



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M) EM PARQUES SOLARES:
UMA VISÃO BRASILEIRA E FRANCESA SOBRE O ASSUNTO**

FORTALEZA

2025

LENYSLARA DE SOUSA MEDEIROS

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M) EM PARQUES SOLARES E UMA VISÃO
BRASILEIRA E FRANCESA SOBRE O ASSUNTO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
de Engenharia Elétrica da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M439o Medeiros, Lenyslara de Sousa.
Operação e Manutenção (O&M) em parques solares : uma visão brasileira e francesa sobre o assunto /
Lenyslara de Sousa Medeiros. – 2025.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório.

1. Energia solar. 2. Operação e manutenção. 3. Parques solares. I. Título.

CDD 621.3

LENYSLARA DE SOUSA MEDEIROS

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M) EM PARQUES SOLARES:
UMA VISÃO BRASILEIRA E FRANCESA SOBRE O ASSUNTO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ronny Glauber de Almeida Cacao
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Eletricista João Luiz de Castro Pereira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Jakson e Lenismar.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi um desafio enriquecedor, possível graças ao apoio e incentivo de diversas pessoas e instituições, às quais expresso minha profunda gratidão.

A Deus, por me conceder saúde, perseverança e força para concluir esta etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, Jakson e Lenismar, pelo amor incondicional, apoio e ensinamentos que me moldaram como pessoa e profissional. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório, pela paciência, dedicação e orientação ao longo de toda a pesquisa. Seu conhecimento e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), por proporcionar o ambiente acadêmico necessário para meu crescimento e aprendizado, e à equipe do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo suporte técnico e educacional.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa para o duplo diploma, que me proporcionou uma experiência acadêmica e profissional enriquecedora. Essa oportunidade foi essencial para minha formação e contribuiu significativamente para a realização deste projeto.

Aos colegas de curso que se tornaram amigos que levarei para a vida: Sarah Magna Rodrigues, Roger Lélis, Letícia Carvalho, João Luiz Castro, Igor Leite, Helena Norões e Gabriel Sampaio. Obrigada por terem vivido essa jornada acadêmica comigo, pelos momentos de estudo, desafios superados e pelo companheirismo ao longo desses anos.

Aos meus amigos que dividiram comigo muitos momentos durante os dois anos na França, em especial meus amigos Nathanael Vasconcelos, Ricardo Paiva, Rebeca Albuquerque, Ian Henrique Cardoso e Rafael Janke.

Às minhas amigas Haissa Ramos, Beatriz Torres, Luiza Scalzilli, Leticia Bacelar e Vitória Cuconato pelo apoio incondicional durante todos esses anos e em especial nesses últimos meses tão atarefados. Obrigada por serem meu porto seguro.

Ao meu namorado, Rômulo Rocha, por ser meu parceiro de vida e minha fonte inesgotável de apoio e incentivo. Obrigada por estar ao meu lado em cada desafio, celebrando minhas conquistas como se fossem suas e tornando cada dia mais leve e especial com seu amor.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, meu sincero muito obrigado.

*“A educação deve possibilitar ao corpo e à alma
toda a perfeição e beleza que podem ter”*

Platão

RESUMO

A energia solar fotovoltaica tem se consolidado como uma das principais fontes renováveis de geração de energia, sendo impulsionada pelo crescimento da demanda global por fontes limpas e sustentáveis. No entanto, a eficiência e a longevidade dos parques solares dependem diretamente da implementação de estratégias eficazes de operação e manutenção (O&M). Este trabalho investiga as práticas de O&M adotadas em parques solares, com uma análise comparativa entre Brasil e França. São discutidos temas como comissionamento, manutenção preventiva e corretiva, monitoramento em tempo real e o impacto de novas tecnologias, como inspeção termográfica e *machine learning* para diagnóstico preditivo de falhas. Além da revisão teórica, este estudo apresenta um estudo de caso aplicado a usinas fotovoltaicas no Brasil, analisando indicadores-chave de desempenho energético e operacional. Foram avaliadas métricas como Performance Ratio (PR), fator de capacidade e disponibilidade energética, além da eficiência da limpeza de módulos e a eficácia da inspeção termográfica na identificação de falhas. Já na França, foram analisadas também índices de performance, mas agora para avaliar os efeitos do autossombreamento, influência da temperatura e desempenho dos inversores, além de termos a apresentação de uma atuação na França para garantir a segurança dos colaboradores que acessam ao parque. Os resultados evidenciam que a adoção de estratégias avançadas de O&M, aliadas ao uso de tecnologias inovadoras e gestão eficiente de ativos, podem aumentar a produtividade das usinas e reduzir perdas energéticas. A comparação entre os modelos brasileiro e francês destaca como diferenças estruturais, regulatórias e estratégicas impactam a gestão dos ativos solares em cada país, influenciando custos, eficiência operacional e desafios na implementação das práticas de O&M.

Palavras-chave: energia solar; operação e manutenção; parques solares; Brasil; França.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has established itself as one of the main renewable sources of energy generation, driven by the growing global demand for clean and sustainable sources. However, the efficiency and longevity of solar parks depend directly on the implementation of effective operation and maintenance (O&M) strategies. This paper investigates the O&M practices adopted in solar parks, with a comparative analysis between Brazil and France. Topics such as commissioning, preventive and corrective maintenance, real-time monitoring and the impact of new technologies such as thermographic inspection and machine learning for predictive fault diagnosis are discussed. In addition to the theoretical review, this study presents a case study applied to photovoltaic plants in Brazil, analyzing key energy and operational performance indicators. Metrics such as Performance Ratio (PR), capacity factor and energy availability were evaluated, as well as the efficiency of module cleaning and the effectiveness of thermographic inspection in identifying faults. In France, performance indices were also analyzed, but now to assess the effects of self-shading, the influence of temperature and the performance of inverters, as well as a presentation of an action in France to ensure the safety of employees accessing the park. The results show that the adoption of advanced O&M strategies, combined with the use of innovative technologies and efficient asset management, can increase plant productivity and reduce energy losses. The comparison between the Brazilian and French models highlights how structural, regulatory and strategic differences impact the management of solar assets in each country, influencing costs, operational efficiency and challenges in implementing O&M practices.

Keywords: solar energy; operation and maintenance; O&M ; solar parks; Brazil; France

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Capacidade de Energia Solar Fotovoltaica 2010-2035	17
Figura 2- Ranking mundial da fonte solar fotovoltaica	19
Figura 3 - 10 Maiores mercados de energia solar fotovoltaica	19
Figura 4- Matriz Elétrica Brasileira	20
Figura 5 -Matriz Elétrica Francesa.....	21
Figura 6 - Representação dos componentes de um parque solar	22
Figura 7- Representação da configuração dos painéis fotovoltaicos	23
Figura 8 - Exemplo de configuração em estrutura fixa	24
Figura 9 - Exemplo de configuração com tracker de um eixo	24
Figura 10 - Inversor String	25
Figura 11 - Inversor Central.....	25
Figura 12 - Foto termográfica de um complexo solar.....	34
Figura 13 - Padrões termográficos com falhas e suas possíveis causas	34
Figura 14-Representação de uma planta fotovoltaica na França.....	42
Figura 15 - A Subestação Coletora Bon Nome de 34,5/138kV em Pernambuco	43
Figura 16 - Termografia indicando o efeito de sombreamento	52
Figura 17 - Sombreamento por efeito de objeto	52
Figura 18 - Os PRs ao longo dos anos	54
Figura 19 - Impacto do autossombreamento ao longo das estações	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Médias de temperatura dos inversores no mês de julho em 2022 e 2023.....	56
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Geração solar fotovoltaica em TWh	17
Tabela 2 - Resumo dos métodos estatísticos e de Redes Neurais	38
Tabela 3 - Perdas anuais de PR devido à temperatura	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
O&M	Operação e Manutenção
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados)
ONS	Operador Nacional do Sistema
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
ARIMA	Autoregressive integrated moving average
SARIMA	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average
RNA	Redes Neurais Artificiais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2. ENERGIA SOLAR.....	16
2.1 Energia Solar: Panorama Global.....	16
2.2 Energia Solar: Brasil e França	18
2.3 Elementos constituintes de uma Planta Fotovoltaica	22
3. OPERAÇÃO & MANUTENÇÃO (O&M).....	26
3.1 A importância do O&M em parques solares	26
3.2 Principais práticas de O&M.....	27
3.2.1 Comissionamento	27
3.2.2 Manutenção Preventiva	29
3.2.3 Manutenção Corretiva	30
3.2.4 Monitoramento em tempo real:.....	30
3.2.5 Segurança e saúde ocupacional	31
3.2.6 Gestão de Suprimentos e logística.....	32
3.3 Tecnologias e Inovações de O&M em parques solares.....	33
3.3.1 Inspeção Termográfica.....	33
3.3.2 <i>Machine Learning</i> para detecção de falhas	36
3.3.3 Limpeza de módulos fotovoltaicos	40
4. ANÁLISE COMPARATIVA: BRASIL vs. FRANÇA	41
4.1 Estrutura e Desenvolvimento dos Parques Solares	41
4.2. Políticas e Regulamentações	43
4.3. Práticas de O&M no Brasil.....	47
4.3.1 Análise de índices de desempenho energético e operacional	47
4.3.2 Inspeção Termográfica e Limpeza de módulos FV	50
4.4. Práticas de O&M na França.....	52
4.4.1 Avaliação do Desempenho Operacional de Usinas Solares na França	52
4.5 Estudo de caso do próprio autor	55
4.6 Desafios e Oportunidades em O&M	58
4.6.1. No Brasil	58
4.6.2. Na França	59
4.6. Comparação e Contrastes	61
5 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A transição energética global tem impulsionado a diversificação da matriz elétrica, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e mitigando impactos ambientais. Dentro desse cenário, a energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais fontes renováveis em expansão. No Brasil e na França, apesar de contextos energéticos distintos, o crescimento da energia solar tem sido expressivo, impulsionado por políticas de incentivo e avanços tecnológicos.

No Brasil, a energia solar atingiu 43 GW de capacidade instalada em janeiro de 2025, tornando-se a segunda maior fonte da matriz elétrica nacional (ANEEL/ABSOLAR, 2025). A rápida expansão do setor exige práticas eficientes de Operação e Manutenção (O&M) para garantir a confiabilidade e a longevidade dos empreendimentos, minimizando custos

operacionais. Além disso, desafios climáticos, como altas temperaturas e acúmulo de poeira em módulos fotovoltaicos, impactam diretamente a eficiência das usinas solares no país (ABSOLAR, 2024).

Na França, o setor fotovoltaico também tem experimentado um crescimento significativo, com uma capacidade instalada de 23,7 GW até setembro de 2024 (Ministère de la Transition Écologique, 2024). O país estabeleceu metas ambiciosas, visando 48,1 GW até 2030 e 140 GW até 2050. No entanto, variações sazonais da radiação solar demandam estratégias específicas de O&M para otimizar o desempenho das usinas (PV Magazine France, 2024).

1.1 Motivação

Diante desse cenário de grande expansão da energia solar, a implementação de estratégias eficazes de O&M é essencial para garantir a eficiência operacional e a competitividade da energia solar no mundo. Portanto, este trabalho busca apresentar novas práticas de O&M solar que estão sendo aplicadas e, além disso, analisar e comparar as práticas de O&M no Brasil e na França, identificando desafios, oportunidades e lições que possam contribuir para a otimização da gestão de usinas solares fotovoltaicas.

1.2 Objetivos

Nesse tópico serão apresentados os objetivos gerais e específicos desse trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar práticas de O&M solar e fazer uma comparação das práticas de Operação e Manutenção (O&M) aplicadas em parques solares no Brasil e na França.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar as particularidades das práticas de O&M adotadas em parques solares nos dois países, considerando aspectos regulatórios, climáticos e tecnológicos.
- Identificar desafios comuns e específicos enfrentados na gestão da O&M em cada contexto.
- Avaliar as oportunidades de melhoria que podem ser aplicadas para otimizar a eficiência e reduzir custos operacionais.
- Apresentar recomendações baseadas na comparação entre os dois países para aprimorar as estratégias de O&M.

