

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADES UNIFICADAS DE CATAGUASES**

BRUNO ARAÚJO PACHECO

**A IMPORTÂNCIA DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO EM USINAS SOLARES: um
estudo de caso**

CATAGUASES – MG

2024

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADES UNIFICADAS DE CATAGUASES**

BRUNO ARAÚJO PACHECO

**A IMPORTÂNCIA DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO EM USINAS SOLARES: um
estudo de caso**

**Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Engenharia
Elétrica das Faculdades Unificadas de
Cataguases como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo H. da Silva

CATAGUASES – MG

2024

BRUNO ARAÚJO PACHECO

**A IMPORTÂNCIA DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO EM USINAS SOLARES: um
estudo de caso**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica das Faculdades Unificadas de Cataguases como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

APROVADO EM: __/__/__

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Esp. Carlos da Mata Campos
Instituto Ensinar Brasil (Faculdades Unificadas de Cataguases)

Prof. Dr. Marcus Vinícius de Souza Ferraz
Instituto Ensinar Brasil (Faculdades Unificadas de Cataguases)

Prof. Dr. José Eduardo H. da Silva – Orientador
Instituto Ensinar Brasil (Faculdades Unificadas de Cataguases)

RESUMO

Este trabalho explora a importância da Operação e Manutenção (O&M) em usinas solares, destacando sua relevância na eficiência, confiabilidade e rentabilidade desses empreendimentos. O objetivo principal foi analisar como práticas eficazes de O&M impactam positivamente a performance operacional e financeira, utilizando um estudo de caso *in loco*. A metodologia envolveu pesquisa qualitativa e quantitativa, com coleta de dados operacionais, financeiros e de confiabilidade de uma usina solar entre janeiro e agosto de 2024, por meio de um estudo de caso. Os resultados demonstraram alta eficiência operacional, com taxa de disponibilidade média de 99% e predominância de manutenções preventivas, minimizando falhas e otimizando o desempenho. Conclui-se que práticas robustas de O&M são essenciais para maximizar a geração de energia solar e contribuir para a sustentabilidade ambiental e econômica.

Palavras-chave: Operação e Manutenção. Usinas Solares. Desempenho Operacional. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This work explores the importance of Operation and Maintenance (O&M) in solar plants, highlighting its relevance in the efficiency, reliability and profitability of these projects. The main objective was to analyze how effective O&M practices positively impact operational and financial performance, using an on-site case study. The methodology involved qualitative and quantitative research, collecting operational, financial and reliability data from a solar plant between January and August 2024, through a case study. The results demonstrated high operational efficiency, with an average availability rate of 99% and a predominance of preventive maintenance, minimizing failures and optimizing performance. It is concluded that robust O&M practices are essential to maximize solar energy generation and contribute to environmental and economic sustainability.

Keywords: Operation and Maintenance. Solar Power Plants. Operational Performance. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Insumos utilizados na Fabricação de Painéis Fotovoltaicos	12
Figura 2 – Módulos Fotovoltaicos.....	13
Figura 3 – Inversores Fotovoltaicos	14
Figura 4 – Funcionamento dos <i>Trackers</i>	14
Figura 5 – Conjunto de módulos de Energia Fotovoltaica.....	15
Figura 6 – Roçagem em Usina Solar	17
Figura 7 – O&M: Inspeção em Usinas Solares	19
Figura 8 – Limpeza de Usina Solar	21
Figura 9 – Ficha de manutenção por tipo de falha	23
Figura 10 – Equação para o MTBF	24
Figura 11 – Equação para o MTTR.....	24
Figura 12 – Equação Disponibilidade	25
Figura 13 – Geração Medida/Esperada	30
Figura 14 – Plano de Manutenção	30
Figura 15 – Quantidade de OS por tipo de Manutenção.....	32
Figura 16 – Paradas Programadas	33
Figura 17 – Paradas Forçadas	34
Figura 18 – MTBF.....	39
Figura 19 – MTBF (Anual).....	39
Figura 20 – MTTR	40
Figura 21 – MTTR (Acumulado)	41
Figura 22 – Disponibilidade Média	42

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
O&M	Operação e Manutenção

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Energia Solar Fotovoltaica: princípios e funcionamento.....	11
2.2 Importância da Energia Solar no Contexto Energético Global.....	16
2.3 Conceitos Básicos de O&M em usinas solares	17
2.4 Benefícios da O&M na eficiência operacional e na rentabilidade das usinas solares.....	19
2.5 Tipos de Manutenção.....	21
2.6 MTBF / MTTR	24
3 ESTUDO DE CASO	26
3.1 Tipo de Pesquisa.....	26
3.2 Coleta de Dados	26
3.3 Local da Pesquisa	26
3.4 Equipamentos.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Dados Operacionais.....	29
4.2 Dados Financeiros	35
4.3 Dados de Confiabilidade	37
5 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS.....	45
ANEXO A – Solicitação de Autorização para Pesquisa.....	48

1 INTRODUÇÃO

O interesse global pelas fontes de energia renováveis chamou a atenção das pessoas em todo o mundo. A população cada vez maior e o uso excessivo de combustíveis fósseis sublinharam a importância da sua oferta limitada. Conseqüentemente, esta realidade alimentou o desejo de explorar métodos alternativos de produção de energia que tenham um menor impacto no nosso ambiente (BRASIL, 2022).

A busca por um modelo de produção de energia sustentável despertou um entusiasmo crescente por opções de energia mais limpas e renováveis, visando atender às demandas energéticas e, ao mesmo tempo, minimizar o impacto em nosso planeta. Embora a geração solar fotovoltaica seja mais cara em comparação com outras fontes renováveis, demonstrou potencial promissor, com uma redução de quase 50% nos custos de produção na última década (MARQUES; KRAUTER; LIMA, 2009).

O conceito de sustentabilidade e a importância da redução dos poluentes e dos impactos ambientais são questões de importância para todos. Atualmente, a humanidade extrai energia da natureza de forma destrutiva e, se esta prática continuar, poderá levar ao esgotamento dos recursos naturais nos próximos 50 anos. Mesmo nos dias de hoje, a descoberta de novas fontes de energia não renováveis, tais como campos petrolíferos *offshore*, tem um preço elevado e requer a exploração em águas profundas (CUNHA; AUGUSTIN, 2014).

No entanto, é evidente que estas fontes são incapazes de acompanhar as exigências de uma população e de uma economia em crescimento. A investigação e as tendências do mercado indicam que a energia solar é a alternativa mais viável aos combustíveis fósseis. A energia solar fotovoltaica, em particular, destaca-se pela sua natureza não poluente, *design* compacto e baixo custo de manutenção (SILVA; ARAÚJO, 2022).

Para maximizar o retorno do investimento e prolongar a vida útil dos sistemas de energia solar, é crucial priorizar a operação e manutenção (O&M) em centrais solares. Isto envolve uma série de tarefas como limpeza dos painéis solares, exame das estruturas de fixação, implementação de medidas de manutenção corretiva e preventiva, realização de inspeções elétricas e utilização de monitoramento remoto. Ao realizar diligentemente estas práticas de O&M, é possível otimizar a utilização da

energia solar e garantir a funcionalidade dos sistemas a longo prazo (MAYA ENERGY, 2024).

Assim, este trabalho discutirá sobre a importância da Operação e Manutenção em usinas solares, com o referencial teórico sobre os princípios e fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica; a importância da Energia Solar no contexto energético global; os conceitos básicos de O&M em usinas solares, bem como o funcionamento, por meio de um estudo de caso, da O&M em uma usina solar.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é compreender a importância da Operação e Manutenção em usinas solares, destacando sua influência na performance, confiabilidade e rentabilidade desses empreendimentos, por meio de um estudo de caso.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Conceituar Energia Solar Fotovoltaica, trazendo à tona seus princípios e funcionamento.
- Apresentar conceitos básicos sobre O&M em usinas solares, bem como seus benefícios diante da eficiência operacional.
- Mostrar o funcionamento de uma usina elétrica, relatando sua influência na performance, confiabilidade e rentabilidade dessa organização.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta etapa do trabalho, será discutido o referencial teórico, em que foram buscados autores, que discutissem a respeito da temática aqui abordada, a saber, a importância da O&M em usinas solares.

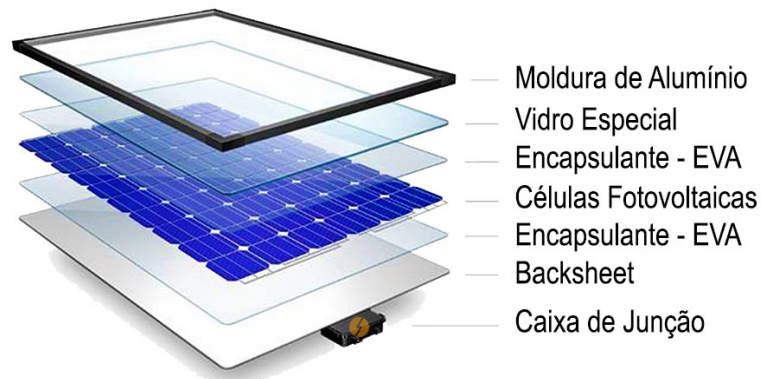
2.1 Energia Solar Fotovoltaica: princípios e funcionamento

A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia que converte diretamente a luz do sol em eletricidade, utilizando células fotovoltaicas que compõem os painéis solares. Essas células são feitas geralmente de materiais semicondutores, como o silício, que possuem a capacidade de gerar uma corrente elétrica quando expostos à luz solar. O princípio fundamental por trás do funcionamento dos painéis solares está na absorção dos fótons da luz solar pelos semicondutores, o que faz com que os elétrons sejam excitados e se movam, gerando uma corrente elétrica. Esse processo é conhecido como efeito fotovoltaico, descoberto por Edmond Becquerel em 1839 (MARQUES; KRAUTER; LIMA, 2009).

Para que os painéis fotovoltaicos tenham uma vida útil longa conforme pretendido, é fundamental que sejam produzidos com tecnologia de ponta durante o processo de fabricação (TOSI, 2024).

Na sequência, têm-se os principais materiais utilizados na produção de painéis solares fotovoltaicos, que são insumos fundamentais em seu processo de fabricação, como: Células Fotovoltaicas, Vidro Fotovoltaico (Vidro especial para a fabricação do painel solar), Filme Encapsulante para o Painel Solar – EVA, *Backsheet* (Material plástico branco que vai na parte de trás do painel solar), Caixa de Junção (PV - *Junction Box*), Molduras do Painel Solar de Alumínio Anodizado (Frame do Painel Solar) (PORTAL SOLAR, 2024). A Figura 1 apresenta os insumos utilizados na Fabricação de Painéis Fotovoltaicos.

