



**ANÁLISE DAS PERDAS ELÉTRICAS E EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE UMA USINA
SOLAR FOTOVOLTAICA DE MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA
ANALYSIS OF ELECTRICAL LOSSES AND OPERATIONAL EFFICIENCY OF A
DISTRIBUTED GENERATION SOLAR PHOTOVOLTAIC PLANT**

Autores: Gilmar da Cunha Valangelis Júnior ¹, Bartolomeu Ferreira dos Santos Júnior ², Aryfrance Rocha Almeida ³

¹ Universidade Federal do Piauí (UFPI), – gilmar.junior@ufpi.edu.br; bartolomeuf@ufpi.edu.br; aryfrance@ufpi.edu.br;

RESUMO

Este estudo analisou o desempenho de uma usina fotovoltaica de 154 kWp instalada em São Raimundo Nonato, Piauí. A investigação foi conduzida por meio de pesquisas bibliográficas, normas técnicas, levantamentos de campo e simulações no *software PVsyst*, o que possibilitou identificar falhas de projeto e instalação responsáveis por perdas de até 40% na eficiência do sistema. Conclui-se que o monitoramento contínuo, aliado à adoção de boas práticas de engenharia, é fundamental para assegurar eficiência, confiabilidade e segurança no desenvolvimento e execução de projetos.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Microgeração Distribuída; Minigeração Distribuída; Projetos Fotovoltaicos.

ABSTRACT

This study analyzed the performance of a 154 kWp photovoltaic plant installed in São Raimundo Nonato, Piauí. The investigation was conducted through bibliographic research, technical standards, field surveys, and simulations using the *PVsyst* software, which made it possible to identify design and installation flaws responsible for efficiency losses of up to 40%. It is concluded that continuous monitoring, combined with the adoption of good engineering practices, is essential to ensure efficiency, reliability, and safety in the development and execution of projects.

Keywords: Energy Efficiency; Distributed Microgeneration; Distributed Minigeneration; Photovoltaic Projects.

1 INTRODUÇÃO

A busca contínua por fontes de energia sustentáveis e eficientes tem destacado as usinas solares fotovoltaicas como protagonistas no cenário energético contemporâneo. No entanto, a eficiência desses sistemas pode ser influenciada por perdas ópticas, térmicas, elétricas e de sombreamento (GREEN, 1982; PINHO; GALDINO, 2014).

Neste contexto, este artigo propõe uma análise técnica das perdas elétricas em uma usina solar fotovoltaica de 154 kWp instalada na cidade de São Raimundo Nonato do Piauí. A investigação abordará aspectos cruciais do desempenho e eficiência do sistema solar fotovoltaico *on-grid*, utilizando as diretrizes da ABNT NBR 16274 para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.

O estudo tem como objetivo contribuir para a implementação de fontes renováveis no setor energético, oferecendo material de apoio para técnicos de engenharia, acadêmicos e entusiastas interessados em compreender os cuidados necessários na construção de micro e miniusinas solares. A proposta é fornecer uma base sólida para otimizar o desempenho das usinas solares fotovoltaicas, minimizando perdas e maximizando a produção de energia limpa.



2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi baseada em pesquisas bibliográficas, normas técnicas e levantamentos de campo, com o objetivo de identificar os principais fatores responsáveis pelas perdas de desempenho no sistema fotovoltaico estudado.

Foi realizada uma visita técnica ao local com o objetivo de coletar dados essenciais sobre a instalação, como o tipo de cabeamento utilizado, as condições de sombreamento, a orientação e a inclinação dos módulos (*layouts*), além das medições de tensão e corrente da rede e a distância entre o cabeamento de corrente alternada (CA) e o ponto de conexão comum (PCC). Esses fatores são fundamentais para o desempenho do sistema. Durante a visita, também foram coletadas informações cruciais, como a marca dos inversores e a condição dos dispositivos de proteção. Esses dados serviram para a elaboração do laudo de desempenho técnico e para a análise dos riscos presentes na usina.

Além disso, foi realizado um estudo detalhado do desempenho da usina solar fotovoltaica, levando em consideração tanto o projeto inicial quanto as condições de instalação. A análise foi conduzida utilizando o *PVsyst*, *software* especializado na avaliação de sistemas fotovoltaicos.