1.3 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho adota uma abordagem baseada em artigos científicos e relatórios técnicos, abordando estratégias de O&M, desafios e inovações tecnológicas do setor. Em seguida, a análise de estudos de caso considera usinas reais em ambos os países, avaliando aspectos como modelos de manutenção, impacto das condições climáticas e uso de tecnologias avançadas.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos:

O capítulo 1 consiste em uma introdução geral acerca do tema, definindo os objetivos do trabalho, a metodologia e a forma de organização do estudo.

O capítulo 2 apresenta a energia solar, seu panorama mundial e onde se encontram a França e o Brasil nesse contexto de geração. Além de apresentar os principais componentes de uma usina solar.

No capítulo 3 será abordado o que é o O&M, seus objetivos, seus princípios e as atividades principais que são de sua responsabilidade, além de apresentar práticas inovadoras que estão sendo aplicadas por essas equipes no mundo em parques solares.

No capítulo 4 serão apresentados estudos de casos de práticas de O&M nos dois países e serão evidenciadas as comparações e contrastes entre esses países no que tange às atividades de O&M, às regulamentações e desafios.

Por fim, no capítulo 6 está a conclusão do estudo, com os resultados que se pode absorver acerca do que foi apresentado.

2. ENERGIA SOLAR

2.1 Energia Solar: Panorama Global

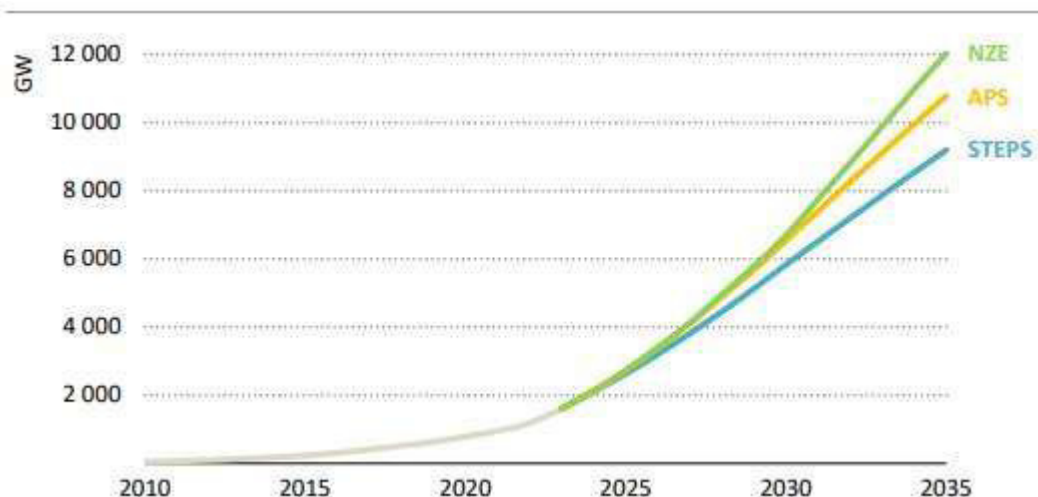
Ao longo da história, o sol sempre ocupou um lugar central na vida humana, sendo venerado como uma divindade em muitas culturas antigas, como a egípcia e a inca, devido à sua importância vital para a agricultura e a sobrevivência. Com o avanço do conhecimento científico durante o Renascimento, o entendimento do sol evoluiu de um objeto de adoração para um astro a ser estudado (PERLIN, 2011). No século XIX, descobertas científicas como o efeito fotovoltaico por Alexandre Edmond Becquerel e a criação da primeira célula fotovoltaica por Charles Fritts abriram caminho para o uso do sol como fonte de energia. A partir de meados do século XX, com o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, os seres humanos começaram a aproveitar diretamente a energia solar para gerar eletricidade, marcando uma transformação significativa na forma como utilizamos os recursos naturais para atender às nossas necessidades energéticas (PERLIN, 2011).

A utilização da energia solar continua crescendo em ritmo acelerado, com um aumento de mais de 80% em 2023, atingindo um novo recorde de 425 GW de capacidade instalada. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pela China, que sozinha respondeu por mais de 60% das novas instalações. A rápida expansão da fabricação de módulos solares no país resultou em uma redução de 50% nos custos dos módulos fotovoltaicos desde dezembro de 2022, aumentando a competitividade da energia solar e incentivando sua adoção globalmente (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

As economias avançadas também contribuíram significativamente para esse crescimento, com adições de quase 60 GW na União Europeia e mais de 30 GW nos Estados Unidos. Em outras regiões do mundo, a capacidade solar fotovoltaica adicionada em 2023 ultrapassou 70 GW.

Atualmente, a energia solar representa pouco mais de 5% da geração elétrica mundial, mas esse número deve aumentar para 17% até 2030, alinhando-se com o compromisso da COP28 de triplicar a capacidade renovável até o final da década. Até 2035, a energia solar superará a geração a carvão e a gás para se tornar a principal fonte de eletricidade no mundo, alcançando 25% da geração total no cenário STEPS, 30% no APS e 35% no NZE. Esse crescimento acelerado exige maior flexibilidade nos sistemas elétricos para garantir a segurança do fornecimento de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

Figura 1- Capacidade de Energia Solar Fotovoltaica 2010-2035



Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024

A International Energy Agency analisa no seu relatório anual três cenários possíveis. O primeiro considerando que o crescimento seguirá uma tendência abaixo da média, na média e acima da média.

Ainda analisando a produção de energia solar em escala global, tem-se o seguinte histórico e projeção para os anos seguintes:

Tabela 1- Geração solar fotovoltaica em TWh

	Histórico			Políticas Declaradas		Compromissos Anunciados	
	2010	2022	2023	2030	2050	2030	2050
Mundo	32	1294	1612	6452	21557	7512	28996
América do Norte	3	210	247	904	3633	1157	4282
Estados Unidos	3	184	212	833	3434	1075	3697
América Central e América do Sul	0	55	78	16	588	358	1327
Brasil	0	30	49	129	253	197	440
Europa	23	250	293	871	1632	1021	1863
União Europeia	22	206	240	705	1303	827	1352
África	0	15	19	136	645	294	1835
Oriente Médio	0	16	23	213	967	275	2298

Rússia	0	3	3	5	10	8	27
Ásia	6	742	946	4092	14047	4380	17290
China	1	427	584	3001	9800	3092	10688
Índia	0	105	125	539	2552	557	3450
Japão	4	93	100	168	250	171	263
Sudeste Asiático	0	40	45	108	640	215	1681

Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024

A tabela acima mostra a trajetória de crescimento da geração de energia solar fotovoltaica em várias regiões do mundo. Em 2022, a geração global de energia solar alcançou 1.294 TWh, com a China liderando com 742 TWh. Em 2023, a geração global subiu para 1.612 TWh.

Sob o cenário de políticas declaradas, a geração global deve crescer para 6.452 TWh em 2030 e 21.557 TWh em 2050. Caso os compromissos anunciados nos acordos climáticos sejam cumpridos, esse crescimento será ainda mais expressivo, atingindo 7.512 TWh em 2030 e 28.996 TWh em 2050.

No Brasil, a geração de energia solar fotovoltaica foi de 30 TWh em 2022 e 49 TWh em 2023. As projeções indicam um aumento para 129 TWh em 2030 e 253 TWh em 2050, seguindo as políticas declaradas. No cenário de compromissos climáticos, o crescimento esperado é ainda maior, chegando a 153 TWh em 2030 e 327 TWh em 2050.

Esses dados destacam o papel da energia solar na matriz energética global e a influência das políticas e compromissos climáticos na aceleração dessa expansão, destacando que a expansão da energia solar é algo mundial e essa demanda exigirá cada vez mais de estudos e tecnologias para melhor gerir os ativos.

2.2 Energia Solar: Brasil e França

Após abordar uma visão global da energia solar, o foco se volta para as particularidades e progressos específicos no Brasil e na França, que serão abordados nesse trabalho. Como visto anteriormente, pode-se perceber a importância do Brasil na geração de energia solar no mundo, visto que ele é um dos países que tem uma análise em evidência em muitos relatórios de energia. E isso não é por acaso, sendo o 6º maior produtor mundial de energia solar e quarto maior mercado mundial em 2023 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR

FOTOVOLTAICA, 2024). No Brasil, a energia solar tem experimentado um rápido crescimento impulsionado pela abundância de recursos solares e pelo apoio governamental às energias renováveis. A capacidade instalada de energia solar no país tem aumentado significativamente, contribuindo para a diversificação da matriz energética nacional.

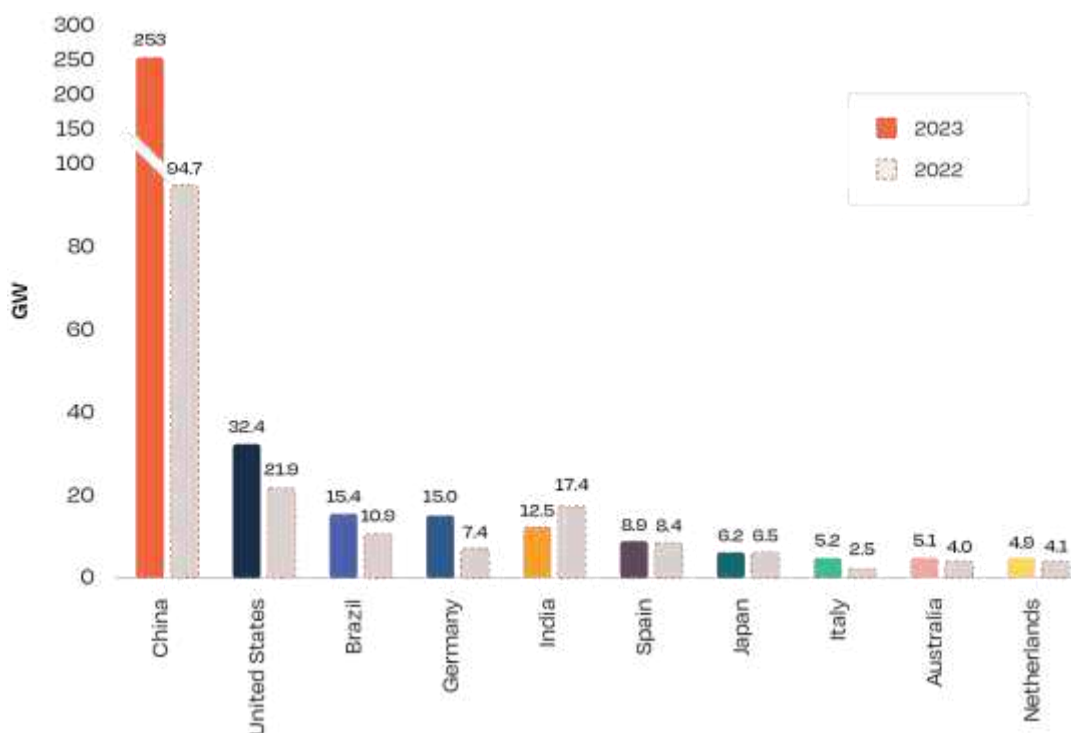
Figura 2- Ranking mundial da fonte solar fotovoltaica

Capacidade instalada anual				Capacidade instalada acumulada			
1º		China	216,9 GW	1º		China	609,3 GW
2º		EUA	24,8 GW	2º		EUA	137,7 GW
3º		Alemanha	14,2 GW	3º		Japão	87,1 GW
4º		Brasil	11,9 GW	4º		Alemanha	81,7 GW
5º		Índia	9,7 GW	5º		Índia	72,7 GW
6º		Itália	5,2 GW	6º		Brasil	37,4 GW
7º		Espanha	4,8 GW	7º		Austrália	33,6 GW
8º		Japão	4,0 GW	8º		Itália	29,8 GW
9º		Austrália	3,7 GW	9º		Espanha	28,7 GW
10º		Polônia	3,6 GW	10º		República da Coreia	27,0 GW

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2024)

E o reflexo desse papel de destaque em potência instalada anual e acumulada é no tamanho do mercado de solar fotovoltaica do Brasil, onde ele se configura como o quarto maior mercado nos anos de 2023 e 2022. Como mostra gráfico a seguir:

Figura 3 - 10 Maiores mercados de energia solar fotovoltaica



Fonte: SOLARPOWER EUROPE, 2024

Com esse avanço, hoje a matriz elétrica conta com a energia solar como a terceira principal fonte, representando 18,6% do total em 2024, segundo a figura a 4.