Figura 1 – Insumos utilizados na Fabricação de Painéis Fotovoltaicos



Fonte: Portal Solar (2024).

A eficiência de um sistema fotovoltaico depende de diversos fatores, incluindo a intensidade da luz solar incidente, a qualidade das células fotovoltaicas, e a orientação e inclinação dos painéis em relação ao sol. A luz solar é composta por fótons de diferentes comprimentos de onda, e os semicondutores utilizados nos painéis solares são projetados para absorver principalmente fótons na faixa do espectro visível e próximo ao infravermelho próximo (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

A capacidade de um painel solar gerar energia pode ser afetada por vários fatores, incluindo condições climáticas e consumo doméstico de energia. Felizmente existe uma solução para simplificar a compreensão e implementação desta informação: uma fórmula. Ao utilizar uma equação matemática, é possível quantificar o uso de energia (SOLAR PRIME, 2024).

Para fazer isso, é necessária a classificação de energia, duração do uso e métricas de desempenho do seu painel solar. Com essas variáveis à sua disposição, a fórmula pode ser construída da seguinte forma: Energia = Potência x Tempo x Rendimento do Sistema ($E=P \times t \times \eta$). Ainda, fatores como incidência solar, posicionamento do painel, potência da placa e consumo, podem influenciar na quantidade kWh que uma placa pode produzir (SOLFÁCIL, 2024).

Um sistema fotovoltaico completo é composto por módulos fotovoltaicos interligados, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Módulos Fotovoltaicos



Fonte: Sustentável & Cia (2024).

Ao lado dos módulos, existem outros componentes essenciais incluídos nos sistemas fotovoltaicos. Esses inversores desempenham um papel crucial na conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA) que é utilizada na rede elétrica tradicional. Além disso, dispositivos de monitorização também são integrados no sistema para regular e supervisionar o seu desempenho global (ABSOLAR, 2022).

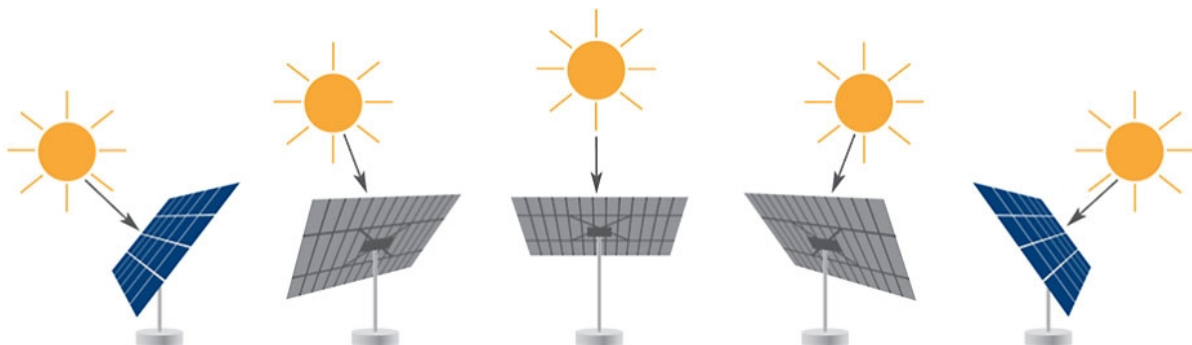
Vale destacar que a aparência externa dos inversores solares é simples e compacta, normalmente composta por uma caixa metálica com alguns botões. No entanto, a estrutura interna é composta por vários componentes. O objetivo principal dos inversores é converter a corrente contínua ou tensão gerada pelos painéis solares em corrente alternada adequada para a rede elétrica padrão. Além disso, os inversores exercem a função de regular o fluxo de energia dentro do sistema e na medição precisa da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos como é possível observar na Figura 3 (PORTAL SOLAR, 2024).

Figura 3 – Inversores Fotovoltaicos



Fonte: Portal Solar (2024).

Outro aspecto que corresponde ao funcionamento da energia solar fotovoltaica, é a questão dos *Trackers*, também conhecidos como seguidor solar, apresentado na Figura 4. Vale destacar que, embora eles não sejam elementos obrigatórios para o funcionamento de usina solar, nota-se uma tendência constante de adoção, por conta de suas vantagens de uso. Esse mecanismo ajusta a orientação dos painéis fotovoltaicos várias vezes ao longo do dia. Este sistema de rastreamento segue a trajetória do Sol para otimizar a produção de energia solar em um sistema fotovoltaico. Os rastreadores solares são agora amplamente utilizados em várias usinas fotovoltaicas, já que a indústria solar comprovou suas vantagens significativas, como maior geração de energia, por conta da exposição direta aos raios solares (PORTAL SOLAR, 2024).

Figura 4 – Funcionamento dos *Trackers*

Fonte: Portal Solar (2024).

A instalação de sistemas fotovoltaicos pode ocorrer em diferentes escalas, desde pequenos sistemas residenciais até grandes usinas solares comerciais. A escolha do tipo de sistema depende das necessidades energéticas, da disponibilidade de espaço e das condições econômicas e ambientais locais. Em muitas partes do mundo, a energia solar fotovoltaica tem se tornado uma alternativa viável e competitiva às fontes de energia convencionais, devido à sua capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e proporcionar uma fonte de energia limpa e renovável (NICOLAI; NETO; SANTOS, 2024).

No entanto, apesar dos benefícios ambientais e econômicos, a implementação de sistemas fotovoltaicos enfrenta desafios como a variação na disponibilidade de luz solar ao longo do dia e do ano, a necessidade de armazenamento de energia para períodos sem luz solar, e questões relacionadas aos custos de instalação e manutenção. Avanços contínuos na tecnologia de células solares, assim como políticas de incentivo e desenvolvimento de infraestrutura, são essenciais para expandir ainda mais o papel da energia solar fotovoltaica no contexto energético global (PASSINI *et al.*, 2023).

Na Figura 5, é possível ver um exemplo que corresponde ao conjunto de módulos de energia fotovoltaica.

Figura 5 – Conjunto de módulos de Energia Fotovoltaica



Fonte: Portal Solar (2024).

2.2 Importância da Energia Solar no Contexto Energético Global

A energia solar desempenha um papel cada vez mais importante no contexto energético global, oferecendo uma fonte limpa e renovável capaz de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais associados. Estudos indicam que a energia solar fotovoltaica, em particular, tem potencial significativo para contribuir com a segurança energética e a sustentabilidade ambiental globalmente (REN21, 2021). A crescente implantação de tecnologias solares é impulsionada não apenas por considerações ambientais, mas também por motivos econômicos, dado o declínio nos custos de instalação e operação ao longo dos anos (LAZARD, 2020).

A expansão da capacidade solar tem sido acompanhada por um aumento na competitividade em relação às fontes tradicionais de energia. Estudos demonstram que, em muitas regiões, os custos de geração de eletricidade a partir de energia solar fotovoltaica são agora comparáveis ou até mesmo inferiores aos de fontes convencionais como o carvão e o gás natural (IRENA, 2021). Essa competitividade tem estimulado políticas públicas favoráveis, como incentivos fiscais, que têm desempenhado um papel crucial na aceleração da adoção de energia solar em diversos países (JACOBSON *et al.*, 2020).

Além de seu potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a energia solar também oferece benefícios adicionais, como a criação de empregos no setor de energia renovável. Estudos econômicos destacam que a transição para fontes renováveis, incluindo a energia solar, pode gerar milhões de empregos diretos e indiretos globalmente, contribuindo para o desenvolvimento econômico sustentável (IRENA, 2020). Essa dinâmica é especialmente relevante em economias emergentes e em desenvolvimento, onde a expansão da energia solar pode melhorar significativamente o acesso à energia elétrica em áreas rurais e remotas (IEA, 2021).

No contexto das mudanças climáticas, a energia solar desempenha um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais adversos. Estudos científicos destacam que a expansão da capacidade solar pode ajudar a limitar o aquecimento global a níveis aceitáveis, contribuindo assim para os objetivos estabelecidos no Acordo de Paris. A integração de tecnologias solares em sistemas de energia mais amplos também pode fortalecer a resiliência energética e reduzir a vulnerabilidade a interrupções no fornecimento de energia (REN21, 2020).

Em suma, a energia solar emergiu como uma força transformadora no panorama energético global, oferecendo uma alternativa sustentável e acessível às fontes de energia convencionais. Com apoio adequado em termos de políticas públicas e investimentos, a expansão da capacidade solar pode não apenas diversificar a matriz energética, mas também promover o crescimento econômico inclusivo e mitigar os impactos adversos das mudanças climáticas (IEA, 2020).

Segundo Sauaia (2019), há diversos benefícios do sistema fotovoltaico, envolvendo a esfera socioeconômica, ambiental e estratégica, como a redução dos gastos com energia elétrica pela população e empresas, geração de empregos. O autor também apresenta sobre a geração de energia limpa, renovável e sustentável e ampliação do uso de energias renováveis no país.

2.3 Conceitos Básicos de O&M em usinas solares

A abreviatura O&M significa Operação e Manutenção, que se refere aos princípios essenciais que garantem o bom funcionamento das usinas solares. Estas orientações visam prevenir o consumo excessivo de recursos e garantir a longevidade das instalações, permitindo-lhes cumprir a função pretendida de maximizar os custos para os consumidores (PORTAL SOLAR, 2024).

Na Figura 6, tem-se uma forma de O&M na prática, em que é realizada a roçagem em usinas solares.

Figura 6 – Roçagem em Usina Solar



Fonte: Solutudo (2024).

A O&M em usinas solares desempenha um papel de suma relevância na garantia da eficiência e confiabilidade desses sistemas ao longo de sua vida útil, uma vez que está estreitamente ligada à preservação. A O&M envolve uma série de atividades que visam assegurar o funcionamento contínuo e otimizado dos painéis solares e dos componentes associados. Inclui desde a inspeção regular dos equipamentos até a realização de reparos preventivos e corretivos para maximizar a produção de energia (COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2020).

A O&M também abrange a gestão eficiente de ativos, o que inclui a monitorização constante do desempenho dos equipamentos. Sistemas avançados de monitoramento permitem a detecção precoce de anomalias, permitindo uma resposta rápida e eficaz para minimizar o tempo de inatividade não planejado (SOUZA *et al.*, 2019).

A segurança operacional é uma prioridade na O&M de usinas solares, considerando os riscos associados ao manuseio de eletricidade e aos trabalhos em altura. A implementação de protocolos de segurança rigorosos, o treinamento adequado dos trabalhadores e a manutenção de equipamentos de proteção individual (EPIs) são essenciais para prevenir acidentes e garantir um ambiente de trabalho seguro (MORAIS; PONTES, 2022).