2.1. Dados do Projeto

Os dados do projeto foram inseridos no *PVsyst*, assim, informações importantes da usina, como localização geográfica (latitude, longitude e altitude), potência do sistema, número de módulos, orientação dos painéis, modelo de painel, modelo de inversor e dados das condições de instalação foram devidamente incluídas no aplicativo, a Figura 1 mostra os dados da usina. Essa abordagem permitiu a realização eficiente da análise, considerando todos os parâmetros relevantes para o desempenho do sistema.

Figura 1. Dados da usina fotovoltaica.

Resumo do projeto				
Localização geográfica São Raimundo Nonato,PI Brasil	Localização	Parâmetros projeto		
	Latitude	-9.03 °S	Albedo	0.20
	Longitude	-42.69 °W		
	Altitude	387 m		
	Fuso horário	UTC-3		
Dados meteorológicos				
São Raimundo Nonato,PI				
Meteonorm 8.0 (2009-2017), Sat=100% - Sintético				

Resumo do sistema			
Sistema acoplado à rede		Fiadas num edifício	
Simulação para o ano n° 10			
Orientação do plano dos módulos		Sombras próximas	
Planos fixos		Sombras lineares	
2 orientações			
Inclin/azimutes		Exigências do consumidor	
12 / -170 °		Carga ilimitada (rede)	
12 / 10 °			
Informação do sistema			
Grupo FV			
Número de módulos	459 unidades	Inversores	2 unidades
Pnom total	154 kWp	Número de unidades	
		Pnom total	120 kWca
		Rácio Pnom	1.281



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Durante a execução do projeto da usina estudada, foram observados que diversos aspectos importantes foram negligenciados, destacando-se as perdas por sombreamento, queda de tensão e a falta de conformidade com as boas práticas de segurança, comprometendo a proteção das pessoas próximas ao local.

Após a análise de desempenho realizada pelo PVsyst, junto aos dados do laudo de inspeção visual, houve a elaboração de um novo projeto para corrigir os erros apresentados no decorrer deste trabalho. Para simplificar a compreensão do estudo, será apresentado a simulação 3D da instalação dos módulos e os gráficos de desempenho geral que engloba o resultado total de todas as condições de instalação, climáticas e estrutural.

2.2. Dados da instalação

A Figura 2 detalha as características dos módulos, incluindo informações sobre sua interligação, a quantidade de painéis em cada *string* (conjunto de painéis ligados em série) e a especificação dos *Maximum Power Point Trackers* (MPPT) aos quais estão conectados. Além disso, são apresentados os dados técnicos dos inversores, oferecendo uma visão abrangente tanto do arranjo dos módulos quanto das especificações dos inversores. Vale ressaltar que as informações utilizadas foram extraídas dos *datasheets* dos equipamentos instalados, garantindo maior precisão aos resultados obtidos.

Figura 2. Características do grupo fotovoltaico.