Figura 4- Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024

Diferentemente do Brasil que configura entre os principais protagonistas em recurso e produção fotovoltaica, na França a energia solar faz parte de uma estratégia abrangente de transição energética, com investimentos contínuos em tecnologias limpas e metas ambiciosas para a redução das emissões de carbono e diminuição da pendência do país da energia nuclear. O país busca equilibrar a geração solar com outras fontes renováveis, promovendo políticas que incentivam a adoção de sistemas fotovoltaicos em residências e indústrias.

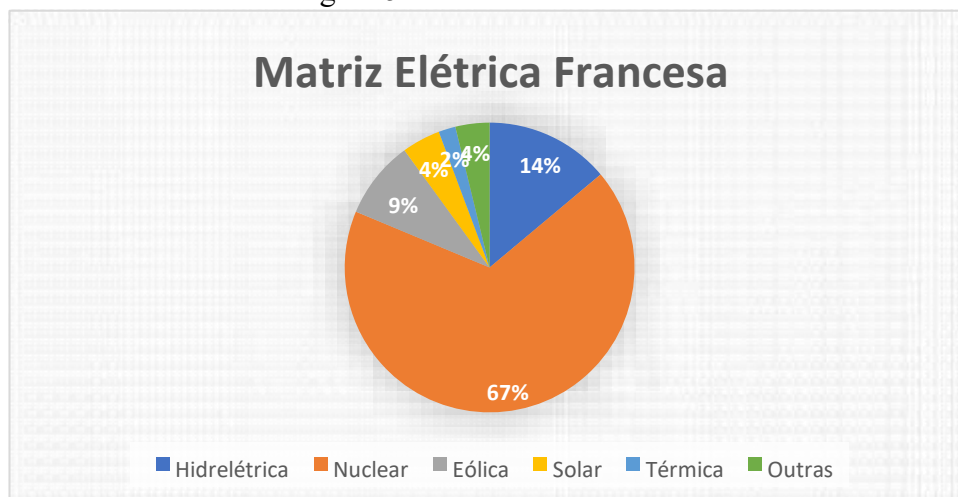
A energia solar na França tem se destacado por seu crescimento acelerado e ambiciosas metas estabelecidas pelo governo. Em 2022, a frota solar francesa conectou 2.385 MW adicionais, ultrapassando a marca de 16 GW ao final do ano. A produção de eletricidade a partir de fontes fotovoltaicas atingiu 19,1 TWh em 2022, representando um aumento de 30% em relação a 2021, chegando a representar 7% da matriz elétrica francesa em 2023.

(INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

As metas de longo prazo, definidas pela *Loi de transition énergétique pour la croissance verte* (Lei de Transição Energética para o Crescimento Verde, FRANÇA, 2015) e reforçadas pela *Loi sur le climat et l'énergie* (Lei do Clima e Energia, FRANÇA, 2019) e pela *Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE)* (FRANÇA, 2020), visam uma capacidade solar instalada entre 35,1 GW e 44 GW até 2030. Para 2050, o objetivo anunciado pelo presidente Emmanuel Macron é alcançar 140 GW de instalações solares. O desenvolvimento é impulsionado principalmente por chamadas de propostas anuais, isenções de procedimentos de licitação para instalações menores e um forte incentivo à pesquisa e desenvolvimento no setor.

A seguir, a composição da matriz elétrica francesa é apresentada na figura 5:

Figura 5 - Matriz Elétrica Francesa



Fonte: ADAPTADO RTE, 2025

Dessa maneira, na França está tendo um crescimento da participação da energia solar na sua matriz elétrica, muito por incentivos governamentais com o objetivo de tornar a matriz elétrica francesa mais verde.

Essas duas nações, Brasil e França, exemplificam o potencial da energia solar em contextos diversos, destacando a adaptabilidade e a importância dessa fonte energética no combate às mudanças climáticas.

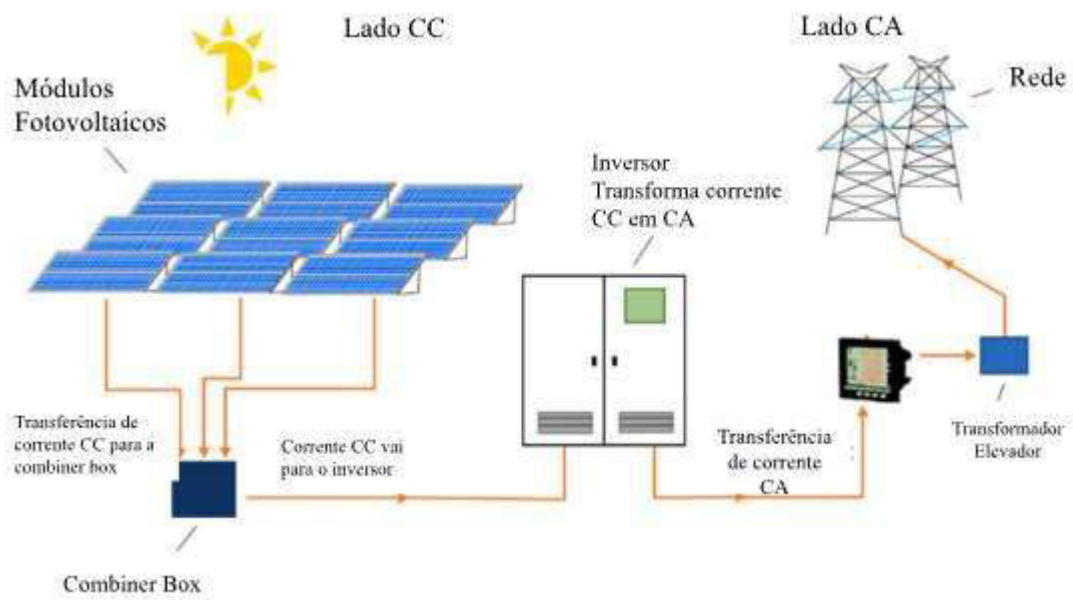
Agora que já é conhecido o panorama global de expansão e desenvolvimento da energia solar, bem como a situação brasileira e francesa. Faz-se necessário o entendimento dos componentes principais que constituem um sistema fotovoltaico.

2.3 Elementos constituintes de uma Planta Fotovoltaica

Nesse tópicos serão apresentados os elementos básicos que constituem um parque solar, bem como o seu funcionamento, para o melhor entendimento do que será discutido durante esse trabalho.

A figura 6 a seguir ilustra os principais componentes de atenção para as equipes de O&M das grandes centrais eólicas ligadas à rede de distribuição.

Figura 6 - Representação dos componentes de um parque solar

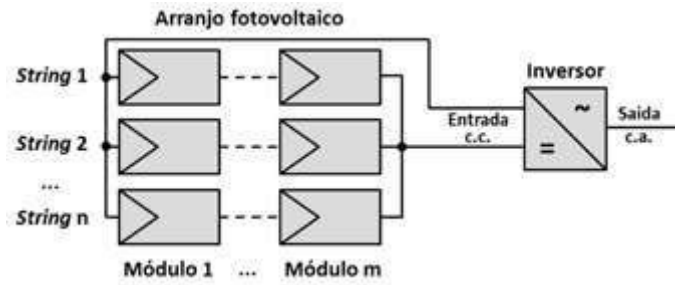


Fonte: ADAPTADA HØIAAS et al., 2022

2.3.1 Módulos ou painéis fotovoltaicos:

Os painéis solares são responsáveis por captar a energia solar e a transformar em energia elétrica, em corrente contínua, por meio do efeito fotoelétrico. Cada painel possui uma corrente e uma tensão de saída, que multiplicados resulta na potência de saída. Contudo, a potência gerada por um único módulo é relativamente baixa, dessa maneira, para aumentar a capacidade do sistema, os painéis são conectados em série, de forma que a tensão final é o resultado da soma da tensão individual de cada módulo. Esse conjunto de módulos conectados em série é chamado de *string*. Para aumentar a corrente, várias *strings* são interligadas em paralelo, esse aumento ocorre linearmente ao número de módulos conectados, garantindo maior geração de energia. Contudo, esse aumento precisa ser bem dimensionado para minimizar as perdas nas linhas.

Figura 7- Representação da configuração dos painéis fotovoltaicos



Fonte: O SETOR ELÉTRICO, 2020

2.3.2 Suporte metálico:

Os painéis fotovoltaicos são montados sobre estruturas metálicas, chamados *trackers* (do inglês rastreador), que podem ser de três tipos: fixa, *tracker* de um eixo e os *tracker* de dois eixos. No tipo fixa, os módulos não alteram sua orientação ao longo do dia, permanecendo sempre perpendiculares ao sol. No tipo *tracker* de um eixo, os painéis se movem em apenas um eixo ao longo do dia, sempre em busca da melhor direção para a captação da irradiância solar. Por último, para suporte com *tracker* de dois eixos, como o próprio nome sugere, os painéis se movimentam em dois eixos ao longo do dia. Em complexos que são adotados os *trackers*, a luz solar colhida é maximizada. Contudo, a implementação desses mecanismos tem altos custos de investimento e manutenção. Estima-se que o emprego desse sistema pode aumentar a produção em 30% para os *trackers* de um eixo e até 40% para os de dois eixos em comparação aos de estrutura fixa (AZAM et al, 2024).

Figura 8 - Exemplo de configuração em estrutura fixa



Fonte: Próprio Autor

Figura 9 - Exemplo de configuração com *tracker* de um eixo



Fonte: NEXANS, 2018

2.3.3 Inversores:

Os inversores são as estruturas que recebem a energia gerada nos módulos, em corrente contínua (CC), e a transforma em corrente alternada (CA), em conformidade com a rede de distribuição e transmissão. Podem ser de dois tipos: inversor de *string* e inversor central. Os inversores *strings* podem ser empregados desde em plantas menores como em grandes complexos. Já os centrais são projetados para grandes de projetos, com potência instalada a partir de 1MWac.

Figura 10 - Inversor String



Fonte: A2 ENERGIA, 2017

Figura 11 - Inversor Central



Fonte: SUNGROW, 2023

2.3.4 As estações de transformação:

Nelas, a energia, transformada de corrente contínua para alternada nos inversores, de baixa tensão para alta tensão para padrões que permitam a conexão com a rede. Numa mesma usina, podemos ter vários pontos de transformação.

Por fim, a energia agora em alta tensão se conecta à rede de transmissão.

Com esses elementos básicos conhecidos, é possível avançar para a análise da atuação de O&M nos parques solares, uma vez que O&M intervém diretamente nesses componentes para garantir a eficiência e a máxima geração dos ativos.

3. OPERAÇÃO & MANUTENÇÃO (O&M)

Como visto, a energia solar é uma fonte em expansão no mundo todo. Sendo peça fundamental para a descarbonização das matrizes energéticas de muitos países. E para além de apenas gerar, é necessário que essas plantas sejam bem geridas.

Para isso, no universo das energias renováveis, o O&M refere-se ao conjunto de atividades e práticas necessárias para garantir que os sistemas de energia renovável, como parques solares, eólicos e outros, funcionem de maneira eficiente, segura e confiável ao longo de sua vida útil. Isso inclui a inspeção regular, monitoramento, reparos, limpeza, ajustes e quaisquer outras ações necessárias para manter o desempenho ideal dos equipamentos e maximizar a produção de energia (COSTA et al, 2021).

3.1 A importância do O&M em parques solares

Sendo assim, dentro de uma empresa de energias renováveis, o O&M é a equipe responsável por administrar os recursos de produção de um ativo. Após a sua construção, visto que os parques são sistemas dinâmicos compostos por elementos elétricos e mecânicos e estes estão em constante contato com o mundo externo, os parques precisam ser constantemente monitorados para garantir sua melhor performance. É nesse contexto que a equipe de O&M assume a responsabilidade de administrar a produção dessas centrais, de maneira a assegurar que os ativos tenham retornos de produção maximizados, redução do tempo de intervenção e tempo inatividade mínimo (HARRIS WILLIAMS, 2023).