A gestão de desempenho é outro aspecto crucial da O&M em usinas solares, envolvendo a análise e a avaliação contínuas do desempenho energético dos sistemas. Isso inclui a comparação dos dados reais de produção de energia com as metas estabelecidas, identificando oportunidades de melhoria e implementando ajustes conforme necessário, como elucida a Figura 7 (TANSY *et al.*, 2018).

Figura 7 – O&M: Inspeção em Usinas Solares



Fonte: Maya Energy (2024).

A capacitação técnica dos profissionais envolvidos na O&M é fundamental para garantir a eficácia das operações. Treinamentos regulares sobre novas tecnologias, procedimentos de segurança e práticas de manutenção são essenciais para manter a equipe atualizada e competente para lidar com os desafios dinâmicos das usinas solares (ARA *et al.*, 2021).

2.4 Benefícios da O&M na eficiência operacional e na rentabilidade das usinas solares

A O&M desempenha um papel fundamental na potencialização da eficiência operacional e na rentabilidade das usinas solares. De acordo com Livera *et al.* (2022), estudos indicam que práticas eficazes de O&M contribuem significativamente para otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, minimizando as perdas de energia e maximizando a produção ao longo do tempo (LIVERA *et al.*, 2022).

Ademais, a O&M contribui para prolongar a vida útil dos componentes do sistema solar, como os módulos fotovoltaicos e inversores, através de práticas adequadas de manutenção e monitoramento. Estudos mostram que uma gestão eficiente dos ativos pode reduzir os custos de substituição de equipamentos e melhorar a confiabilidade geral da planta (ARA *et al.*, 2021).

A análise de desempenho contínuo é outro benefício crucial da O&M, permitindo aos operadores identificar e corrigir deficiências no sistema que possam estar afetando a eficiência energética. A utilização de sistemas avançados de monitoramento e análise de dados ajuda a otimizar o fluxo de energia e a realizar ajustes operacionais que aumentam a produção de energia (DACHERY, 2020).

Práticas eficazes de O&M ajudam a reduzir os custos operacionais ao longo do tempo, aumentando a lucratividade do empreendimento e garantindo uma performance consistente ao longo da vida útil da usina (CRISPIM *et al.*, 2021).

A gestão proativa de desempenho também contribui para a mitigação de riscos financeiros associados à operação de usinas solares. Ao garantir um desempenho estável e previsível, a O&M ajuda a proteger o investimento contra flutuações inesperadas nos mercados de energia e variações nas condições operacionais (VERGARA *et al.*, 2017).

Assim, pode-se dizer que os benefícios da O&M em usinas solares não se limitam apenas à eficiência operacional e rentabilidade financeira. Essas práticas também desempenham um papel importante na sustentabilidade ambiental, assegurando que as usinas solares operem de forma eficiente e confiável ao longo de sua vida útil, contribuindo para a transição global para uma matriz energética mais limpa e sustentável (IEA, 2020).

É válido destacar como se dá o funcionamento de uma usina solar. Assim, os módulos solares geram eletricidade, que é então enviada a um inversor solar para transformar essa energia em corrente alternada, permitindo sua transmissão através das redes de eletricidade e sua distribuição para residências ou negócios (PORTAL SOLAR, 2024).

Através dos inversores, a energia produzida pelos módulos alcança até 380 Volts. Para transportar a eletricidade nas linhas de alta tensão (responsáveis por levar a energia até as áreas urbanas), é necessário um nível de voltagem superior, motivo pelo qual são usados transformadores para aumentar a tensão para 13.800 Volts, 69.000 Volts, 138.000 Volts ou até mais de 230.000 Volts. Localizadas em regiões remotas e afastadas de outras construções, as usinas solares distribuem a energia por meio de linhas de transmissão, que depois repassam a eletricidade em quantidades adequadas para residências e estabelecimentos comerciais conectados à rede de distribuição local (NEOENERGIA, 2024).

2.5 Tipos de Manutenção

Na O&M de usinas solares, existem três tipos de manutenção, sendo elas: manutenção preventiva, manutenção preditiva e manutenção corretiva. A manutenção preventiva é a principal estratégia empregada, pois com ela, é possível garantir que possíveis danos sejam evitados, gerando economia. Esta abordagem implica a execução regular de tarefas programadas, como inspeção minuciosa no sistema de fiação e conexões, a fim de verificar se há conexões soltas, oxidação ou qualquer outro tipo de dano que possa afetar a eficiência ou segurança (PROGRAMA ALTENER, 2004).

Outro tipo de manutenção é a limpeza das placas solares. A O&M de usinas solares é impulsionada por um compromisso com a sustentabilidade ambiental, visando limitar as consequências ecológicas das operações. Isto envolve a utilização de substâncias e recursos ecológicos, ao mesmo tempo que implementa estratégias que diminuem a utilização de recursos naturais durante as atividades de manutenção. A adoção de técnicas de manutenção ambientalmente conscientes, como o emprego de métodos de limpeza que economizam água (BEIGELMAN, 2013).

Na Figura 8, é possível ver a limpeza sendo realizada nas usinas solares.

Figura 8 – Limpeza de Usina Solar



Fonte: Portal Solar (2024).

Além disso, há também o monitoramento da performance do sistema. Ao realizar avaliações regulares e gerar relatórios, torna-se viável monitorar de perto a

eficiência da planta, detectar possíveis variações ou reduções e implementar as ações corretivas necessárias para maximizar a produção de energia (MAYA ENERGY, 2024).

Destaca-se também as manutenções corretivas, que dizem respeito às intervenções, planejadas ou não, são implementadas para resolver falhas do sistema ou problemas que surjam. Geralmente, essas intervenções são uma resposta direta a falhas reais detectadas através de monitoramento remoto, com o objetivo de corrigir o desempenho de equipamentos que não atendem aos padrões exigidos durante a operação. Este processo pode envolver a substituição de componentes desgastados ou obsoletos, a reparação de equipamentos avariados ou a resolução de desafios operacionais que comprometem a eficiência da central fotovoltaica (NORR ENERGIA, 2024).

É importante compreender os tipos de manutenção diante das possíveis falhas. Segundo o Programa Altener, ao criar uma ficha de manutenção por tipo de falha, como inspeção visual, medições com multímetro, medição da resistência da terra, verificação das entradas e saídas, medição da resistência de isolamento, verificação sob/sobre tensões, Curvas IV, Leitura dos dados fornecidos pelo inversor, teste do circuito AC e análise do sinal de rede (PROGRAMA ALTENER, 2004).

É de suma importância que essa manutenção seja realizada, de acordo com a detecção dos problemas, uma vez que com essa ficha, torna-se o processo mais prático e eficiente (MORAIS; PONTES, 2022).

A Figura 9 elucida os tipos de falhas, trazendo-a dividida em 3 (três) tópicos: Módulos FV, Inversor e Instalação.

Figura 9 – Ficha de manutenção por tipo de falha

	Inspeção Visual	Medições com Multímetro	Medição da resistência de terra	Verificação das entradas e saídas	Medição da resistência de isolamento	Verificação de sob/sobre tensões	Curvas IV	Leitura dos dados fornecidos pelo inversor	Teste do circuito AC	Análise do sinal de rede
Tipos de falhas										
Módulos FV										
Sujidades	X									
Deslaminagem do módulo	X	X					X			
Diodos de derivação		X		X				X		
Pontos de Ligação		X					X	X		
Umidade	X	X			X		X			
Módulos defeituosos	X	X			X		X	X		
Inversor										
Eficiência				X				X	X	X
Características do sistema de controle				X		X		X	X	X
Conteúdo Harmônico									X	X
Distúrbios na linha de tensão								X	X	X
Instalação										
Fusível	X	X		X						
Diodo de fileira defeituoso		X		X			X			
Curto-circuito/Falha de proteção de terra	X				X					
Descarregadores de sobretensão defeituosos	X	X			X	X				
Aumento da resistência de terra			X							

Fonte: PROGRAMA ALTENER (2004).

Assim, para cada falha encontrada, há uma estratégia de manutenção. A título de exemplo, se há uma falha no Módulos FV, especificamente, módulos defeituosos, deve-se realizar a inspeção visual, medições com multímetro, medição da resistência de isolamento, Curvas IV, bem como a leitura dos dados fornecidos pelo inversor (PROGRAMA ALTENER, 2004).

Um ponto importante que merece destaque é a respeito do Custo Nivelado de Energia (LCOE, do inglês *Levelized Cost of Energy*), é considerada uma das métricas mais relevantes no setor energético, pois permite a avaliação e a comparação dos custos de geração de eletricidade de diversas fontes e tecnologias. A LCOE oferece uma avaliação do custo médio por unidade de energia elétrica durante todo o seu ciclo de vida, contemplando desde a instalação até fatores como investimentos iniciais e

de impacto, operação, manutenção, despesas com combustível (quando aplicável), taxa de desconto e a projeção de duração útil do sistema. O que faz da LCOE uma ferramenta atraente para negócios sustentáveis é sua capacidade de estabelecer critérios de comparação justos, mesmo diante de múltiplos elementos que podem impactar essa análise. Seu uso é aplicável tanto a fontes de energia renováveis quanto às que utilizam combustíveis fósseis tradicionais (EDP, 2024).

2.6 MTBF / MTTR

O MTBF (do Inglês *Mean Time Between Failures*) representa o tempo médio decorrido entre falhas, indicando a capacidade de um sistema ou equipamento operar sem problemas. Um MTBF maior geralmente sugere maior confiabilidade, pois indica uma menor frequência de falhas. A unidade de medida desse indicador é horas (h). A fórmula para o cálculo para o MTBF está representada na Figura 10.

Figura 10 – Equação para o MTBF

$$MTBF = \frac{(HORAS\ TOTAIS\ DO\ MÊS - SOMATÓRIO\ DE\ TEMPO\ INDISPONÍVEL\ NO\ MÊS\ POR\ BAY)}{(NÚMERO\ DE\ OCORRÊNCIAS\ NO\ MÊS\ POR\ BAY)}$$

Fonte: Abecon (2024).

Observa-se que, quanto maior o MTBF, menor a ocorrência de falhas. Por exemplo, em um mês com 31 dias, há um total de 744 horas. Assim, quanto mais próximo o MTBF estiver de 744 horas, menor foi o tempo de inatividade dos equipamentos, indicando maior confiabilidade (ABECON, 2024).

O MTTR (do inglês *Mean Time To Repair*) representa o tempo médio necessário para reparar um sistema ou equipamento após uma falha. O MTTR inclui o tempo de detecção, deslocamento, diagnóstico, tomada de decisão e reparo. Uma redução no MTTR pode resultar em uma menor interrupção das operações e, conseqüentemente, em um aumento na disponibilidade. A unidade de medida desse indicador é horas (h). A fórmula para o cálculo para o MTTR está representada na Figura 11.