Características do grupo FV			
Módulo FV		Inversor	
Fabricante	BYD	Fabricante	PHB
Modelo	BYD-335-PHK-36	Modelo	PHB60K-MT
(Base de dados original do PVsyst)		(Parâmetros definidos pelo utilizador)	
Potência unitária	335 Wp	Potência unitária	60.0 kWca
Número de módulos FV	459 unidades	Número de inversores	2 unidades
Nominal (STC)	154 kWp	Potência total	120 kWca
Grupo #1 - INVERSOR 1 - 12 strings			
Orientação	#1		
Inclinação/Azimuth	12/-170 °		
Número de módulos FV	228 unidades	Número de inversores	4 * MPPT 25% 1 units
Nominal (STC)	76.4 kWp	Potência total	60.0 kWca
Módulos	12 Strings x 19 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	200-850 V
Pmpp	69.7 kWp	Potência máx. (≈25°C)	63.4 kWca
Umpp	654 V	Rácio Pnom (DC/AC)	1.27
I mpp	107 A		
Grupo #2 - INVERSOR 2 - mppt 1			
Orientação	#1		
Inclinação/Azimuth	12/-170 °		
Número de módulos FV	57 unidades	Número de inversores	1 * MPPT 25% 0.3 units
Nominal (STC)	19.10 kWp	Potência total	15.0 kWca
Módulos	3 Strings x 19 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	200-850 V
Pmpp	17.42 kWp	Potência máx. (≈25°C)	63.4 kWca
Umpp	654 V	Rácio Pnom (DC/AC)	1.27
I mpp	27 A		
Grupo #3 - INVERSOR 2 - mppt 2 e 3			
Orientação	#2		
Inclinação/Azimuth	12/10 °		
Número de módulos FV	114 unidades	Número de inversores	2 * MPPT 25% 0.5 units
Nominal (STC)	38.2 kWp	Potência total	30.0 kWca
Módulos	6 Strings x 19 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	200-850 V
Pmpp	34.8 kWp	Potência máx. (≈25°C)	63.4 kWca
Umpp	654 V	Rácio Pnom (DC/AC)	1.27
I mpp	53 A		
Grupo #4 - INVERSOR 2 - mppt 4			
Orientação	#2		
Inclinação/Azimuth	12/10 °		
Número de módulos FV	60 unidades	Número de inversores	1 * MPPT 25% 0.3 units
Nominal (STC)	20.10 kWp	Potência total	15.0 kWca
Módulos	3 Strings x 20 Em série		
Em condições de func. (50°C)		Tensão de funcionamento	200-850 V
Pmpp	18.33 kWp	Potência máx. (≈25°C)	63.4 kWca
Umpp	689 V	Rácio Pnom (DC/AC)	1.34
I mpp	27 A		
Potência FV total		Potência total inversor	
Nominal (STC)	154 kWp	Potência total	120 kWca
Total	459 módulos	N.º de inversores	2 unidades
Superfície módulos	907 m²	Rácio Pnom	1.28
Superfície célula	800 m²		



2.3. Dados dos condutores

Os condutores elétricos desempenham um papel fundamental na interligação de todo o sistema fotovoltaico, garantindo o transporte de energia elétrica dos painéis para o inversor e, posteriormente, do inversor até a rede de distribuição. Nesse contexto, é essencial observar as características de cada condutor utilizado nos circuitos, uma vez que o cabeamento entre os painéis fotovoltaicos e o inversor difere em vários aspectos do cabeamento que conecta o inversor à rede de distribuição da concessionária de energia (ABNT NBR 16690, 2018).

Os cabos de corrente alternada (CA) são utilizados na saída do inversor até a rede da concessionária. Eles geralmente possuem isolamento entre 750 e 1000 Volts e devem ser protegidos por eletrodutos. Já os cabos de corrente contínua (CC), por sua vez, podem permanecer expostos ao sol e à chuva, pois são projetados para suportar essas condições (ABNT NBR 5410, 2008).

Foi identificado na usina que condutores de corrente alternada (CA) foram erroneamente empregados em diversas partes destinadas à corrente contínua (CC), resultando em superaquecimento do sistema e perdas de geração devido a essa irregularidade. Além da má instalação dos condutores, a infraestrutura que comporta esses cabeamentos estava em condições precárias, o que pode resultar em uma série de problemas, como falhas de isolamento e carbonização dos circuitos.

A Tabela 1 apresenta um histórico extenso de falhas dos inversores que ocorreram em apenas um dia, decorrentes do rompimento e carbonização de parte do cabeamento, onde foram inseridos cabos irregulares.

Tabela 1. Histórico de falhas do inversor.

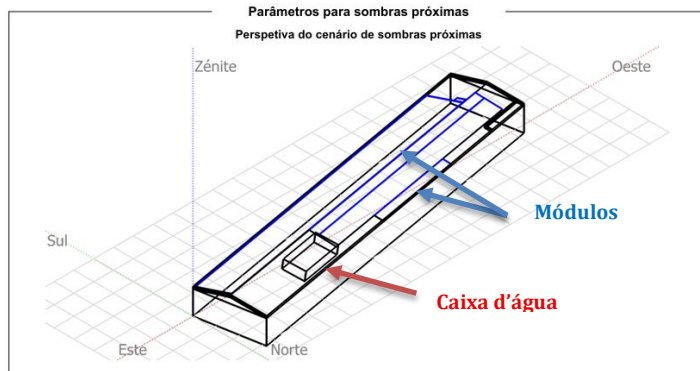
Histórico de falhas do inversor		
Tipo de alarme	Data	Hora
Perda de Rede	08/08/2023	13:48:00
Perda de Rede	08/08/2023	11:15:00
Falha de Isolação	08/08/2023	10:54:00
Perda de Rede	08/08/2023	07:59:00
Perda de Rede	08/08/2023	07:29:00
Falha de Isolação	08/08/2023	07:28:20
Falha de Isolação	08/08/2023	07:25:36
Falha de Isolação	08/08/2023	07:22:52
Falha de Isolação	08/08/2023	07:10:27
Perda de Rede	08/08/2023	07:02:47
Perda de Rede	08/08/2023	06:47:36