Pesquisas desenvolvidas nos EUA mostram o quanto parques eólicos e solares perdem eficiência com o passar dos anos, nos solares pode-se chegar a um declínio de desempenho de cerca de 1,2% por ano e por planta e 1 % para as turbinas eólicas (HARRIS WILLIAMS, 2023). E por outro lado, se boas estratégias de O&M forem aplicadas, elas podem ser responsáveis por elevar cerca de 5,27% de geração para uma central fotovoltaica de 16,1 MW, o que é equivalente a 10.000 dólares anuais por MW (WALKER, 2018). Já sem boas estratégias de O&M, estimava-se que a indústria global pode enfrentar uma perda de 14,5 bilhões de dólares até 2024 (LIVERA et al, 2022).

Por isso, é crucial importância que as empresas geradoras de renováveis tenham equipes de O&M fortes e tecnológicas para lidar com o avanço dos anos sobre os equipamentos e, consequentemente, sobre a produção energética.

3.2 Principais práticas de O&M

Nesse tópico serão apresentadas as principais atividades que são de responsabilidade da equipe de O&M, além de princípios que devem nortear a execução dessas práticas.

3.2.1 Comissionamento

Comissionamento consiste em inspeções e testes feitos nas plantas antes de ligá-las à rede. Isso garante que as plantas obedecem aos critérios exigidos em norma e estão aptas para uma geração segura. No Brasil, os testes de comissionamento devem obedecer às diretrizes do submódulo 2.10 do ONS (Operador Nacional do Sistema), que determina os requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações transmissoras. Esses testes são importantes ainda mais porque essas plantas serão adicionadas no Sistema Interligado Nacional (SIN) e qualquer perturbação que possa ser gerada pode comprometer todo o sistema.

Diversas normas são usadas para guiar os pré-requisitos a serem observados durante o comissionamento, tanto levando em conta o complexo como todo como cada equipamento individualmente. Dentre as normas nacionais e internacionais que são seguidas para o comissionamento no Brasil, destaca-se as seguintes:

- ABNT NBR 16274 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho;
- IEC 62446-1 – Photovoltaic (PV) Systems – Requirements For Testing, Documentation And Maintenance – Part 1: Grid Connected Systems – Documentation, Commissioning Tests And Inspection;
- ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão;
- NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade;
- NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto (Projeto de Norma – em consulta pública);
- ABNT NBR 16149 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;

- ABNT NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV;
- ABNT NBR 5419 - Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas;
 - ABNT NBR 15749 – Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento;
 - NBR 5426 – Planos de amostragem e procedimentos na inspeção por atributos;
 - IEC 60364-6 – Low-voltage electrical installations – Part 6: Verification;
 - IEC 60364-7-712 – Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems;
 - IEC 62548 – Photovoltaic (PV) arrays – Design requirements;
 - IEC 61010 (all parts) – Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use.

Na França, além das normas internacionais citadas acima, são adotadas outras normas e regulamentações francesas no processo de comissionamento. A seguir, algumas normas e leis que são adotadas na França para a conexão de centrais fotovoltaicas à RTE (*Réseau Transport Électricité*)

- NF C15-712-1: Focada nas instalações fotovoltaicas conectadas à rede de distribuição pública, esta norma especifica as condições particulares para a conexão e os critérios de segurança que devem ser atendidos.
- UTE C15-712-2: Complementando a NF C15-712-1, esta norma aborda as instalações fotovoltaicas autônomas, fornecendo diretrizes para sistemas não conectados à rede pública.

A observação dessas normas é executada desde a fase de construção do parque até o comissionamento propriamente dito. Este último é dividido em três partes: inspeção, ensaios e avaliação de desempenhos (KIKUMOTO, 2019).

A inspeção consiste em uma avaliação visual, sem utilização de equipamentos de medição, cujo principal objetivo é avaliar se todas as instalações estão conforme o projeto de construção e se elas apresentam qualidade e segurança, para isso é avaliado todas as placas de identificação de todos os componentes, bem como se todos os equipamentos conferem em número e em especificações com os documentos de construção.

Já os ensaios são feitos com a utilização de equipamentos de medição que obedeçam às normas IEC 61557 e IEC 61010, cujo objetivo é identificar possíveis falhas nos equipamentos instalados nos parques, e segundo a norma NBR 16274, os ensaios de categoria. Neles são feitos testes, por exemplo, de continuidade de ligação à terra, de polaridade, de resistência de isolamento de isolamento de circuitos CC, ensaios termográficos etc.

Por fim, há a avaliação de desempenho cujo objetivo é analisar se a planta está produzindo a energia que se espera. Essa avaliação é feita através da análise da energia que cada inversor está entregando nos pontos de conexão e o índice de performance utilizado para esta análise é o PR (Performance Ratio). O Performance Ratio (PR) é a razão entre a produção medida e a produção esperada para um determinado período de análise, com base na capacidade nominal do sistema, segundo a IEC 61724 (HUKSEFLUX,2023). A produção esperada é a produção calculada usando o modelo de desempenho ao inserir os dados meteorológicos medidos. A NBR 16274 estabelece os procedimentos para calcular o PR de acordo com a irradiação solar, temperatura, energia, tensão e corrente elétrica. Dessa maneira, pode-se avaliar se o parque solar está produzindo o esperado de energia.

3.2.2 Manutenção Preventiva

Segundo a NBR 5462, manutenção preventiva é “a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, sendo destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ABNT, 1994, p. 7).

Nesse contexto, a equipe de O&M é responsável por gerir e planificar essas manutenções em planos anuais, mensais, trimestrais etc. É necessário agrupar todas as inspeções esperadas para cada equipamento presente nas plantas, englobando desde inversores e painéis solares a ar-condicionados que estão nas cabines de trabalho dos técnicos de O&M ou de equipamentos sobressalentes que estão nos almoxarifados.

As preventivas são de suma importância pois nos parques solares estão presentes equipamentos elétricos e mecânicos que possuem ciclos de vida e se desgastam com o tempo de utilização. Dessa maneira, uma forma de aumentar o tempo de operação desses equipamentos é planificar e executar bem as manutenções preventivas.

O tempo previsto para cada equipamento, geralmente, é especificado pelos fabricantes e se este não houver, existem normas que podem fornecer orientações quanto a frequência de preventivas ou mesmo boas práticas de mercado que são replicadas para a manutenção dos equipamentos.

3.2.3 Manutenção Corretiva

Segundo a NBR 5462, manutenção corretiva é “a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, sendo destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ABNT, 1994, p. 7).

Dessa maneira, a manutenção vem para reparar danos aos equipamentos e fazê-los voltar ao funcionamento pleno.

Ela compreende dois tipos:

- **Manutenção Corretiva Não Planejada:** Também conhecida como manutenção corretiva de emergência, ocorre quando uma falha inesperada interrompe a operação normal do equipamento, exigindo uma intervenção imediata para minimizar o tempo de inatividade e evitar prejuízos adicionais.
- **Manutenção Corretiva Planejada:** É realizada em resposta a uma falha prevista ou identificada durante inspeções regulares, mas que não requer uma ação imediata. Nesse caso, os reparos são agendados para um momento oportuno, com o objetivo de minimizar o impacto na produção e maximizar a eficiência dos recursos.

Embora a manutenção corretiva seja essencial para restaurar a operacionalidade de equipamentos após falhas, ela pode ser mais custosa e menos eficiente do que a manutenção preventiva, uma vez que geralmente requer tempo adicional para diagnóstico, reparo e possíveis paradas não planejadas na produção. Portanto, estratégias eficazes de gestão de ativos frequentemente combinam a manutenção corretiva com a manutenção preventiva, visando minimizar o risco de falhas e maximizar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

3.2.4 Monitoramento em tempo real:

Nesse ponto, destaca-se a parte operacional da equipe de O&M, que se diz ao monitoramento 24 horas de todos os ativos. Toda empresa de geração de energia renovável possui um centro de operação da geração (COG) que é responsável por monitorar os parques em tempo real. Esses centros são equipados com telas onde se pode observar todos os parâmetros vitais para a produção de energia nos parques, além da situação dos equipamentos da planta. Além do monitoramento em tempo real, as funções dos COGs são:

- **Controle e Supervisão:** Capacidade de realizar ajustes e intervenções remotas para otimizar o desempenho das instalações, como controlar a operação de turbinas eólicas ou ajustar os parâmetros de inversores solares.

- Diagnóstico de Falhas: Identificação rápida de problemas ou falhas nos sistemas, com capacidade de tomar medidas corretivas imediatas para minimizar o tempo de inatividade e maximizar a produção de energia.
- Manutenção Programada: Agendamento e coordenação de atividades de manutenção preventiva e corretiva, incluindo inspeções, reparos e substituição de componentes, para garantir a confiabilidade e a segurança das instalações.
- Gestão de Alarmes e Emergências: Monitoramento de alarmes e eventos de emergência, com procedimentos de resposta rápida para lidar com situações críticas, como falhas de equipamentos ou condições climáticas extremas.
- Análise de Dados e Otimização: Utilização de análise de dados e modelagem para identificar padrões de desempenho, prever tendências futuras e implementar medidas para otimizar a eficiência e a rentabilidade das operações.

Em resumo, um COG garante que as plantas operem de forma confiável, eficiente e segura.

3.2.5 Segurança e saúde ocupacional

Nesse tópico, destaca-se um princípio que norteia todas as práticas e até mesmo pode ser o objetivo de algumas atividades executadas pelas equipes de O&M dentro dos parques solares que é a segurança.

Os parques solares contêm estruturas e equipamentos que estão energizados, ou seja, há passagem de corrente e uma tensão associada. Executar trabalhos nessas condições exigem cuidados a serem observados para garantir a segurança dos colaboradores que executam suas tarefas técnicas de manutenção. Dessa maneira, algumas intervenções em campo podem acontecer não por motivo de pane em algum equipamento, mas por necessidade de segurança e saúde dos colaboradores. Assim, há sempre nas empresas de geração de energia renovável um setor que trabalha no campo de HSE (Health, Safety and Environment) ou SSMA (Saúde, Segurança e Meio Ambiente) em português responsável por padronizar práticas de segurança no trabalho, especialmente em campo. Nessa equipe, destaca-se o técnico de segurança que fica nos parques e são responsáveis por vistoriar se as atividades estão sendo feitas com a proteção devida. Além disso, a equipe de engenharia de O&M é responsável por elaborar documentos de processos e procedimentos que devem ser respeitados ao se realizar determinada atividade em campo, sempre buscando o bom manuseio dos equipamentos de trabalho bem como a segurança dos técnicos.

É importante destacar algumas práticas que são realizadas para garantir a segurança no trabalho em parques solares:

- **Treinamento e Capacitação:** treinamento adequado aos funcionários sobre práticas seguras de trabalho, procedimentos operacionais, uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) e medidas de segurança específicas para o ambiente de trabalho.
- **Identificação e Avaliação de Riscos:** realizar avaliações de riscos regulares para identificar potenciais perigos no local de trabalho, incluindo riscos ergonômicos, químicos, físicos e biológicos.
- **Implementação de Controles de Segurança:** instalação de proteções em máquinas, sinalização de áreas perigosas e implementação de procedimentos de trabalho seguro.
- **Comunicação e Conscientização:** Promover uma cultura de segurança no local de trabalho, incentivando a comunicação aberta sobre questões de segurança, relatos de incidentes e participação ativa dos funcionários na identificação e solução de problemas de segurança.
- **Uso Adequado de EPIs:** Garantir que os funcionários usem adequadamente os equipamentos de proteção individual (EPIs) fornecidos, como capacetes, óculos de proteção, luvas, protetores auriculares e calçados de segurança.
- **Gestão de Emergências:** Desenvolver planos de emergência e procedimentos para lidar com situações de emergência, como incêndios, vazamentos de produtos químicos ou acidentes graves, e realizar treinamentos regulares para garantir a prontidão da equipe.
- **Ergonomia no Trabalho:** Implementar medidas ergonômicas para reduzir o risco de lesões musculoesqueléticas relacionadas ao trabalho, como ergonomia adequada do posto de trabalho, levantamento seguro de cargas e alternância de tarefas.