Figura 11 – Equação para o MTTR

$$MTTR = \frac{(SOMATÓRIO\ DO\ TEMPO\ INDISPONÍVEL\ NO\ MÊS\ POR\ BAY)}{(NÚMERO\ DE\ OCORRÊNCIAS\ FORÇADAS\ NO\ MÊS\ POR\ BAY)}$$

Fonte: Abecon (2024).

A disponibilidade mede o tempo que um sistema ou equipamento está disponível para operação. Esse indicador representa a proporção de tempo em que o sistema ou equipamento está disponível em relação ao tempo total em que deveria estar disponível. A unidade de medida desse indicador é percentual (%). Na Figura 12 tem-se a fórmula para o cálculo da disponibilidade.

Figura 12 – Equação Disponibilidade

$$\text{DISPONIBILIDADE} = \frac{\text{MTBF}}{(\text{MTBF} + \text{MTTR})} * 100$$

Fonte: Abecon (2024).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Tipo de Pesquisa

Este trabalho de conclusão de curso utilizou uma abordagem qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa foi empregada para entender as práticas de Operação e Manutenção (O&M) em usinas solares através de estudo de caso, enquanto a pesquisa quantitativa foi utilizada para analisar dados específicos de desempenho e eficiência energética da usina solar estudada.

3.2 Coleta de Dados

A pesquisa foi dividida em duas etapas: revisão de literatura e um estudo de caso observacional. Primeiramente, foi realizada uma revisão da literatura sobre energia solar, O&M em usinas solares, práticas econômicas, bem como seu impacto econômico e ambiental. Na sequência, foi realizado um estudo de caso, em que uma usina solar serviu como objeto de estudo, levando em conta critérios como dados operacionais, dados financeiros e dados de confiabilidade.

A coleta de dados foi realizada por meio de documentação técnica da usina; observação direta das práticas de manutenção, com tabelas, quadros e gráficos; bem como monitoramento de dados operacionais. O pesquisador foi ao local coletar as informações, que foram entregues por meio de documentos e dados. A partir disso, esses dados foram tabulados, analisados e discutidos no tópico “Resultados e Discussão”.

É importante salientar que os dados aqui apresentados são referentes ao ano de 2024, compreendendo os meses de janeiro a agosto, pois foi o mês em que a observação e coleta de dados foram realizadas.

3.3 Local da Pesquisa

Trata-se uma usina solar localizada no interior de Minas Gerais, formada por uma equipe de 03 colaboradores. Nesta usina em questão, contam-se com 10 ITS e 20 inversores. A Tabela 1 apresenta de forma clara os dados do projeto do local da pesquisa.

Tabela 1 – Dados do Projeto

Módulos	132.240 Uds
Strings	4.408 Uds (30 módulos por string)
Trackers	1Vx60 x 2 (bitracker) 4 strings 1.102 Uds
Inversores	20 Uds
USINA 1	
Módulos	66.120 Uds
Strings	2.204 Uds
Trackers	551 Uds
ITS	5 Uds de 2 inv. (3,437 kVA)
Inversores	10 Uds
USINA 2	
Módulos	66.120 Uds
Strings	2.204 Uds
Trackers	551 Uds
ITS	5 Uds de 2 inv. (3,437 kVA)
Inversores	10 Uds

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

3.4 Equipamentos

Para elucidar os equipamentos, a Tabela 2 apresenta as descrições dos equipamentos.

Tabela 2 – Descrição dos Equipamentos

- 1. Painéis Solares (Módulos):** Captam a energia solar e a convertem em energia elétrica. São compostos por células fotovoltaicas protegidas por camadas de vidro e materiais encapsulantes.
- 2. Inversores:** Convertem a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), que pode ser utilizada na rede elétrica.
- 3. Estruturas de Suporte:** Sustentam os painéis solares, garantindo o ângulo adequado para captação máxima de energia e a estabilidade contra forças ambientais como vento.
- 4. Trackers (Sistemas de Rastreamento):** Ajustam a posição dos painéis solares para acompanhar o movimento do sol, aumentando a eficiência da captação de energia.

5. **Cabos e Conectores:** Responsáveis pela transmissão da energia elétrica dos painéis solares até os inversores e da usina até a rede elétrica.
6. **Transformadores:** Ajustam a tensão da energia elétrica para níveis adequados para transmissão e distribuição na rede.
7. **Sistemas de Monitoramento:** Permitem o acompanhamento em tempo real da performance da usina, identificando falhas e otimizando a operação.
8. **Baterias:** Armazenam a energia gerada para uso posterior, especialmente útil em sistemas off-grid ou híbridos.
9. **Sistemas de Proteção Elétrica:** Garantem a segurança da usina contra sobrecargas, curtos-circuitos e outros problemas elétricos.
10. **Sistema de Resfriamento:** Mantém os inversores e outros equipamentos eletrônicos em temperaturas operacionais seguras.
11. **Unidades de Medição e Controle:** Coletam dados operacionais e controlam automaticamente os sistemas da usina para otimizar a geração de energia.
12. **Sistemas de Iluminação de Segurança:** Garantem a visibilidade e segurança durante operações noturnas ou em condições de baixa visibilidade.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

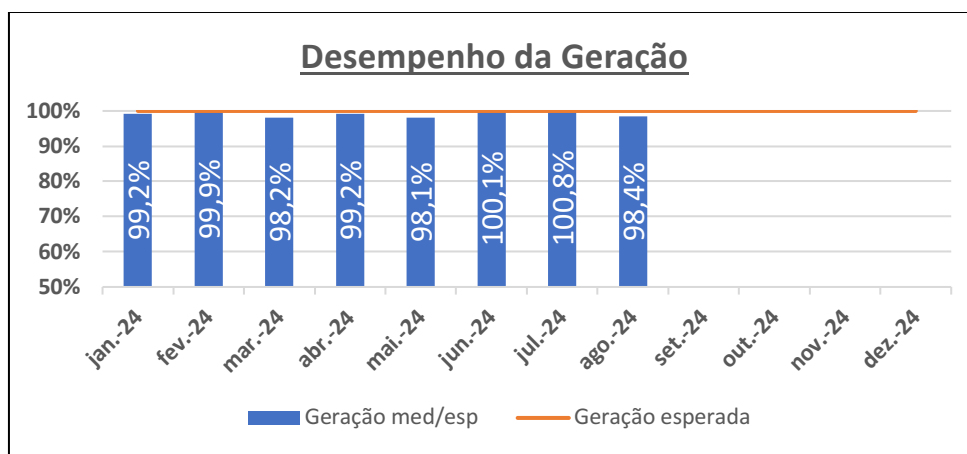
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho, são apresentados os resultados do estudo, em que os aspectos que foram levados em conta partiram de três caminhos, sendo eles: Dados operacionais, Dados Financeiros e Dados de Confiabilidade. Primeiramente, a coleta buscou os dados operacionais, buscando investigar o desempenho da usina e histórico de manutenção. Na sequência, têm-se os dados financeiros, com o intuito de visualizar a parte econômica da operação. Ainda, têm-se os Dados de Confiabilidade, com informações precisas sobre o funcionamento da usina.

4.1 Dados Operacionais

O primeiro aspecto a ser investigado foi referente ao desempenho da usina, que até a data referida anteriormente, teve a produção de 95.741 MW, como mostra o Gráfico 1, apresentando um desempenho de geração constante durante os meses analisados, mas vale destacar que nos meses de junho e julho, esse desempenho alcançou sua totalidade.

Gráfico 1 – Desempenho da Geração



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Na sequência, observou-se a Taxa de Geração de Energia. Na Figura 13, mostra a Geração Esperada / Geração Medida e sua Porcentagem. Assim, observa-se que as taxas apresentaram até o mês de agosto, um valor positivo, compreendendo a uma média de 99,19% de Geração Medida/Esperada.

Figura 13 - Geração Medida/Esperada

Desempenho da Geração			
Mês	Geração Esperada	Geração Medida	Geração Medida/Esperada
	(MW)	(MW)	
Jan/24	12505	12405	99,2%
Fev/24	11814	11799	99,9%
Mar/24	12583	12351	98,2%
Abr/24	11812	11715	99,2%
Mai/24	11754	11533	98,1%
Jun/24	10099	10110	100,1%
Jul/24	12009	12105	100,8%
Ago/24	13946	13723	98,4%
Set/24	-	-	-
Out/24	-	-	-
Nov/24	-	-	-
Dez/24	-	-	-
Total	96523	95741	99,19%

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Partindo para o histórico de manutenção, foram contabilizados os registros de manutenção preventiva e corretiva, como mostra a Figura 14. Foi possível observar que foram realizadas 1.838 manutenções preventivas, enquanto 99 foram corretivas. Trata-se de um resultado positivo, pois de acordo com o Programa Altener (2004), a manutenção preventiva é a estratégia principal, pois promove economia, faz com que o problema seja detectado antes mesmo de acontecer, garantindo a eficiência e segurança da usina solar (PROGRAMA ALTENER, 2004).

Figura 14 – Plano de Manutenção

Desempenho Plano de Manutenção - Rio do Peixe					
Mês	Atividades Previstas	Preventivas Realizadas	Preventivas Canceladas	Backlog real *	Corretivas Realizadas
Jan/24	250	193	25	0	14
Fev/24	235	218	12	0	19
Mar/24	234	167	28	1	12
Abr/24	200	187	50	6	7
Mai/24	243	210	33	0	5
Jun/24	203	222	12	0	8
Jul/24	296	273	16	4	18
Ago/24	322	180	12	1	16
Set/24	202	-	-	-	-
Out/24	232	-	-	-	-
Nov/24	249	-	-	-	-
Dez/24	212	-	-	-	-
Total	2878	1838		12	99

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Ao observar o funcionamento da usina, é válido acrescentar que os tipos de manutenção preventiva incluíram: Inspeção nos Inversores e Transformadores / Reaperto/Análise de óleo e ensaios elétricos; inspeção nos módulos fotovoltaicos e conexões / Inspeção Termográfica / Limpeza e roçagem.

Outrossim, as atividades de manutenção corretiva foram: Substituição de módulos danificados; reparo em inversores e *strings*; reparo de estrutura de suporte dos módulos; reparo nos *trackers*, sendo detalhadas suas causas raiz no Quadro 1.

Quadro 1 – Detalhamento das Anomalias Encontradas

1) SUBSTITUIÇÃO DE MÓDULOS DANIFICADOS:

Causas raiz:

Microfissuras: Devido a impactos físicos, como granizo, ou tensões térmicas repetitivas que causam trincas e eventual falha dos módulos.

Delaminação: Exposição contínua a condições climáticas severas, como alta umidade e raios UV, que degradam a camada protetora do módulo.

Falhas elétricas internas: Problemas de fabricação, como soldas defeituosas ou desconexões nas células, que levam à perda de eficiência ou curto-circuito.