2.4. Parâmetros de Sombreamento

É crucial que o projetista leve em conta todos os fatores que podem resultar em sombreamento e pontos quentes (ABNT NBR 16612). Contudo, a Figura 3 revela a ausência de considerações sobre esses elementos, uma vez que os módulos foram instalados em proximidade a uma caixa d'água, conforme indicado na Figura 3.

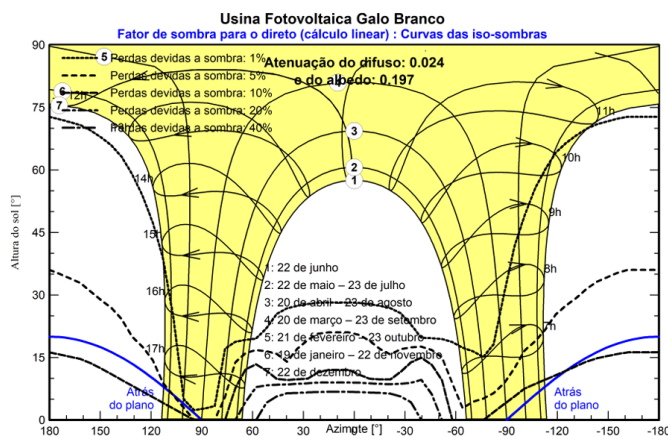


Figura 3. Parâmetros de sombreamento.



Outro fator significativo que não foi devidamente considerado é a conexão dos módulos conforme estabelecido pela ABNT NBR 16690, que regulamenta as formas pelas quais os arranjos fotovoltaicos podem ser conectados. No circuito há painéis ligados em série, mesmo estando em orientações distintas, resultando em pontos quentes. Isso ocorre porque os painéis com menor incidência de irradiação se tornam uma resistência quando os demais interligados a eles recebem índices elevados de irradiação. A Figura 4 exibe o diagrama anual de sombreamento da usina, levando em consideração todos os fatores apresentados na instalação e quanto o sistema poderia alcançar de rendimento caso estivesse em condições ideais.

Figura 4. Diagrama de sombreamento anual.



Verifica-se que, dependendo da época do ano, as perdas de geração podem atingir até 40%, em razão da sombra projetada pela caixa d'água, que incide sobre uma quantidade significativa de *strings* (conjuntos de módulos fotovoltaicos conectados em série).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

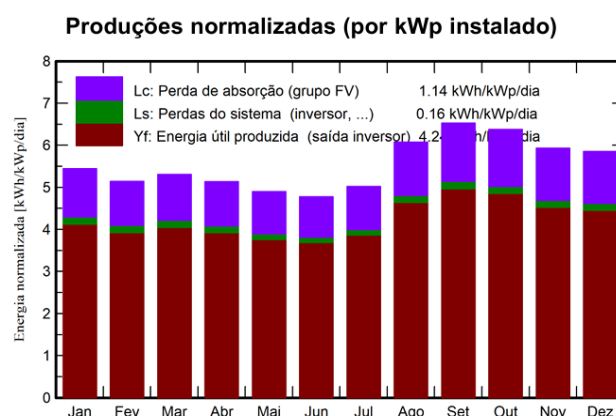
Após a apresentação de diversos fatores que devem ser considerados nas etapas de elaboração e execução de um projeto, torna-se evidente a importância da adoção de boas práticas e da correta aplicação técnica durante a execução da obra. Uma usina



solar fotovoltaica pode proporcionar significativa economia ao consumidor, no entanto, se for instalada de maneira inadequada, pode acarretar não apenas prejuízos financeiros, mas também riscos graves à integridade física, inclusive à vida humana.