3.2.6 Gestão de Suprimentos e logística

Por último, uma outra frente que é muito importante, mas por vezes esquecida que é a gestão de suprimentos. Essa subequipe é responsável pela compra de materiais e por gerir contratos com fornecedores e provedores de serviços para garantir a execução das atividades em campo. Por exemplo, para executar manutenção em equipamentos em altura é necessário que o técnico seja elevado por alguma estrutura elevadora. Nesse contexto, é necessário orçar com fornecedores o valor para ter essas estruturas elevadoras, que geralmente não estão presentes no dia a dia nos parques.

3.3 Tecnologias e Inovações de O&M em parques solares

3.3.1 Inspeção Termográfica

Após a apresentação de práticas fundamentais e dos princípios que orientam as atividades de O&M, este tópico abordará tecnologias já adotadas por equipes de manutenção em parques solares, bem como inovações que vêm sendo aplicadas no setor de O&M solar.

Muitos fatores influenciam que práticas mais inovadoras e tecnológicas sejam requeridas na inspeção de parques solares. Desde fatores físicos, como o crescimento dos ativos tanto em número como em dimensão, a estatísticos, como a previsão que cerca de 2% dos módulos fotovoltaicos vão falhar após 11 ou 12 anos, sem cumprir assim a garantia do fabricante (WALKER,2018).

Os parques solares são monitorados através da equipe de O&M, onde são acompanhados dados operacionais, como a produção de energia elétrica e irradiância solar. Esses dados são comparados com valores esperados, que foram previamente simulados antes mesmo da energização desses complexos, para esses parâmetros e, através dessa comparação, diagnosticar possíveis problemas de performance dessas centrais geradoras.

Em caso de sub performance, conclui-se que há falha em alguma parte do complexo, e identificar o local exato da falha pode não ser uma tarefa tão simples, tendo em vista a quantidade de cabos, *strings* e módulos presentes na planta, ainda mais quando se leva em conta que muitas vezes a inspeção é feita manualmente e por identificação visual.

Para agilizar essa detecção de falha, uma das estratégias utilizadas é a tecnologia de imagem para analisar e caracterizar as falhas nos módulos fotovoltaicos. Destaca-se, nesse ramo, a investigação de falhas através da termografia com a utilização ou não de veículos não tripulados para a captura das imagens.

A termografia é uma técnica de imagem infravermelha utilizada para capturar e visualizar a radiação térmica emitida por objetos, transformando-a em imagens que representam a distribuição de temperatura. Dessa maneira, na manutenção de parque solares, essa análise termográfica deixa em evidências “pontos quentes” que podem indicar células defeituosas, conexões soltas ou mesmo resíduos acumulados (HØIAAS et al, 2022).

A imagem a seguir ilustra o resultado desses registros termográficos:

Figura 12 - Foto termográfica de um complexo solar



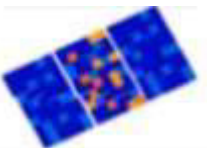
Fonte: ENERGIA SOLAR SHOP

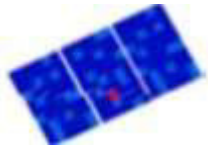
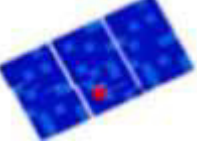
Em condições normais, espera-se que todos os módulos fotovoltaicos tenham uma distribuição de temperatura uniforme, com leves discrepâncias nas bordas dos arranjos, normalmente, devido a níveis de irradiância mais altos nessas estruturas.

A maioria das falhas que acontecem nos módulos geram temperaturas elevadas nas regiões que ocorrem, causando diferenças na temperatura, gerando não uniformidades na imagem capturada pela câmera termográfica. Esse é um método bastante eficaz na detecção de falhas que não seriam detectadas visualmente nos módulos.

As falhas que podem ser capturadas pela câmera termográfica são as apresentadas nos padrões da figura 13:

Figura 13 - Padrões termográficos com falhas e suas possíveis causas

Padrão	Descrição	Possível causa
	Um módulo mais quente que os outros	Módulo está em circuito aberto, ou seja, não está conectado ao sistema
	Uma linha de <i>string</i> é mais quente que as outras	Sub-string em curto-circuito ou aberta
	As células individuais são mais quentes sem um padrão aparente	Todo o módulo está em curto-circuito

	As partes inferiores são mais quentes que as superiores e intermediárias	Shunts massivos causados por degradação induzida por potencial ou polarização
	Uma célula claramente mais quente que as outras	-Efeito sombreamento - Célula com defeito ou célula delaminada
	Parte de uma célula é mais quente	- Célula quebrada - Interconexão de <i>string</i> desconectada
	Aquecimento pontiagudo	- Presença de objeto - Parcialmente sombreado
	Uma parte da <i>sub-string</i> é notavelmente mais quente que as demais quando igualmente sombreadas	<i>Sub-string</i> com diodo bypass ausente ou em circuito aberto.

Fonte: ADAPTADO HØIAAS et al, 2022

A captura de imagens termográficas é, geralmente, executada através de uma inspeção, com um sensor infravermelho portátil, que é feita por um operador humano. Essa maneira de execução não é a mais eficiente porque consome muito tempo. Por exemplo, uma planta de 3MW de potência instalada e com 1742 módulos, necessitou de 34 dias úteis para capturar todas as termografias e mais 26 dias úteis para analisá-las (GALLARDO-SAAVEDRA; HERNÁNDEZ-CALLEJO; DUQUE-PÉREZ, 2019). Além de não ser a maneira mais eficiente, pois essa forma de análise depende muito da subjetividade humana e do manuseio da máquina pelo operador.

Assim, o que se emprega mais ultimamente é inspeção termográfica feita com o auxílio de veículos não tripulados, os chamados drones. Dessa maneira, o tempo gasto para a captura das imagens chega a ser 10 vezes menor do que o do método tradicional (GRIMACCIA, F. et al, 2018). A subjetividade humana, por sua vez, foi resolvida através do emprego de algoritmos inteligentes de processamento de imagens.

3.3.2 *Machine Learning* para detecção de falhas

Uma outra inovação de O&M em parques solares é a orientada por dados. Trata-se da utilização de *Machine Learning* para detecção e diagnóstico de falhas na execução de manutenções preditivas (GONZALO; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2020).

A manutenção preditiva tem um papel importante dentro do O&M por permitir a atuação em manutenções antes do desgaste total do equipamento, salvando-o de um problema futuro que possa causar paradas na produção de energia. Mesmo que os fornecedores dos equipamentos solares garantam a vida útil deles de em torno 20 anos, as incertezas quanto ao clima, à instalação deles, à deficiência de fabricação e as eventuais dificuldades de integração com a rede podem aumentar a probabilidade de falha do sistema fotovoltaico.

Nesse sentido, pesquisadores têm buscado acompanhar variáveis em modelos matemáticos que geram parâmetros de comparação entre a produção estimada em simulação com a real de acordo com os parâmetros gerados. Assim a manutenção é programada antes do equipamento parar sua operação.

O uso da manutenção preditiva com modelos matemáticos em sistemas fotovoltaicos baseia-se na coleta e análise de dados de parâmetros críticos, como temperatura ambiente, temperatura das células solares e irradiância solar, sendo as duas últimas as que se mostraram mais cruciais para uma melhor predição (AYVAZOĞLUYÜKSEL; FILIK, 2018). Esses elementos são fundamentais para prever o desempenho e identificar anomalias nos sistemas.

Diferentes técnicas de previsão já foram analisadas, incluindo modelos estatísticos lineares, como ARIMA e SARIMA, e métodos de aprendizado de máquina, como redes neurais artificiais (RNA). Esses últimos se destacam pela capacidade de modelar comportamentos complexos e estocásticos, proporcionando maior precisão em horizontes de curto prazo.

No modelo ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), ou Modelo de Média Móvel Integrada Autoregressiva, que é uma técnica estatística amplamente usada para a modelagem e previsão de séries temporais que combina três componentes principais: autorregressão (AR), integração (I), e média móvel (MA).

Usada no contexto de auxiliar a prever manutenções preditivas, O ARIMA é usado para prever variáveis como a irradiância solar, a temperatura ambiente e a temperatura da célula fotovoltaica, estabelecendo uma previsão do valor esperado para um dado parâmetro em condições normais de operação. Comparando os valores reais observados com os valores previstos pelo modelo, é possível identificar desvios que indicam possíveis problemas ou falhas nos sistemas. Como o ARIMA se baseia em padrões históricos de séries temporais, ele é

especialmente eficaz para prever variações de curto prazo em parâmetros meteorológicos, que são voláteis e podem apresentar comportamentos cíclicos ou sazonais. Contudo, o modelo apresenta limitações quando confrontado com padrões não lineares ou altamente estocásticos, o que é comum em sistemas fotovoltaicos devido às condições variáveis do clima. Para superar esses desafios, seria interessante a integração do ARIMA com métodos mais avançados, como redes neurais artificiais, criando soluções híbridas capazes de aumentar a precisão e a robustez das previsões.

No método SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average), que também é um modelo estatístico e uma extensão do modelo ARIMA, projetado para incluir sazonalidade nas séries temporais. Ele é ideal para lidar com flutuações periódicas, como padrões diários, mensais ou sazonais em variáveis climáticas. Assim como no ARIMA, ele é usado para prever parâmetros como irradiância solar e temperatura ambiente, mas agora que possuem padrões sazonais claros, sendo assim capaz de capturar comportamentos estocásticos e sazonais em dados de irradiância solar. Assim, é um método adequado para previsões de curto e médio prazo, especialmente em escalas mensais ou semanais, sendo mais preciso em sistemas com comportamento cíclico, como os fotovoltaicos que dependem da exposição ao sol. Contudo, assim como o ARIMA, ele não é eficiente na captura de comportamentos não-lineares, que podem ocorrer em sistemas com grande variabilidade climática. E assim como o ARIMA, para lidar com não linearidades, o SARIMA pode ser combinado com outros modelos, como redes neurais artificiais.

Já nas Redes Neurais Inteligentes (RNA), elas são capazes de capturar relacionamentos complexos e não lineares entre os dados, algo que modelos estatísticos tradicionais, como ARIMA, têm dificuldade em fazer. Assim, as RNA's "aprendem" padrões e comportamentos a partir de grandes volumes de dados históricos, ajustando seus pesos internos para melhorar a precisão das previsões. Essa característica é especialmente relevante para prever condições climáticas voláteis e comportamentos de falha em sistemas solares.

Devido à essa característica de ajuste aos comportamentos não lineares que esse método é eficaz mesmo em condições com incertezas e variabilidades, comuns no contexto fotovoltaico. As RNA podem ser adaptadas para diferentes tipos de entradas (dados meteorológicos, elétricos ou ambos) e escalas temporais e, por isso, podem ser utilizadas tanto para predições de curto prazo quanto para monitoramento contínuo.

Apesar de ser o método mais eficaz para predição de anomalias, tanto empregado individualmente ou de maneira híbrida com os demais métodos estatísticos apresentados anteriormente, ele possui desafios por requerir um grande volume de dados de alta qualidade

para treinamento, o que pode ser uma limitação para o seu emprego em várias plantas fotovoltaicas com pouca infraestrutura de monitoramento. Além da complexidade de configuração de uma rede neural para processamento de tantos dados como o custo para essa implementação.

A seguir uma tabela resumo das três abordagens apresentadas para uma melhor previsão e planificação de manutenções preditivas usando métodos estatísticos ou *Machine Learning*:

Tabela 2 - Resumo dos métodos estatísticos e de Redes Neurais

Categoria	Método	Horizonte de tempo de previsão	Vantagens	Desvantagens
Modelos Lineares Estocásticos	ARIMA	Curto Prazo: de minutos a um dia de antecedência	-Estável em condições normais - Mais eficiente de 5 min a 4h - Modelagem precisa de comportamentos lineares	-Impreciso para previsões de longo prazo -Grandes erros em condições climáticas extremas -Desempenho ruim na captura de não linearidades
	SARIMA	Curto Prazo	-Pode captar o comportamento estocástico da irradiância solar	-Captura ineficiente de não-linearidades
Aprendizado de Máquina	RNA	Curto prazo: Por hora e por dia	-Pode modelar não-linearidades -Capacidade de aprendizado -Pode modelar parâmetros estocásticos e caóticos	-Alto custo computacional de implementação -Dependência da qualidade e da quantidade de dados

Fonte: ADAPTADA GONZALO; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2020

Uma aplicação prática desses métodos é apresentada por (ZULFAUZI et al., 2023). O estudo propõe um modelo de *machine learning* para detecção de anomalias e manutenção preditiva em usinas solares fotovoltaicas de grande escala. A abordagem combina os algoritmos *K-Means* e *Long Short-Term Memory (LSTM)* para analisar o comportamento elétrico dos módulos solares e identificar padrões que indiquem falhas.