2) REPARO EM INVERSORES E *STRINGS*:

Causas raiz:

Sobrecarga ou flutuações de tensão: Flutuações na rede ou configuração inadequada dos inversores que causam falhas nos componentes internos, como capacitores e transistores.

Problemas de ventilação: Falta de manutenção no sistema de resfriamento ou obstruções que levam ao superaquecimento e falhas térmicas.

Componentes defeituosos: Erros na fabricação de peças eletrônicas ou desgaste prematuro devido à qualidade inferior dos materiais utilizados.

3) REPARO DE ESTRUTURA DE SUPORTE E MÓDULOS:

Causas raiz:

Corrosão: Falta de proteção adequada contra agentes corrosivos, como salinidade em áreas costeiras, que afeta a integridade das estruturas metálicas.

Fadiga do material: Exposição contínua a vibrações e ventos fortes, que causam microfissuras e desgaste em componentes estruturais ao longo do tempo.

Instalação inadequada: Erros no alinhamento ou fixação dos módulos e suportes que resultam em estresse excessivo e eventual falha das peças.

4) REPARO DOS *TRACKERS*:

Causas raiz:

Problemas mecânicos: Desgaste nos componentes móveis (rolamentos, engrenagens) devido a lubrificação inadequada ou falta de manutenção preventiva.

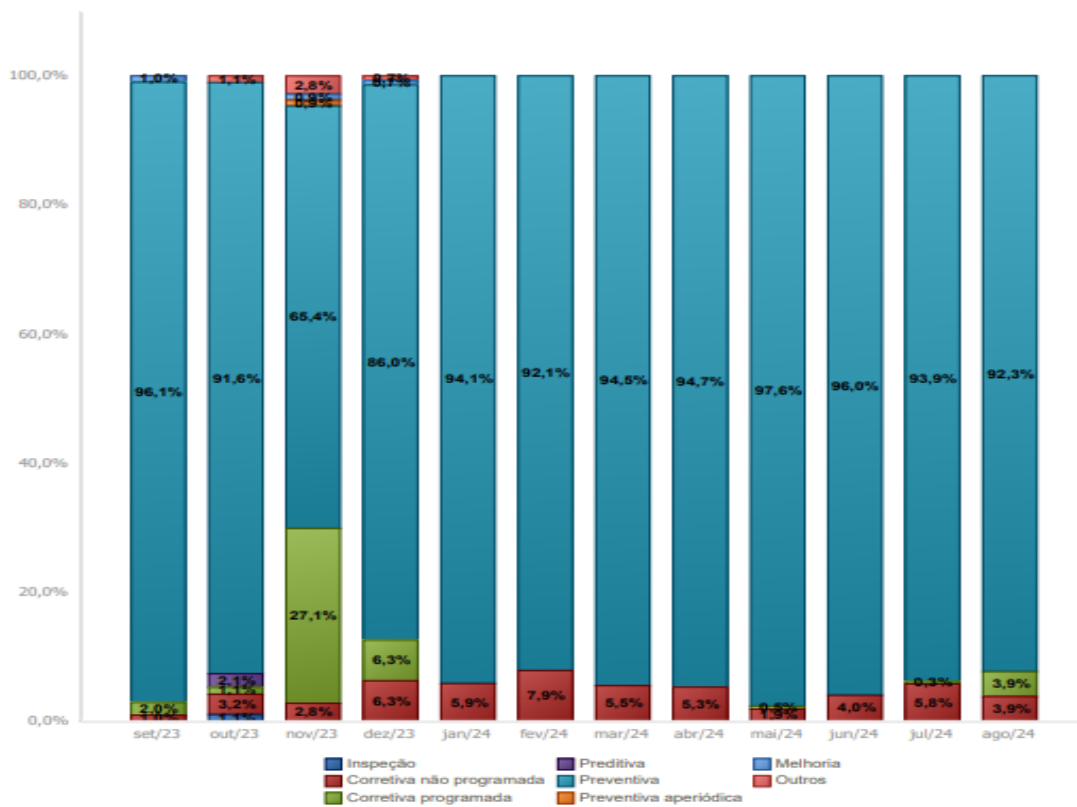
Falhas nos sistemas de controle: Danos em sensores ou controladores devido a exposição ao clima ou problemas de calibração, resultando em movimentação incorreta ou falha no rastreamento.

Instalação inadequada: Montagem fora dos padrões recomendados, o que leva a desalinhamento e falhas estruturais com o tempo.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Na Figura 15, nota-se a quantidade de OS's por tipo de Manutenção, demonstrando que em todos os meses observados a atividade mais realizada foi a Manutenção Preventiva.

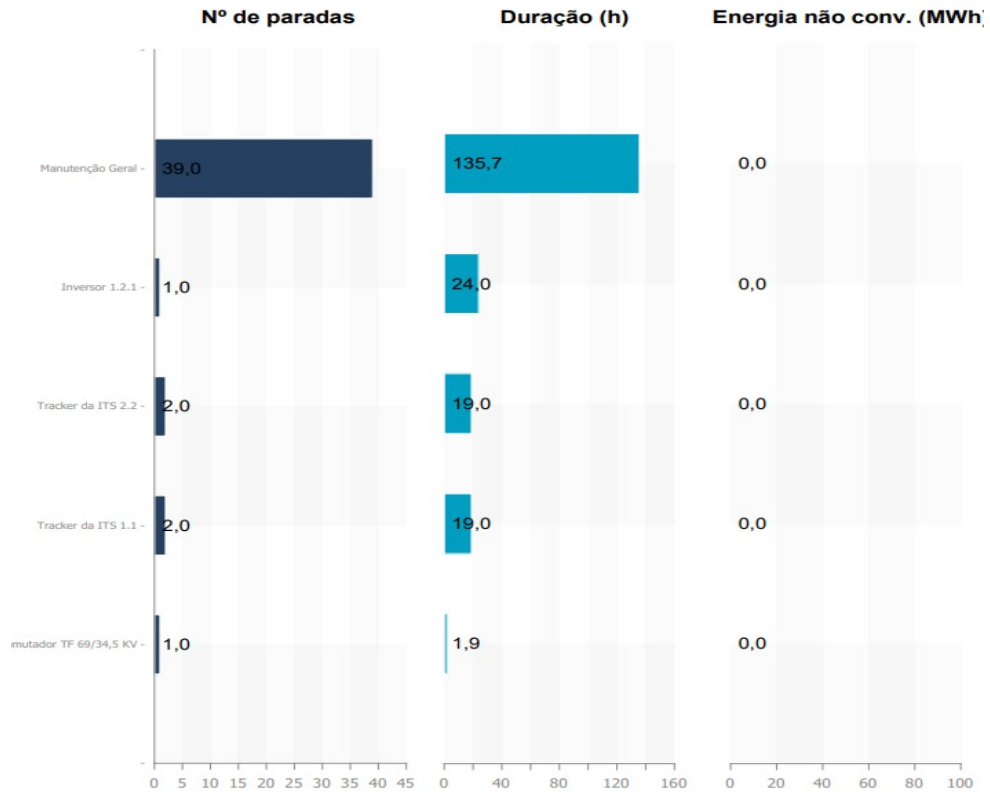
Figura 15 - Quantidade de OS por tipo de Manutenção



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Com o intuito de contabilizar o tempo de inatividade dos equipamentos por conta dessas manutenções realizadas em paradas que foram programadas, chegou-se ao resultado, apresentado na Figura 16, com 45 paradas realizadas, totalizando 199,6 horas, com maior prevalência para realização da Manutenção Geral.

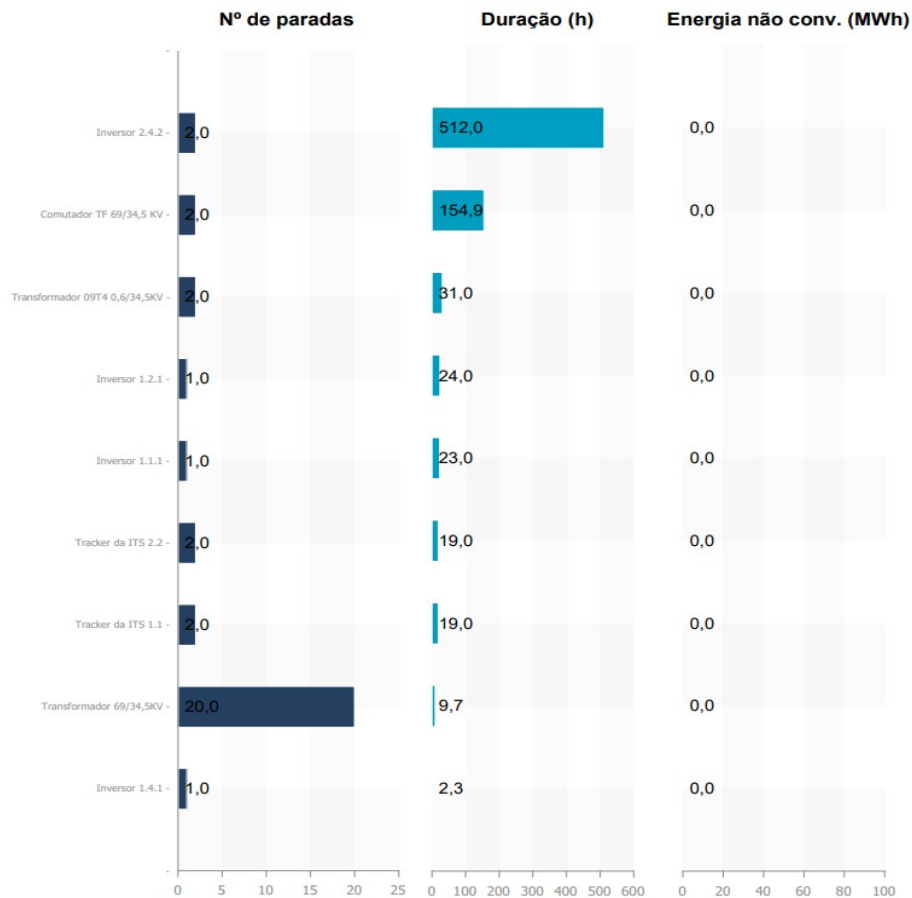
Figura 16 – Paradas Programadas



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

No que tange às paradas forçadas, foram realizadas 33 paradas, contabilizando 794,9 horas paradas, com maior enfoque para o Transformador, que foram necessárias 20 paradas forçadas; no entanto, apesar da pouca quantidade de paradas, sendo apenas 2, o Inversor 2.4.2 teve a duração de 512 horas sem funcionamento, como elucidada a Figura 17.

