de corrente. O último teste mostra que ao apertar o primeiro botão o valor da temperatura ambiente varia de 21°C para 27°C e os demais *pushbottons* alteram os demais dados meteorológicos.

6. CONCLUSÃO

Este artigo proporcionou a implementação de um sistema de monitoramento baseado na norma IEC 61850 em uma usina FV simulada. A automação efetiva permitiu o acompanhamento de parâmetros, como tensão, corrente, potência ativa, e monitoramento de qualidade de energia.

Como vantagem, o estudo apresenta a modelagem de dados conforme a norma IEC 61850 que se revelou não apenas tecnicamente viável, mas também altamente benéfica para diversos setores do sistema elétrico, especialmente em usinas FVs, dada a possibilidade de interoperabilidade, escalabilidade e padronização dos parâmetros obtidos. Portanto, a proposta deste artigo não só destaca a aplicação integral da norma IEC 61850, mas também demonstra a viabilidade e eficiência dessa abordagem em usinas FVs.

Outro ponto a destacar é que a implementação de um modelo de dados normalizados possibilita aplicações mais complexas como o uso de inteligência artificial, dado que o modelo de dados para treinamento da IA é bem descrito. Em contraponto, a prova de conceito apresentada traz consigo uma série de conceitos e boas práticas que devem ser consideradas para implementação. Nesse contexto, esse modelo de supervisão exige mão de obra qualificada não apenas em conceitos de energia como também conceitos de telecomunicações.

REFERÊNCIAS

- Abdulsalam, Abdulsalalm Bouaisha and Alsaadi, Hajir Adil Jasim and Hamodat, Zaid (2022). Control and management of solar pv grid using scada system. In 2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), pages 1–5.
- Aghenta, Lawrence O. and Iqbal, M. Tariq (2019). Development of an iot based open source scada system for pv system monitoring. In 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE), pages 1–4.
- ANEEL (2017). Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.
- Correia, Fidélis Botelho and Bronzeado, Herivelto de Souza (2001). Fator de desequilíbrio em sistemas trifásicos. IV SBQEE-Agosto de.

- Elgargouri, Ahmed and Elfituri, Mohamed M and Elmusrati, Mohammed (2013). Iec 61850 and smart grids. In 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, pages 1–6. IEEE. Elipse Software (2023). Elipse e3 studio.
- IEC (2010). IEC 61850-7-2:2010: Communication networks and systems in substations – part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment – abstract communication service interface.
- Ling, Philip JA and Eldridge, Cyril J (2021). K-factor can be a misleading power quality indicator.
- Madeti, Siva Ramakrishna and Singh, SN (2017). Monitoring system for photovoltaic plants: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67:1180–1207.
- Nejabatkhah, Farzam and Li, Yun Wei and Tian, Hao (2019). Power quality control of smart hybrid ac/dc microgrids: An overview. IEEE Access, 7:52295–52318.
- Omicron Energy (2023a). State sequencer. Omicron Energy (2023b). Test universe.
- Roger C. Dugan and Mark F. Mac Granaghan (2004). Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill.
- Rohmingtluanga, C and Datta, Subir and Sinha, Nidul and Ustun, Taha Selim (2023). Scada based intake monitoring for improving energy management plan: Case study. Energy Reports, 9:402–410.
- SEL (2023). Sel-735 power quality and revenue meter - instruction manual. <https://selinc.com/api/download/97801/>.
- Teixeira, Douglas Ângelo (2009). Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial.
- Ustun, Taha Selim and Hussain, S. M. Suhail and Kikusato, Hiroshi (2019). Iec 61850-based communication modeling of ev charge-discharge management for maximum pv generation. IEEE Access, 7:4219–4231.

SCADA SYSTEM FOR EFFICIENCY IN DIGITALIZED PHOTOVOLTAIC PLANTS BASED ON IEC 61850: PROPOSAL AND IMPLEMENTATION

Abstract. *The electrical sector is undergoing transformations, both by integrating renewable plants in the context of increased electrical energy generation and in the process of digitalization of energy systems. However, the application of digital systems in power plants lacks exploration, resulting in gaps in solutions and limitations in the operability of these plants. The monitoring of energy systems currently used is limited to voltage and current measurements and protection data, neglecting data that can be obtained, such as measurements relating to energy quality, equipment health and various parameters. In this context, the present study proposes a SCADA monitoring system applied to a PV plant based on the IEC 61850 Standard, aiming to monitor beyond measurement and protection points, but adding energy quality and efficiency, filling gaps in data collection.*

Keywords: *Asset Management, IEC 61850, SmartGrid*