Inicialmente, dados de corrente elétrica dos módulos, irradiância global e temperatura são coletados e processados. O algoritmo *K-Means* agrupa esses dados em clusters para reduzir a complexidade da análise. Em seguida, o modelo é treinado para prever a corrente elétrica esperada nos módulos de cada cluster, permitindo a detecção de desvios anômalos que possam indicar falhas potenciais. A eficácia do LSTM demonstrou precisão na identificação de anomalias e com um baixo erro relativo.

A metodologia apresentada oferece uma alternativa eficiente para reduzir custos operacionais e otimizar a manutenção de usinas solares, minimizando inspeções manuais e melhorando a confiabilidade da geração de energia.

Ademais, uma outra abordagem de *Machine Learning* em O&M solar é visto no estudo de (MIQUELA,2023). O estudo propôs um modelo baseado no uso de veículos aéreos não tripulados (UAVs) e aprendizado de máquina para a detecção automatizada de falhas em sistemas fotovoltaicos. A pesquisa foi estruturada em três etapas principais: coleta de dados, processamento e modelagem de machine learning.

Na fase experimental, um drone foi utilizado para capturar imagens de um sistema fotovoltaico instalado no Energy Lab da Rutgers University. Durante um período de observação entre 2022 e 2023, o UAV coletou 93 imagens de alta resolução sob diferentes condições climáticas, registrando três categorias principais: painéis saudáveis, painéis cobertos por neve e painéis com sombreamento. Além das imagens, também foram coletados dados meteorológicos, como temperatura do ar, velocidade do vento e precipitação.

Após a coleta de dados, as imagens foram pré-processadas para remover fundos indesejados e focar apenas nos painéis solares. Para aumentar o conjunto de dados e melhorar a precisão do modelo, foi aplicada técnica de aumento de dados (*data augmentation*), gerando um total de 465 imagens com diferentes rotações e espelhamentos.

Na etapa de modelagem, foi utilizado um modelo baseado em *deep learning*, chamado MultiNet, que combinou redes neurais para extração de características das imagens e dados meteorológicos como variáveis auxiliares.

Por fim, a abordagem foi avaliada em comparação com outros métodos e os resultados indicaram que o MultiNet obteve a maior precisão (95,6%), demonstrando a eficácia da

combinação de imagens aéreas e aprendizado de máquina para otimizar a manutenção preditiva em usinas solares.

Assim, pode-se concluir que o *Machine Learning* já é uma realidade na operação e manutenção (O&M) de sistemas solares, proporcionando uma maneira mais eficiente e ágil de identificar e prever potenciais problemas. Dessa forma, a aplicação de métodos de *Machine Learning* em O&M solar tem um potencial revolucionário, transformando a maneira como esses sistemas são monitorados e gerenciados.

3.3.3 Limpeza de módulos fotovoltaicos

Nesse tópico será abordado um problema recorrente em parque solares que é o trato das deposições sólidas sobre os módulos. Esse fator pode ser determinante na redução da produção em plantas fotovoltaicas devido ao acúmulo de poeira e detritos sólidos sobre os painéis. Nesse sentido, uma outra tecnologia de O&M aplicada em parques solares é a análise de sujeira e análise dos mecanismos de falha e degradação em módulos fotovoltaicos (CONCEICAO, Ricardo et al, 2022).

O acúmulo de partículas compromete o desempenho das tecnologias solares ao reduzir a captura eficiente da luz solar pelos coletores, devido à absorção e dispersão causadas por essas partículas, com impacto mais significativo em regiões de clima árido e semiárido. Atualmente, o estudo do acúmulo de sujeira em sistemas de energia solar é crucial, pois ele impacta diretamente os custos de O&M, especialmente os relacionados à limpeza (FATHI; ABDERREZEK; GRANA, 2017) e à degradação óptica causada pela abrasão das superfícies (KLIMM et al., 2015).

É um desafio quantificar a perda em desempenho e energia que partículas sólidas acumuladas sobre os painéis podem provocar. Historicamente, na literatura há diversos estudos que comprovam que essa perda pode chegar a 4,7% no desempenho de coletores solares térmicos (WARD, G. T, 1955). Por isso, técnicas de mitigação e limpeza são aplicadas para solucionar esse problema.

Nesse sentido, há dois tipos de abordagem. A limpeza passiva e a limpeza ativa. Na primeira, nenhuma energia é gasta, nem com outras ferramentas ou fluidos de limpeza. Essas técnicas são divididas em limpeza natural por meio de chuvas e revestimentos anti-sujeira, sendo este último considerado o método mais promissor por possuir propriedades antiestáticas, também oferecem características hidrofóbicas ou hidrofílicas e capacidades fotocatalíticas, mas ainda não dispensa o uso da água para a limpeza para obter um desempenho de limpeza mais

alto e que nenhum revestimento anti-sujeira elimina a necessidade de limpeza, o que é um dos motivos pelos quais eles tiveram uma implantação limitada no mercado.

Já na limpeza ativa, há a limpeza manual e a automatizada por meio de robôs. A limpeza manual é uma técnica utilizada para remover sujeiras das superfícies em tecnologias de conversão de energia solar. Essa abordagem é geralmente adotada em instalações solares de pequeno porte ou em locais onde o uso de robôs não é viável devido à configuração espacial da planta. É considerada eficaz, pois consegue eliminar completamente contaminantes, como resíduos de pássaros e poeira endurecida. No entanto, pode gerar custos elevados dependendo da frequência com que é realizada. Já os métodos de autolimpeza, que não requerem intervenção humana, ajudam a reduzir significativamente os custos de manutenção (CONCEICAO, Ricardo et al, 2022).

Na limpeza ativa, a utilização de robôs reduz bastante os custos de O&M empregados na limpeza dos painéis pois eles exigem menos de ação humana e, dependendo do modelo do robô, utiliza-se entre 8 ml/m² a 110 ml/m² de água (BAKER, 2020).

Assim, é importante ressaltar a relevância do tratamento de depósitos sólidos sobre os módulos fotovoltaicos, uma vez que o acúmulo de sujeira impacta diretamente o desempenho das plantas solares. A aplicação de tecnologias de O&M, como a análise de sujeira e os mecanismos de falha nos módulos, é essencial para garantir a eficiência a longo prazo das instalações solares. A escolha entre métodos de limpeza passiva e ativa, especialmente o uso de robôs, mostra-se promissora para reduzir custos operacionais, sem comprometer a eficácia da manutenção. Contudo, é fundamental continuar investindo em pesquisas para aprimorar métodos de limpeza, especialmente no desenvolvimento de revestimentos anti-sujeira mais eficientes e soluções automatizadas que reduzam o consumo de recursos, como a água.

4. ANÁLISE COMPARATIVA: BRASIL vs. FRANÇA

4.1 Estrutura e Desenvolvimento dos Parques Solares

Após a apresentação de algumas práticas e inovações de O&M em parques solares, a partir de agora nesse capítulo será feita a análise baseada na literatura de como as equipes presentes no Brasil e na França costumam atuar na operação e manutenção dos seus parques solares. Primeiramente, será abordado as diferenças estruturais entre os parques solares no Brasil e na França.

De modo geral, as configurações dos parques solares em ambos os países são semelhantes ao escopo descrito no item 2.3, contando com painéis fotovoltaicos equipados com *trackers* uniaxiais ou biaxiais, inversores e pontos de transformação.

A principal diferença entre os dois sistemas está no ponto de entrega da energia ao sistema de transmissão. Na França, a transmissão elétrica é centralizada e operada exclusivamente pela RTE (Réseau de Transport d'Électricité), responsável por toda a rede de alta tensão do país. Dessa forma, a entrega da energia ocorre diretamente nas fronteiras da planta solar, e a partir desse ponto, toda a responsabilidade pela transmissão cabe à RTE, não à equipe de operação e manutenção (O&M) da usina.

Figura 14 - Representação de uma planta fotovoltaica na França



Fonte : Guide EI – Installations photovoltaïques au sol, 2019

No Brasil, a estrutura é mais descentralizada, com diversas concessionárias de transmissão operando no país. Como resultado, a entrega da energia não ocorre diretamente nas fronteiras das plantas fotovoltaicas. Cabe à equipe de O&M garantir a transmissão da energia por meio de uma linha de transmissão (LT) até uma subestação coletora pertencente a uma dessas concessionárias. No Brasil, é comum que os complexos fotovoltaicos possuam uma subestação coletora própria, responsável pela integração dos geradores solares ao sistema de transmissão. Essa subestação é operada e mantida pela equipe de O&M (Operação e Manutenção) da empresa responsável pelo parque, garantindo o funcionamento adequado e a conexão eficiente ao sistema. Já na França, essa subestação coletora do complexo não existe, como ilustra a figura 14, pois a energia é entregue diretamente à rede de transmissão operada

exclusivamente pela RTE (Réseau de Transport d'Électricité). Isso reduz a responsabilidade da equipe de O&M francesa em relação à infraestrutura de transmissão, diferentemente do que ocorre no Brasil.

Figura 15 - A Subestação Coletora Bon Nome de 34,5/138kV em Pernambuco



Fonte: GRANTEL ENGENHARIA, 2021

Essa diferença estrutural impacta diretamente a gestão e a responsabilidade operacional dos parques solares em cada país, influenciando aspectos como manutenção, custos e regulamentação do setor elétrico. No Brasil, além da operação e manutenção da planta fotovoltaica, a equipe de O&M também é responsável pela linha de transmissão até a subestação coletora de transmissão e a própria subestação coletora do complexo.

Como os técnicos especializados em energia fotovoltaica geralmente não possuem formação específica para trabalhar com linhas de transmissão, serviços como inspeções detalhadas e manutenções corretivas na LT são, na maioria das vezes, terceirizados para empresas especializadas. Esse fator adiciona um custo operacional extra aos complexos fotovoltaicos no Brasil, tornando a gestão desses ativos mais complexa em comparação com o modelo francês.

4.2. Políticas e Regulamentações

A geração de energia solar no Brasil conta com uma ampla gama de incentivos e benefícios legais, estabelecidos por legislações e iniciativas governamentais. Essas medidas têm como objetivo fomentar o crescimento do setor, promover a sustentabilidade e garantir a

competitividade da energia solar no mercado energético nacional. Abaixo está um resumo consolidado das ações apresentadas ao longo dos anos:

- **Redução nas tarifas de uso do sistema elétrico**

Projetos de até 30.000 kW têm direito a uma redução mínima de 50% nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição. *(Lei nº 9.427/1996)*.

- **Participação no ACR como fonte alternativa**

Fontes alternativas podem participar de leilões no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), com contratos de 10 a 30 anos. *(Decreto nº 5.163/2004)*.

- **Plano de Nacionalização Progressiva**

Programa do BNDES que condiciona financiamentos à integração gradual de componentes fabricados no Brasil.

- **Convênio ICMS 16/2015**

Autoriza a isenção de ICMS sobre a energia gerada por micro e minigeração distribuída, incentivando a autogeração.

- **Isenção de PIS/COFINS para micro e minigeração**

Redução de tributos para consumidores que produzem energia solar em suas instalações. *(Lei nº 13.169/2015)*.

- **Redução do Imposto de Importação:**

Alíquotas reduzidas para equipamentos fotovoltaicos, como painéis solares, que passaram de 12% para 6%.

Essa medida foi revogada em 2023 e a alíquota passará em 30 de junho de 2025 a ser 25%, numa tentativa de incentivar a produção nacional e gerar mais empregos nessa área.