Figura 17 – Paradas Forçadas



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Os resultados obtidos evidenciam um desempenho positivo da usina, com uma produção total de 95.741 MW e uma taxa média de geração medida/esperada de 99,19% até agosto. Além disso, a eficiência dos módulos solares alcançou 97%, evidenciando a eficácia da instalação e a capacidade de geração de energia. O histórico de manutenção da usina também revelou um bom manejo dos equipamentos, com 1.838 manutenções preventivas e apenas 99 corretivas, o que corrobora as diretrizes do Programa Altener. A predominância da manutenção preventiva é um indicativo de que a usina está implementando estratégias que minimizam riscos de falhas, garantindo não apenas a continuidade da operação, mas também a segurança e a eficiência na geração de energia solar.

A análise detalhada das atividades de manutenção, incluindo inspeções e reparos, ressaltou a importância da manutenção planejada e a identificação de causas-raiz para os problemas enfrentados. O monitoramento das paradas programadas e forçadas revelou que, apesar de um número relativamente baixo de paradas, as que ocorreram demandaram tempo significativo de inatividade,

especialmente em componentes críticos como transformadores e inversores. Esses dados sublinham a necessidade de um planejamento mais eficaz das manutenções, visando reduzir o tempo de inatividade e potencializar a eficiência operacional da usina. Além disso, as análises de causas-raiz sugerem áreas de atenção para futuras intervenções e melhorias na gestão da manutenção, a fim de otimizar a performance e a longevidade dos sistemas fotovoltaicos.

4.2 Dados Financeiros

Partindo para os dados coletados no sob o ponto de vista financeiro, investigou-se a respeito dos Custos de O&M, incluindo mão de obra, peças de reposição e custos indiretos, como apresenta o Quadro 3. Os dados revelam que o valor de contrato chega a 5 milhões, necessitando de 03 profissionais, e com uma margem de lucro de 27%.

Quadro 3 – Custos de O&M

Escopo: Operação e Manutenção (O&M)
Vigência: 01/01/2024 a 01/01/2027
Local do empreendimento: Não está disponível
Valor do Contrato O&M: 5.000.000,00
Pessoal: 03 profissionais
Margem de Lucro: 27%

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Na Figura 14, tais resultados estão detalhados por mês, compreendendo à receita bruta, pessoa, material, serviços, impostos e por fim, a receita líquida. Pode-se dizer que os valores estão balanceados dentro dos meses. Além disso, foi questionado a respeito do retorno sobre o investimento, chegando ao seguinte resultado: O investimento foi de 1 milhão de reais, onde engloba ferramental, equipamentos de proteção EPI's, equipamentos de ensaios, de manutenção e veículo. Tendo em vista esse investimento, levando em consideração que a usina obteve uma receita líquida de aproximadamente R\$ 610 mil reais, a previsão de pagar o investimento é em janeiro de 2025.

Ao investigar o custo por kWh, pode-se dizer que o Custo Nivelado de Energia (LCOE) para Energia Solar tem diminuído significativamente nos últimos anos devido a avanços tecnológicos, reduções nos custos de instalação e maior eficiência dos

painéis solares. Ademais, o preço médio de venda de energia solar no Brasil pode variar de R\$ 0,15 a R\$ 0,25 por MWh, dependendo das características do contrato e do leilão de energia, sendo na usina presente neste estudo de caso o valor de R\$0,25 kWh.

É válido acrescentar que há alguns fatores que influenciam a relação custo-venda, destacando para os incentivos governamentais, como subsídios, créditos fiscais e tarifas de incentivo podem reduzir o LCOE e aumentar a atratividade financeira das usinas solares. Como também, Tecnologia e Eficiência, pois os avanços tecnológicos que aumentam a eficiência dos painéis solares e reduzem custos de instalação, impactam positivamente a relação custo-venda. Outro ponto é a escala da usina, uma vez que usinas de maior escala tendem a ter custos unitários menores devido a economias de escala. Outro assim, são as condições de financiamento, apresentando taxas de juros e termos de financiamento afetam diretamente o LCOE. Por fim, a localização geográfica, pois regiões com alta incidência solar e menores custos operacionais tendem a ter uma relação custo-venda mais favorável.

Sendo assim, os dados financeiros coletados nesta pesquisa indicam um investimento considerável em O&M, com um contrato que totaliza R\$ 5.000.000,00, abrangendo a contratação de três profissionais e uma margem de lucro de 27%, conforme apresentado no Quadro 2. A análise detalhada dos custos mensais na Tabela 3 revelou uma receita líquida aproximada de R\$ 610 mil, com um retorno sobre o investimento estimado para janeiro de 2025. Esses resultados demonstram um equilíbrio nas receitas e despesas, o que sugere uma gestão financeira eficiente, embora a necessidade de monitoramento contínuo seja essencial para garantir a sustentabilidade econômica da usina a longo prazo.

Além disso, o LCOE encontrado de R\$ 0,15 por kWh evidencia a competitividade da usina em relação ao mercado, em que os preços de venda de energia solar variam de R\$ 0,15 a R\$ 0,25 por kWh. Essa variação é influenciada por diversos fatores, incluindo incentivos governamentais, avanços tecnológicos, escala da usina e condições de financiamento. A combinação desses elementos pode melhorar ainda mais a viabilidade financeira do projeto, tornando a energia solar uma opção atrativa. O estudo ressalta que, embora a usina já esteja operando com custos competitivos, a busca contínua por inovações e melhorias na eficiência operacional

será crucial para maximizar o retorno sobre o investimento e fortalecer sua posição no mercado de energia renovável.

4.3 Dados de Confiabilidade

O primeiro ponto a ser analisado nos dados de confiabilidade, foi a questão da frequência de falhas e quebras dos equipamentos. No Quadro 4, é possível observar os equipamentos que falharam, com suas possíveis falhas e causas. Os principais problemas em sistemas de energia solar incluem falhas nos módulos (microfissuras e degradação), inversores (sobreaquecimento e falhas eletrônicas), estruturas de suporte (corrosão e deformações), *trackers* (desalinhamento e falhas mecânicas), cabos e conectores (queimaduras e desgaste), transformadores (curto-circuitos e superaquecimento), sistemas de monitoramento (falhas de comunicação), baterias (degradação e superaquecimento), sistemas de proteção elétrica (falhas em disjuntores) e sistemas de resfriamento (obstruções e vazamentos). As causas mais comuns são sobrecargas, intempéries, exposição prolongada, falta de manutenção e instalação inadequada.

Quadro 4 – Equipamentos, Falhas e Causas

EQUIPAMENTO	POSSÍVEIS FALHAS	CAUSAS COMUNS
Painéis Solares (Módulos)	Microfissuras, delaminação, degradação de células	Impactos físicos (granizo), tensões térmicas, exposição prolongada a UV, defeitos de fabricação.
Inversores	Sobreaquecimento, falhas eletrônicas, perda de eficiência	Sobrecarga elétrica, flutuações de tensão, falta de ventilação adequada, componentes defeituosos.
Estruturas de Suporte	Corrosão, fadiga do material, deformações	Exposição a ambientes corrosivos (salinidade), vibrações constantes, instalação inadequada.
Trackers (Sistemas de Rastreamento)	Desalinhamento, falhas mecânicas, falhas nos sistemas de controle	Desgaste de componentes móveis, lubrificação inadequada, falhas em sensores ou controladores.
Cabos e Conectores	Queimaduras, desgaste, conexões soltas	Sobretensões, intempéries, instalação inadequada, movimentos estruturais.

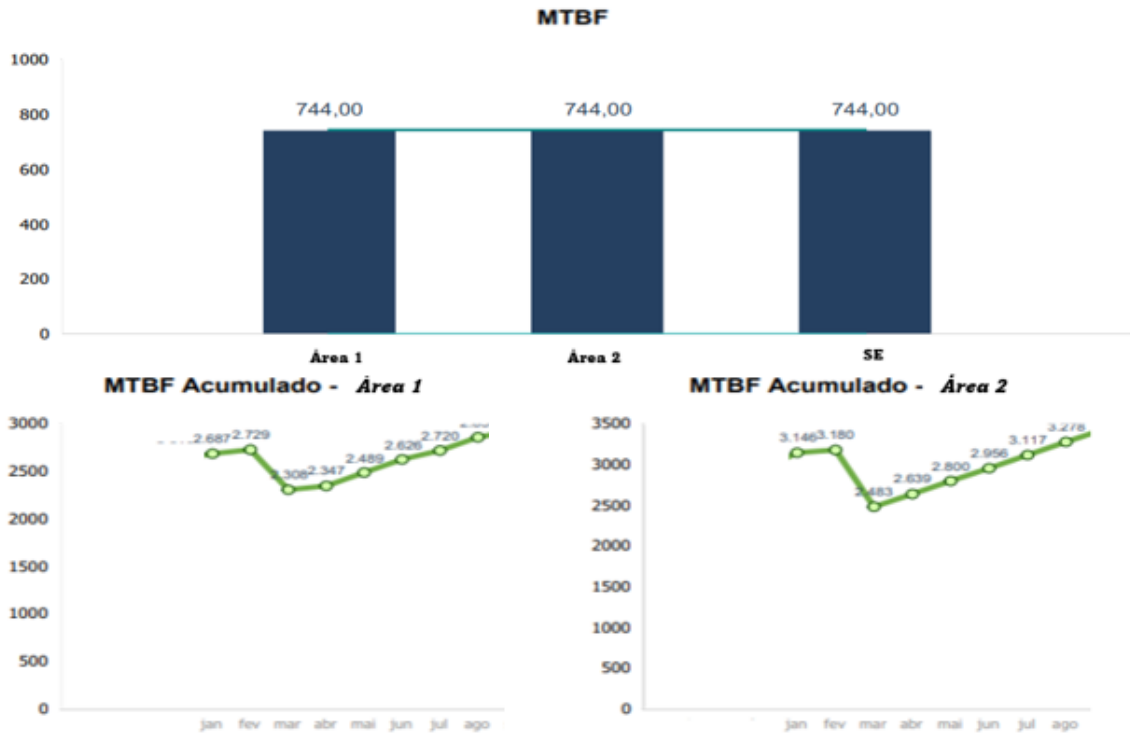
Transformadores	Curto-circuitos, falhas de isolamento, superaquecimento	Sobrecarga, flutuações de tensão, envelhecimento dos materiais, falta de manutenção.
Sistemas de Monitoramento	Falhas de comunicação, erros de sensores	Interferência eletromagnética, problemas de software, desgaste dos sensores.
Baterias (se aplicável)	Degradação, falhas de carregamento, superaquecimento	Ciclos de carga/descarga excessivos, temperaturas extremas, manutenção inadequada.
Sistemas de Proteção Elétrica	Falhas em disjuntores, relés, fusíveis	Sobrecargas, curtos-circuitos, desgaste devido ao uso constante
Sistema de Resfriamento	Obstruções, vazamentos, falhas de bombas	Falta de manutenção, acúmulo de sujeira, desgaste das peças móveis.
Unidades de Medição e Controle	Erros de leitura, falhas de software, desconexões	Problemas de firmware, interferências externas, falhas de hardware.
Sistemas de Iluminação de Segurança	Queima de lâmpadas, falhas elétricas	Sobretensões, falta de manutenção, exposição a condições adversas.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

A fim de investigar o MTBF, o Gráfico 5 apresenta essa apuração, apresentando o tempo médio entre as falhas (horas), expurgando as falhas sistêmicas oriundas de agentes externos e manutenções programadas.