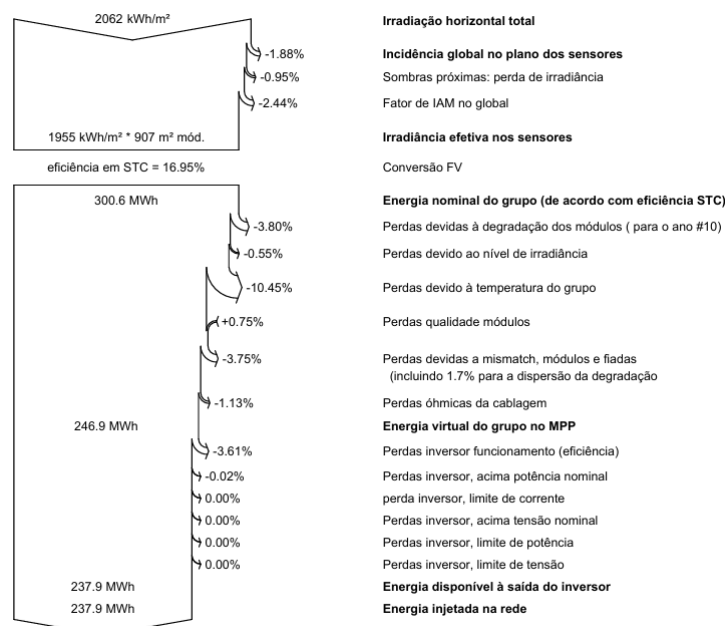
Outro aspecto relevante é a importância do monitoramento online contínuo da usina, especialmente no acompanhamento da geração diária. Essa prática é fundamental para garantir o desempenho do sistema conforme o previsto no projeto. Por meio do monitoramento, é possível identificar rapidamente quedas abruptas de desempenho, permitindo a adoção imediata de medidas corretivas. A Figura 5 apresenta os principais resultados da análise de desempenho do sistema, destacando as perdas por absorção, perdas dos inversores e a energia útil produzida.

Figura 5. Gráfico de desempenho anual.



Nessa perspectiva, é possível apresentar o balanço total da produção de energia em kWh/m², considerando todos os fatores que impactam o desempenho da unidade. Esses dados possibilitaram a elaboração do diagrama geral de perdas (Figura 6), que detalha as porcentagens de energia perdidas por fatores relevantes ao longo de todo o processo produtivo da usina analisada.

Figura 6. Diagrama geral de perdas.





Durante o ciclo analisado, foram considerados de forma rigorosa todos os fatores que contribuíam para as perdas de geração na unidade, desde falhas na instalação dos módulos até o não atendimento aos requisitos normativos estabelecidos pelas NBRs e pelas normas técnicas das distribuidoras, abrangendo todas as partes vivas do sistema fotovoltaico.

4 CONCLUSÕES

O processo de elaboração de projetos de usinas fotovoltaicas demanda atenção especial, uma vez que diversos fatores podem comprometer seu desempenho caso as equipes de projeto e instalação não estejam devidamente preparadas. Este trabalho analisou os principais desafios identificados durante a vistoria de uma usina de 154 kWp localizada em São Raimundo Nonato, no Piauí.

A relevância do estudo vai além da aplicação prática da engenharia, ao oferecer uma análise crítica de aspectos operacionais e técnicos que impactam o desempenho de muitas usinas e que, frequentemente, são negligenciados. Ademais, o tema contribui para o avanço do conhecimento na área de energias renováveis, fornecendo subsídios valiosos tanto para pesquisas futuras quanto para o aprimoramento de projetos solares em diferentes contextos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos não halogenados isolados com cobertura para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores, requisitos de desempenho - NBR 16612*. Vigente a partir de 10 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto - NBR 16690*. Vigente a partir de jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *Instalações elétricas de baixa tensão - NBR 5410*. Vigente a partir de 17 mar. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas - NBR 5419*. Vigente a partir de 30 mar. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho - NBR 16274*. Vigente a partir de 06 abr. 2014.

EQUATORIAL ENERGIA PIAUÍ – EQTL. *Conexão de Microgeração e Minigeração Distribuída ao Sistema de Distribuição – NT.00020*. Revisão 5, homologada em 17 nov. 2024.

GREEN, Martin A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESEB, 2014.