- **Incentivo no Programa Minha Casa, Minha Vida**

Integração de sistemas solares no programa habitacional, promovendo o acesso à energia renovável para famílias de baixa renda.

- **A Lei nº 14.300/2022**

Lei que institui o Marco Legal da Geração Distribuída no Brasil sancionada em 6 de janeiro de 2022, regulamentando o sistema de compensação de energia elétrica e estabelecendo regras claras para a produção de energia por meio de fontes renováveis, como solar, eólica, hídrica e biomassa.

A Lei nº 14.300/2022 trouxe diversas mudanças regulatórias para o setor de geração distribuída, incluindo:

- **Sistema de Compensação de Energia:**

Os consumidores podem injetar o excedente de energia gerada na rede e receber créditos para abatimento na fatura.

- **Taxação Gradual do Uso da Rede:**

Para novos sistemas conectados após 7 de janeiro de 2023, haverá cobrança progressiva até 2029 pelo uso da infraestrutura da distribuidora.

- **Micro e Minigeração Distribuída:**

Define que microgeradores possuem potência instalada de até 75 kW, enquanto minigeradores têm potência entre 75 kW e 5 MW.

- **Criação do Fundo de Desenvolvimento da Micro e Minigeração Distribuída (FDGD):**

Destinado a estimular investimentos e sustentar a expansão da GD no Brasil.

Diante do exposto, percebe-se que, no Brasil, a maioria das leis apresentadas tratam de regulamentações do setor renovável e da comercialização da energia gerada em todos os seus setores, na França, como apresentado a seguir, a maioria de leis e regulamentações fazem parte de um grande projeto de redução da dependência da França da energia nuclear e aumentar a participação de energias renováveis na matriz elétrica francesa, com o objetivo de acelerar uma geração mais verde no país.

A seguir são apresentadas as principais leis, políticas, medidas regulamentares e incentivos financeiros adotados para desenvolver a energia solar na França:

• **Lei sobre a Transição Energética para o Crescimento Verde (LTECV) - 2015**

- Estabelece o objetivo de reduzir a quota da energia nuclear no cabaz energético para 50% até 2035.

- Aumenta os objetivos para as energias renováveis, incluindo a solar, para 32% do consumo final de energia até 2030.

- Incentiva projetos fotovoltaicos em edifícios, parques de estacionamento e terrenos abandonados.

• **Lei do Clima e da Resiliência - 2021**

- Impõe a obrigação de equipar grandes superfícies comerciais, parques de estacionamento e armazéns com instalações fotovoltaicas.

- Tem como objetivo aumentar a utilização de painéis solares em novos edifícios e em edifícios existentes.

- **Lei de Programação Plurianual da Energia (PPE)**
 - Planeja o desenvolvimento da produção de energia renovável, com um objetivo de 20 GW de capacidade fotovoltaica instalada até 2023 e entre 35 e 44 GW até 2028.
 - Incentiva a instalação de centrais fotovoltaicas no solo e em telhados.
- **Código do Urbanismo e Energias Renováveis**

Incentiva a instalação de painéis fotovoltaicos em edifícios, alterando os regulamentos de planeamento urbano para simplificar os procedimentos administrativos.

Incentivos e apoios financeiros

- **Tarifas de aquisição regulamentadas**

Garante uma tarifa fixa para a eletricidade produzida por instalações solares até uma determinada potência (nomeadamente para instalações residenciais e pequenas empresas).
- **Incentivo ao autoconsumo fotovoltaico**

Incentiva os consumidores privados e as pequenas empresas a consumir a energia que produzem, beneficiando as de um prêmio pela instalação de painéis.

MaPrimeRénov

Ajuda financeira para a renovação energética dos edifícios, incluindo a instalação de painéis fotovoltaicos.

- **Plano “Place au Soleil” - 2018**

Tem como objetivo acelerar o desenvolvimento da energia fotovoltaica na França através da mobilização de superfícies não utilizadas, como parques de estacionamento e telhados.

Diretivas europeias adotadas na França

- **Diretiva europeia relativa às energias renováveis (RED II)**
 - Estabelece um objetivo global de 32% de energias renováveis na União Europeia até 2030.
 - Incentiva os Estados-Membros, incluindo a França, a desenvolverem medidas específicas para apoiar as energias renováveis.

- **Plano REPowerEU - 2022**

- Acelera a implantação de projetos solares para reduzir a dependência energética dos combustíveis fósseis importados.

Dessa maneira, destaca-se o objetivo do governo francês no desenvolvimento da sua matriz renovável ao longo dos próximos anos.

4.3. Práticas de O&M no Brasil

4.3.1 Análise de índices de desempenho energético e operacional

Várias práticas foram apresentadas durante esse trabalho e é importante que sejam conhecidos quais os tipos de abordagem que as equipes de O&M no Brasil e na França estão usando para melhor operar seus ativos. A seguir, serão apresentados estudos de casos que estão na literatura sobre essas práticas em cada um desses países.

No Brasil, o estudo (GRACIELE et al, 2024) faz um levantamento de um conjunto de Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) voltados para a avaliação do desempenho energético e da eficácia das estratégias de manutenção em usinas fotovoltaicas brasileiras, a fim de avaliar quais desses indicadores são mais adequados na análise do desempenho do O&M em usinas fotovoltaicas. O estudo foi conduzido em 3 parques fotovoltaicos de (3 MW, 8MW e 10 MW). Dessa maneira, o estudo adentra na avaliação da performance de parques solares, ajudando a entender a situação da usina, a identificar problemas e a propor soluções para estratégias futuras.

O estudo reuniu 25 KPIs essenciais para avaliação do desempenho de O&M em usinas solares. Esses indicadores são de dois tipos: indicadores de desempenho energético (aqueles que focam na eficiência da usina, perdas energéticas e disponibilidade operacional) e indicadores de desempenho de serviços de O&M (aqueles que avaliam o cumprimento de cronogramas, tempo médio entre falhas, disponibilidade de peças sobressalentes entre outros).

Dessa maneira, foi possível avaliar tanto o status da planta fotovoltaica em relação a performance de seus componentes, bem como a atuação da equipe de O&M. Essas duas frentes são, além dos fatores climáticos, os responsáveis pelo desempenho das plantas.

Após toda a análise desses KPIs, chegou-se à conclusão que os KPIs mais relevantes para a avaliação do desempenho de usinas solares incluem:

- **Performance Ratio (PR):** Mede a eficiência operacional da usina fotovoltaica, comparando a energia real gerada com a energia teoricamente esperada.

- **Energy-Based Availability (Disponibilidade com base energética - AEi):**

Disponibilidade em energias renováveis representa a capacidade de uma planta produzir energia de forma contínua e confiável (REDISKE et al, 2024). Porém, a disponibilidade energética é a razão entre a produção de energia da planta medida em um período (E_{out}), dividida pela soma da energia produzida e a energia perdida calculada durante o mesmo período. Dessa maneira, disponibilidade baseada em energia leva em conta que uma hora em um período de alta irradiância é mais valiosa do que em um período de baixa irradiância. Por isso, a energia produzida e a energia perdida são usadas em seu cálculo em vez do tempo.

$$AEi = \frac{E_{out}}{E_{out} + E_{loss}}$$

- **Fator de Capacidade (Capacity Factor):** Representa a relação entre a energia efetivamente gerada e a capacidade instalada da planta. É medida pela razão entre a energia produzida em um período t (E_{out}), dividida pela potência nominal (P_o) do sistema e multiplicada pelo número de horas do período. Dessa forma, o CF consiste na razão entre a produção anual real de energia e a quantidade de energia que a usina solar fotovoltaica geraria se estivesse operando com a capacidade nominal máxima durante 24 horas por dia em um ano

$$CF = \frac{E_{out}}{P_o * t}$$

- **Disponibilidade de Peças Sobressalentes (Spare Parts Availability - Asp):** O gerenciamento de peças sobressalentes é um aspecto essencial da O&M, garantindo que os componentes necessários estejam disponíveis rapidamente para manutenções preventivas e corretivas, minimizando o tempo de inatividade da usina fotovoltaica. Logo, esse indicador é importante pois avalia a disponibilidade de peças sobressalentes para manutenção corretiva e preventiva. Esse indicador é medido como a diferença de tempo entre a soma dos períodos de tempo em hora de mobilização da equipe de O&M (T_m) e a soma dos períodos de tempo em hora de disponibilidade da peça de reposição T_p . Se o KPI retornar a valores positivos, isso demonstra que as peças sobressalentes já estavam disponíveis para a equipe de O&M. Se negativo, indica que a equipe de O&M não avaliou bem as necessidades do parque em questão de sobressalentes.

$$Asp = T_m - T_p$$

- **Contractual Availability (Ac):** Há dois tipos de disponibilidade quando se fala de análise dos serviços de O&M: a disponibilidade técnica (At), que mede o tempo em que a usina solar está operando em relação ao tempo total em que poderia estar gerando energia, sem considerar fatores externo e a disponibilidade contratual, esta leva em conta situações fora do controle da equipe O&M, como tempestades ou granizo, excluindo esses períodos do cálculo.

Disponibilidade técnica (AT)

A disponibilidade técnica representa a razão entre o tempo real total de operação da planta e o tempo total possível de operação, sem considerar fatores externos. Sua fórmula é dada por:

$$At = \frac{Tativo - Tinativo}{Tativo}$$

Disponibilidade contratual (AC)

A disponibilidade contratual considera fatores de exclusão, ou seja, períodos de inatividade que não são de responsabilidade do provedor de serviços de O&M. Sua fórmula é dada por:

$$Ac = \frac{Tativo - Tinativo - Texcluidos}{Tativo} * 100$$

Onde:

- Tativo – Tinativo: é o tempo real total de operação da planta
- Tinativo: representa todo o tempo de inatividade antes da aplicação dos fatores de exclusão;
- Texcluidos: corresponde ao tempo de inatividade causado por eventos não atribuíveis ao provedor de O&M, como fenômenos naturais.

A disponibilidade contratual é um parâmetro essencial em contratos de O&M, mas de difícil de computar por levar em conta vários fatores. Geralmente, esse indicador é estabelecido em 98% ao longo de um ano.

O estudo de caso finaliza afirmando que a aplicação dos KPIs que foram propostos permite um acompanhamento mais preciso da performance operacional, facilitando a tomada

de decisões e contribuindo para a redução de custos e o aumento da vida útil dos ativos fotovoltaicos.

4.3.2 Inspeção Termográfica e Limpeza de módulos FV

Seguindo com a apresentação de algumas práticas de O&M que são aplicadas nos parques solares no Brasil, um estudo (COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2021) foi conduzido nas usinas fotovoltaicas do campus Betim em Minas Gerais. Foram realizadas inspeções termográficas qualitativas para identificar pontos de sobreaquecimento nos módulos. Além disso, procedimentos de limpeza úmida dos módulos foram executados para avaliar o impacto da sujidade na geração de energia. O sistema tem uma potência instalada de 25,0 kW e é composto por 110 módulos fotovoltaicos de silício policristalino, cobrindo uma área de cerca de 180 m². Esses módulos estão distribuídos em dois arranjos fotovoltaicos com uma inclinação de 10°. Os módulos são de modelo CS6P-260P da *Canadian Solar* de potência nominal de 260 W_p (Watts pico). Os dados de geração foram obtidos a partir dos sistemas de aquisição de dados das usinas.

O estudo de caso começa afirmando que muitas vezes o desempenho de módulos apresentado pelos fabricantes não é comprovado em campo devido a influências externas dos locais onde os parques solares estão implantados. Tais como: temperatura ambiente, poluição atmosférica, temperatura ambiente, velocidade dos ventos etc. Diante disso, faz-se necessário a análise de desempenho dessas usinas para sua melhor gestão. Nesse sentido, os autores analisam as práticas de O&M de inspeção termográfica e limpeza de módulos para minimizar esses problemas de performance dos módulos fotovoltaicos, na intenção de guiar as equipes de O&M para um planejamento e execução mais eficientes de suas atividades para garantir mais disponibilidade e longevidade do seu sistema.