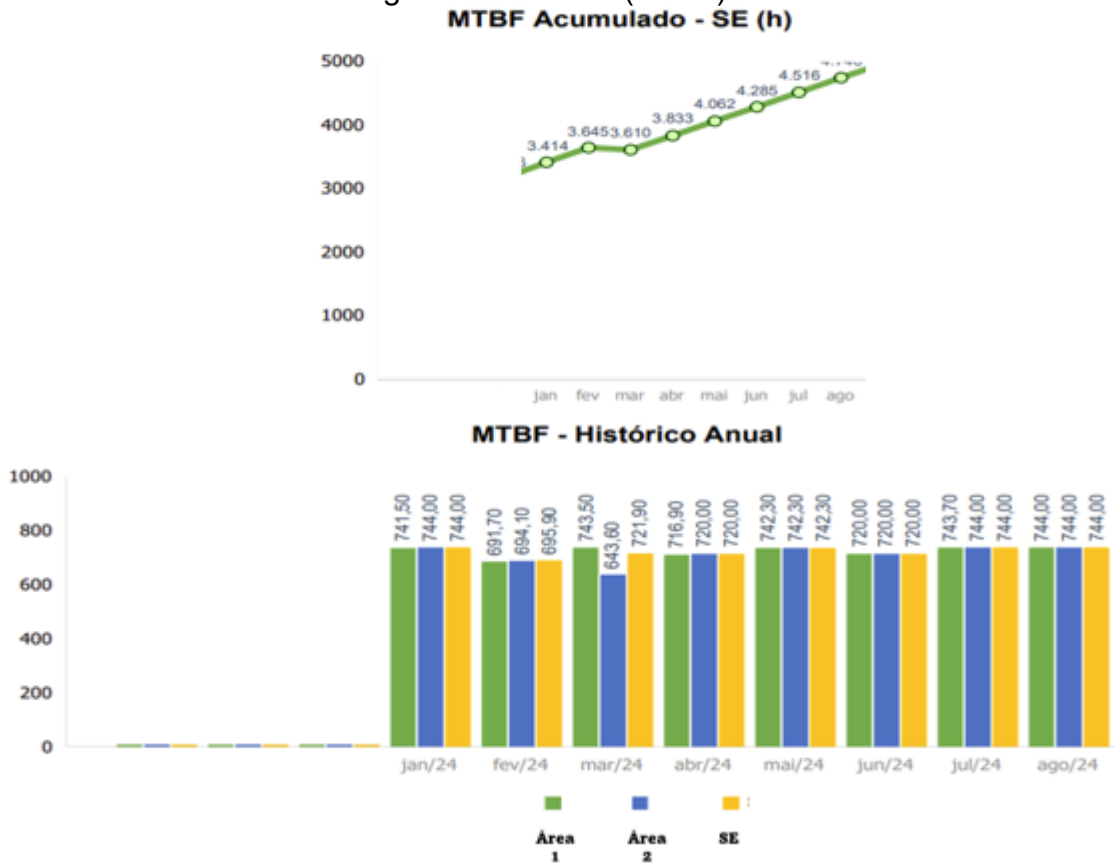
A Figura 18 e a Figura 19 apresentam os resultados do histórico anual, mostrando o somatório de horas em relação a cada mês. Dessa forma, quanto maior o número de horas sem falhas, mais acentuada é a curvatura do gráfico; por outro lado, quanto maior o número de horas com falhas, mais a curvatura decresce.

Figura 18 - MTBF



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Figura 19 – MTBF (Anual)

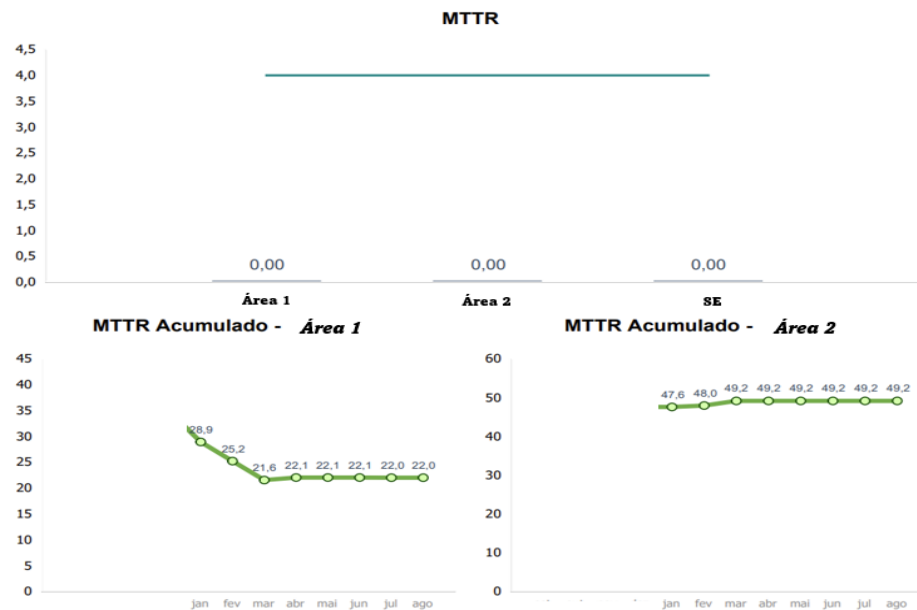


Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

A respeito do MTTR, tem-se o resultado presente no Gráfico 7, considerando o período que a equipe realizou a manutenção corretiva, bem como o tempo dos deslocamentos.

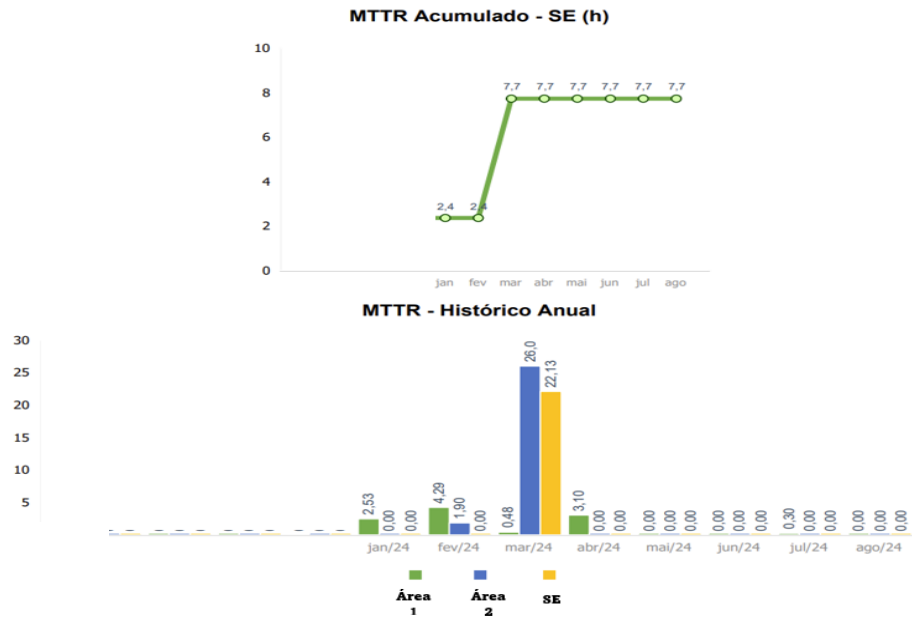
Foi possível observar que o tempo médio de reparo entre falhas foi zero no mês de agosto, indicando uma menor interrupção das operações e, conseqüentemente, um aumento da disponibilidade dos equipamentos. Esses resultados são apresentados nas Figuras 20 e 21, que utiliza o histórico anual para evidenciar a somatória do tempo médio necessário para reparo. Nota-se que, na área 1, houve uma diminuição gradual desse tempo a partir de março, refletindo em uma menor interrupção das atividades. Por outro lado, as áreas 2 e SE registraram um aumento significativo no tempo médio de reparo logo após fevereiro, o que contribuiu para uma maior frequência de interrupções operacionais nessas regiões. Essa análise permite identificar tendências e priorizar intervenções específicas para reduzir os impactos nas operações.

Figura 20 – MTTR



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

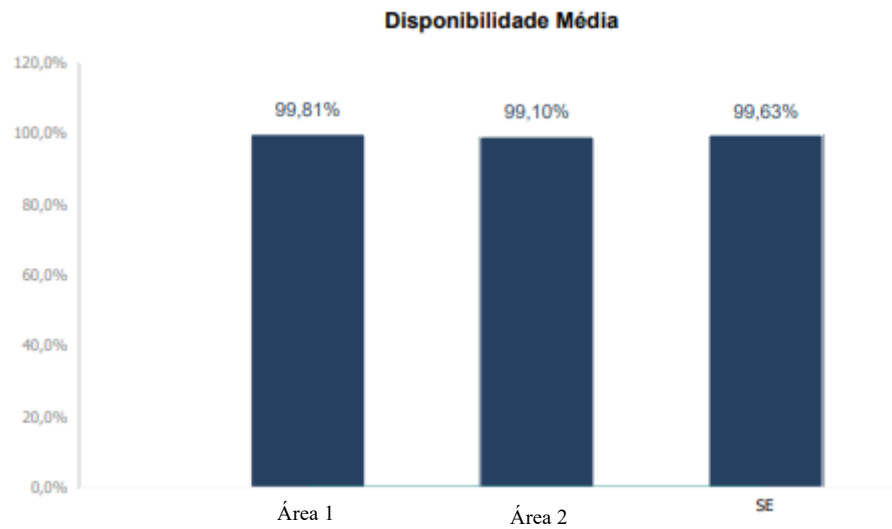
Figura 21 – MTTR (Acumulado)



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

A Figura 22 apresenta a Disponibilidade Média da usina solar, destacando um excelente desempenho operacional com uma média de 99%. Esse nível elevado de disponibilidade reflete a eficácia das práticas de manutenção e operação implementadas, assegurando que a usina permaneça em funcionamento na maior parte do tempo, o que maximiza a geração de energia. Além disso, o índice de 99% evidencia a competência da equipe técnica em antecipar e solucionar falhas de forma ágil, reduzindo interrupções e otimizando a produtividade do parque solar. Esse desempenho não apenas contribui para a segurança e confiabilidade no fornecimento de energia, mas também fortalece a estabilidade financeira e a sustentabilidade do empreendimento.

Figura 22 – Disponibilidade Média



Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Os dados de confiabilidade indicam que, com uma disponibilidade de 99%, a usina solar opera de maneira altamente eficiente e confiável. Esse índice elevado indica que as interrupções operacionais são mínimas, permitindo que a geração de energia atenda às demandas com estabilidade e sem desvios significativos. Em termos de confiabilidade, essa taxa evidencia a capacidade da usina de manter operações consistentes, com uma frequência de falhas extremamente baixa. Esse desempenho sólido reforça a confiança de investidores e consumidores, garantindo um fornecimento de energia consistente. Além disso, contribui para um retorno financeiro sustentável e fortalece o impacto positivo da usina na diversificação e estabilidade da matriz energética.

5 CONCLUSÃO

A operação e manutenção (O&M) de usinas solares tem se mostrado uma prática fundamental no contexto da transição energética global, dado o crescimento acelerado da adoção de fontes renováveis. A relevância dessas práticas decorre de sua capacidade de maximizar o desempenho, a confiabilidade e a rentabilidade das usinas, contribuindo para atender demandas energéticas de maneira sustentável e eficiente.

Neste trabalho, buscou-se compreender como as práticas de O&M impactam diretamente o funcionamento de uma usina solar específica. Por meio de um estudo de caso detalhado, investigaram-se estratégias como manutenção preventiva e monitoramento contínuo, explorando sua relação com a eficiência operacional, os custos envolvidos e os benefícios proporcionados.

Ao longo da pesquisa, foi realizada uma análise abrangente que incluiu a coleta e interpretação de dados operacionais da usina, a avaliação dos custos e benefícios associados às práticas de O&M, e o impacto dessas atividades sobre a confiabilidade, sustentabilidade e desempenho econômico. Além disso, destacou-se a importância do alinhamento dessas práticas com os objetivos ambientais e financeiros.

Os resultados revelaram uma alta taxa de disponibilidade média da usina, de 99%, evidenciando a eficácia das estratégias de manutenção implementadas. O estudo também mostrou que os custos de O&M são viáveis economicamente, com retorno financeiro em curto prazo, e que a predominância de manutenções preventivas reduziu significativamente os riscos de falhas e paradas não programadas, promovendo maior segurança e eficiência na geração de energia.

Com base nos resultados, concluiu-se que a O&M desempenha um papel crucial para o sucesso das usinas solares, garantindo não apenas viabilidade econômica, mas também a sustentabilidade ambiental. As práticas analisadas demonstraram ser indispensáveis para a robustez e longevidade dos equipamentos, destacando a necessidade de melhorias contínuas na gestão de ativos e no treinamento das equipes.

Para estudos futuros, recomenda-se a ampliação do escopo de análise para incluir usinas solares com características regionais e tecnológicas diversas. Essa abordagem pode fornecer uma compreensão mais abrangente sobre como fatores

locais, como clima e infraestrutura, influenciam as práticas e os resultados da O&M, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias ainda mais eficazes.

REFERÊNCIAS

- ARA, A.; *et al.* **Operation & Maintenance – Best Practice Guidelines**. SolarPower Europe. Version 5.0. Europe: dezembro de 2021.
- BEIGELMAN, B.B. **A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar de Tauá**. Projeto de Graduação - Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica (Universidade Federal do Rio de Janeiro), 2013. Disponível em: Acesso em: 29 jun. 2024.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Clima**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- BRASIL. Serviços e Informações do Brasil. **Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável**. Notícias [Energia], 31/10/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/10/brasil-e-referencia-no-campo-da-energia-limpa-e-renovavel>. Acesso em: 29 jun. 2024.
- COSTA, A.L.C.; HIRASHIMA, S.Q.S.; FERREIRA, R.V. **Usinas Fotovoltaicas do Instituto Federal De Minas Gerais – IFMG**: Análise de geração e dos principais desafios relacionados à operação e manutenção dos sistemas. IN: Anais do VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar –Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/905/905>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- CRISPIM, A.L.; *et al.* **Usinas fotovoltaicas do Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG**: Análise de geração e dos principais desafios relacionados à operação e manutenção dos sistemas. Junho de 2020.
- CUNHA, B.P.; AUGUSTIN, S. **Sustentabilidade ambiental**: estudos jurídicos e sociais. 2ed. EDUCS, 2014.
- DACHERY, J. **História da Energia Solar**. Disponível em: <https://energes.com.br/historia-daenergia-solar/>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- EMAP SOLAR. **Área de negócio, O&M**. Disponível em: <https://emapsolar.com.br/area-de-negocio/om>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2003. 543p.
- IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2021**. IEA Publications, 2021.
- IRENA. International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2020**. IRENA Publications, 2020.
- JACOBSON, E.; *et al.* **Desafios da natureza intermitente das fontes de energia solar e eólica**. In: Simpósio Internacional de Energia Limpa, Anais. Rio de Janeiro, p. 112-125, 2020.

LAZARD. LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS — VERSION 6.0. Journal of Language Relationship. Disponível em: <https://www.lazard.com/media/451418/lazards-levelized-cost-of-storage-version-60.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024.

LIVERA, A.; *et al.* **Operation and maintenance decision support system for photovoltaic systems**. IEEE Access. Cyprus: PV Technology Laboratory, FOSS Research Centre for Sustainable Energy, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Cyprus, 2022.

MARQUES, R.C.; KRAUTER, S.C.W.; LIMA, L.C. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 30, n. 2, p. 153-162, dez. 2009. Disponível em: <file:///Users/raquelfranca/Downloads/admin,+artigo1-energiasolar.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MAYA ENERGY. **O&M é indispensável para usinas solares**: Garantindo o máximo desempenho da energia solar. 25/01/2024. Disponível em: <https://mayaenergy.com.br/om-e-indispensavel-para-usina-solar/>. Acesso em: 29 jun. 2024.

MORAIS, C.V.S.; PONTES, I.C.C. **Boas Práticas de Operação e Manutenção em Usinas Fotovoltaicas para uma maior eficiência e confiabilidade**. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), PUC-Rio, 2022. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/60573/60573.PDF>. Acesso em: 26 jun. 2024.

NICOLAI, E.O.P.; NETO, P.C.; SANTOS, R.P. Mercado de Energia Solar no Brasil. **Ciências Exatas e da Terra**; v. 28, n. 135, 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil/>. Acesso em: 29 jun. 2024.

NORR ENERGY. **O&M: Operação e Manutenção**. Maximize a eficiência e a longevidade da sua usina fotovoltaica com O&M, 2024. Disponível em: <https://norrenergia.com.br/servico/om-operacao-e-manutencao/>. Acesso em: 2 jul. 2024.

PASSINI, A. *et al.* **ENERGIA SOLAR NO BRASIL: OPORTUNIDADES E DESAFIOS**. IN: Anais do 6º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE. 23 maio 2023. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2023/XV-006.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2024.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL – CRESESB, março de 2014.

PORTAL SOLAR. **Seguidor solar - tracker: vantagens e desvantagens**, 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/seguidor-solar-tracker-vantagens-e-desvantagens>. Acesso em: 2 jul. 2024.

PROGRAMA ALTENER. **Energia Fotovoltaica**. Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. Janeiro, 2024.

REN21. **RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT**. REN21 Secretariat, Paris, France, 2021. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf. Acesso em: 26 jun. 2024.

SILVA, H. M. F. D.; ARAÚJO, F. J. C. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 859–869, 31 mar. 2022.

SOLFÁCIL. **Quanto kWh gera uma Placa Solar e como calcular a quantidade de painéis?** Artigo, 2024. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/quanto-kwh-gera-uma-placa-solar/>. Acesso em: 2 jul. 2024.

SOLARPRIME. **Cálculo de energia solar: saiba como fazer**. Energia Solar, 2024. Disponível em: <https://solarprime.com.br/calculo-energia-solar-como-fazer/>. Acesso em: 2 jul. 2024.

SOUZA, W. A.; SOUZA, R. C. R.; MINORI, A. M. Boas práticas de manutenção preventiva em sistemas fotovoltaicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 8, p. 12779–12791, 2019.

TANSY, D.; *et al.* **Best Practices of Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems**. National Renewable Energy Laboratory (NREL). 3rd Edition, dezembro de 2018.

TOSI. Indústrias Tosi. **Entenda o processo de fabricação dos painéis solares**, 2024. Disponível em: <https://www.industriastosi.com.br/artigo/entenda-o-processo-de-fabricacao-dos-paineis-solares/>. Acesso em: 2 jul. 2024.

VERGARA, L. *et al.* Avaliação do Conhecimento em O&M de Sistemas Fotovoltaicos Por Profissionais do Mercado de Energia Solar Brasileiro. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Ano 8, v. VIII, n. 2, 2017 p.131-139.

ANEXO A – Solicitação de Autorização para Pesquisa

Prezado(a) Senhor(a),

Solicitamos autorização para realização de uma pesquisa integrante do Trabalho de Conclusão de Curso, modalidade monografia, do acadêmico: Bruno Araújo Pacheco, orientado pelo Professor Doutor José Eduardo H. da Silva, tendo como título “A importância da O&M em Usinas Solares: um estudo de caso”,

O Objetivo Geral da pesquisa é: compreender a importância da Operação e Manutenção em usinas solares, destacando sua influência na performance, confiabilidade e rentabilidade desses empreendimentos, por meio de um estudo de caso.

Os objetivos específicos são: 1) Conceituar Energia Solar Fotovoltaica, trazendo à tona seus princípios e funcionamento. 2) Apresentar conceitos básicos sobre O&M em usinas solares, bem como seus benefícios diante da eficiência operacional. 3) Mostrar o funcionamento de uma usina solar, relatando sua influência na performance, confiabilidade e rentabilidade dessa organização.

A coleta de dados será feita por meio de coletas de dados e por meio da observação em geral.

Salientamos que todos os dados e informações necessárias para a pesquisa serão previamente submetidos à aprovação do responsável pela empresa concedente.

A presente atividade é requisito para a conclusão do Curso de **Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto Ensinar Brasil, Faculdade Doctum de Cataguases.**

Asseguramos que o nome da empresa não será revelado na publicação das informações, caso a empresa faça a opção pelo anonimato.

Agradecemos a atenção e nos colocamos ao inteiro dispor para melhores esclarecimentos.

Cataguases, 02 de Dezembro de 2024.

Acadêmico(a)

Professor(a) Orientador(a)

Deferido () (X) Com anonimato () Sem anonimato

Indeferido ()

Anderson Paiva de Figueiredo

Representante da empresa concedente da pesquisa
Assinatura e carimbo