Apesar de ser, muitas vezes, deixada de lado. A limpeza dos módulos fotovoltaicos se faz crucial quando a deposição de partículas sólidas sobre os módulos é a terceira causa ambiental que influencia a geração solar, após a irradiância e a temperatura (HICKEL, 2016). Isso pois a poeira limita a irradiância solar absorvida pelo módulo e, conseqüentemente, a produção da planta. Além disso, a sujidade também pode causar pontos quentes, pois essas partículas de poeira formam sombreamentos. Esses pontos quentes, por sua vez, acabam por deteriorar o módulo.

A limpeza dos módulos é feita de forma manual através do método de limpeza úmida, que utiliza escovas com cerdas macias que podem ser acopladas a um suprimento de água, realizando a limpeza e a lavagem simultaneamente (MAGHAMI et al., 2016).

Em conjunto com a limpeza, foi executada a inspeção termográfica para análise da situação dos módulos, antes e após a limpeza e, assim, avaliar as consequências das sujidades nas variações de temperatura pelo acúmulo ou não de poeira sobre as superfícies dos módulos, bem como a existência de sombreamentos.

O procedimento foi realizado no dia 12/08/2020 em um dia de sol limpo com irradiância superior a 600 W/m^2 , sem sombreamentos causados por nuvem. Após a limpeza dos módulos fotovoltaicos do campus do IFMG Betim foi possível observar um aumento na produção de energia, além de quantificar a perda de geração da usina antes da limpeza. Essa avaliação foi feita estimando a redução de desempenho causada pelo acúmulo de sujeira nos painéis, comparando a energia gerada pelos arranjos sujos e limpos.

Por fim, como resultado do estudo, na usina de Betim, a inspeção termográfica qualitativa revelou que 12,7% (14 no total) dos módulos apresentavam pontos de sobreaquecimento. E após análise da média de geração com os módulos sujos e limpos, constatou-se um aumento de 22,25% na energia gerada, considerando a média de geração em dias limpos sem sombreamentos causados por nuvens.

Além disso, todos os pontos quentes levantados antes da limpeza dos módulos, com exceção daqueles causados por sombreamento de estruturas fixas que foram três no total, foram completamente eliminados após a limpeza da sujidade, evidenciando que o sobreaquecimento observado estava diretamente relacionado ao acúmulo de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos.

Dessa maneira, a inspeção termográfica demonstrou ser uma ferramenta eficaz para identificar variações térmicas em usinas fotovoltaicas, auxiliando na detecção de falhas, sujidades e sombreamentos. A análise realizada no campus do IFMG Betim evidenciou perdas significativas de geração devido ao acúmulo de sujeira, reforçando a necessidade de limpezas periódicas, especialmente em períodos de estiagem. Além disso, os métodos propostos contribuem para a operação e manutenção (O&M) de sistemas fotovoltaicos, permitindo otimizar a gestão, reduzir falhas e planejar intervenções de forma mais eficiente.

Figura 16 - Termografia indicando o efeito de sombreamento



Fonte: COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2021

Figura 17 - Sombreamento por efeito de objeto



Fonte: COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2021

4.4. Práticas de O&M na França

4.4.1 Avaliação do Desempenho Operacional de Usinas Solares na França

Na França, diversas práticas de Operação e Manutenção (O&M) são amplamente adotadas para garantir a eficiência e a longevidade dos parques solares. Essas práticas incluem estratégias de monitoramento avançado, gestão da vegetação e otimização dos processos operacionais. A seguir, há estudos de casos em que algumas técnicas foram implementadas em parques franceses.

No estudo a seguir (VOUILLON, 2022), que foi conduzido pela BayWa r.e., empresa especializada em energias renováveis do grupo alemão BayWa AG, analisou com uma ferramenta própria a operação de quatro usinas solares na França de tecnologia PV com estrutura fixa e módulos monocristalinos e policristalinos "clássicos" (sem módulos bifaciais), com o objetivo de investigar o desempenho da fábrica em comparação com o que foi orçado

inicialmente, investigar o impacto de diferentes parâmetros (marca do módulo, tipo de inversor etc.) no desempenho das plantas, estimar perdas para comparação com os estudos iniciais de rendimento e, por fim, fazer comparações de rendimento entre as quatro plantas. Utilizou indicadores-chave de desempenho (KPIs) para avaliar a eficiência dos sistemas. Entre os principais KPIs analisados estão:

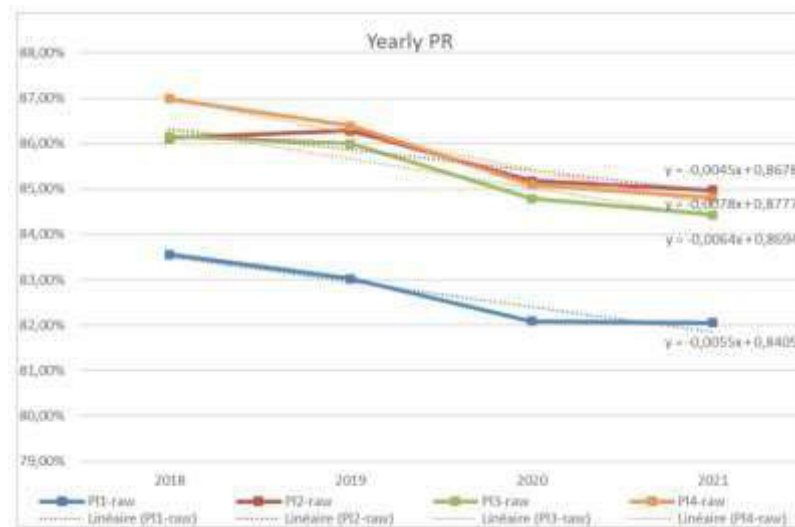
- **Rendimento (Yield):** Mede a produção total de energia (MWh) e compara com os valores previstos.
- **Performance Ratio (PR):** Avalia a eficiência da usina, comparando a geração real com o potencial teórico.
- **Disponibilidade da usina (%):** Mede o tempo em que o sistema esteve operante, permitindo a identificação de falhas recorrentes.
- **Correção de PR (índice de desenvolvimento orçamentário):** Ajustam os valores do PR considerando variáveis externas como temperatura, sombreamento e condições climáticas.

Os dados de projeto das 6 plantas indicavam um PR de -2,75% anual, o que significa que se espera uma degradação 2,75% do projeto a cada ano. Através dos dados obtidos no SCADA responsável pelo monitoramento dessas plantas, foi possível traçar o PR real, que é chamado de PR bruto, dessas plantas durante 4 anos e constatou-se que, na verdade, todas obtiveram PR bruto maior de 2,75%, uma chegando a obter PR bruto de -7,9%, quase 3 vezes o valor estimado, indicando assim que todas as plantas estavam se degradando acima do esperado e simulado.

Essa análise serviu de base para que a equipe de O&M investigasse mais profundamente as possíveis causas dessa degradação acentuada em todas as plantas. Para tanto, foram estudados a influência dos módulos, a análise dos inversores, o impacto da temperatura e a perda por autossombreamento.

A influência dos módulos não permite uma conclusão tão assertiva visto que as plantas possuem módulos de marcas variadas com potência nominal distinta, logo é natural que numa análise PR anual, os que apresentam potência nominal mais baixa tenham um PR em módulo mais alto que os demais. Os dados plotados no estudo são apresentados na figura 18 e tabela 3 a seguir.

Figura 18 - Os PRs ao longo dos anos



Fonte: VOUILLON, 2022

Na análise dos inversores, analisando os dois tipos presentes nas plantas, a conclusão foi que os inversores não influenciam no PR por serem de diferentes tipos.

Com o aumento da temperatura, a eficiência de um módulo fotovoltaico diminui e viceversa. Então, é natural que as plantas apresentem mais perdas durante o verão. Logo, ao ser feita a análise da temperatura no PR dos parques, foi observado que o ano que apresentou o maior decaimento na inclinação do PR foi o ano que apresentou um verão com mais ondas de calor. Segundo a tabela a seguir:

Tabela 3 - Perdas anuais de PR devido à temperatura

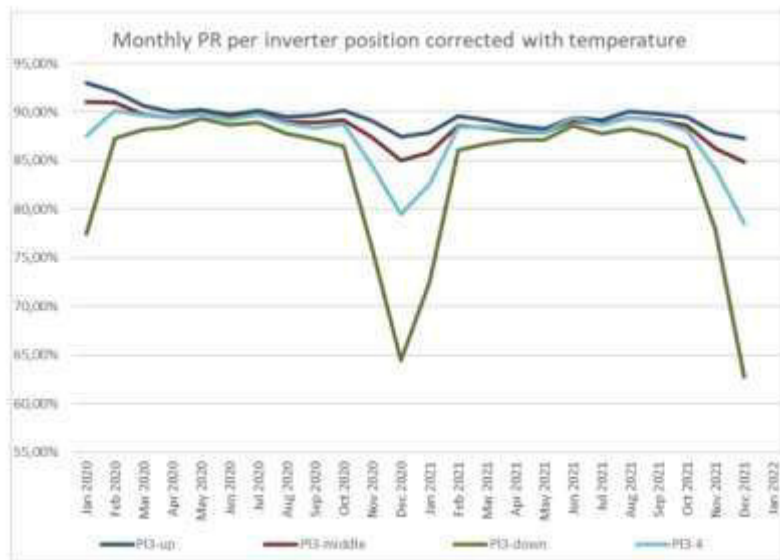
Ano	PR1	PR2	PR3	PR4
2019	-3,23%	-3,71%	-3,77%	-3,57
2020	-3,31%	-3,82%	-3,87%	-3,68%
2021	-2,87%	-3,16%	-3,27%	-3,17%

Fonte: ADAPTADA VOUILLON, 2022

Por fim, a análise do autossombreamento apontou que ele tem forte influência durante o inverno nas 4 plantas. O efeito do autossombreamento ocorre quando um painel fotovoltaico projeta sombra sobre outro painel na mesma instalação, reduzindo sua eficiência. Esse efeito é mais comum em usinas solares de grande porte e pode ser influenciado pelo espaçamento entre fileiras, inclinação dos módulos e orientação do sistema. Na figura a seguir, pode-se constatar o quanto esse efeito atenua a diminuição do PR durante o inverno, chegando até em uma

redução de 25% das linhas inferiores dos módulos perdem comparação com as linhas superiores.

Figura 19 - Impacto do autossombreamento ao longo das estações



Fonte: ADAPTADA VOUILLON, 2022

Assim, conclui-se a influência da temperatura e do autossombreamento durante o inverno sobre os PRs de plantas fotovoltaicas na França. E, apesar, de inconclusivo, a análise dos módulos se faz necessária também. Dessa maneira, pode-se ver algumas práticas de O&M aplicadas a parques fotovoltaicos em busca da melhor operação possível dessas plantas.

Em resumo, pôde-se constatar a atuação do O&M na França para descobrir as causas por trás de índices de degradação mais altos que os simulados na etapa de concepção do projeto. Isso pode auxiliar as equipes de projeto a desenvolverem melhores concepções para futuros empreendimentos, considerando os pontos identificados no estudo de caso.

4.5 Estudo de caso do próprio autor

Nesse tópico será apresentado um estudo de caso referente a uma experiência durante o estágio do autor em uma empresa de geração de energias renováveis no sul da França, durante abril e setembro de 2023. Nessa ocasião, o autor fazia parte da equipe de O&M como assistente de performance operacional e participou de uma campanha mais diferente da equipe.

Esse estudo foi feito em um parque solar chamado Parroc, localizado no sul da França.

Parroc é um parque solar de painéis fixos e de potência de 5 MW e que possui 30 inversores.

A atuação da equipe de O&M em questão em Parroc, diferentemente dos demais casos apresentados nesse projeto não é de cunho de performance energética pois sua produção ia conforme o esperado, mas sim visando a segurança dos colaboradores de campo que atuam nesse parque e também visando proteger a vida útil dos inversores do parque. Nesse contexto, nota-se que uma parte importante das atribuições ligadas à atividade de O&M que é a segurança dos trabalhadores e dos equipamentos presentes na planta.

Nessa central constatou-se os seguintes problemas:

1) A temperatura interna dos inversores estava muito alta. Os inversores dissipavam o calor soprando ar quente para a frente, criando condições extremas no corredor de passagem. E além disso os inversores acabavam por se danificar com o tempo devido à essas elevadas temperaturas.

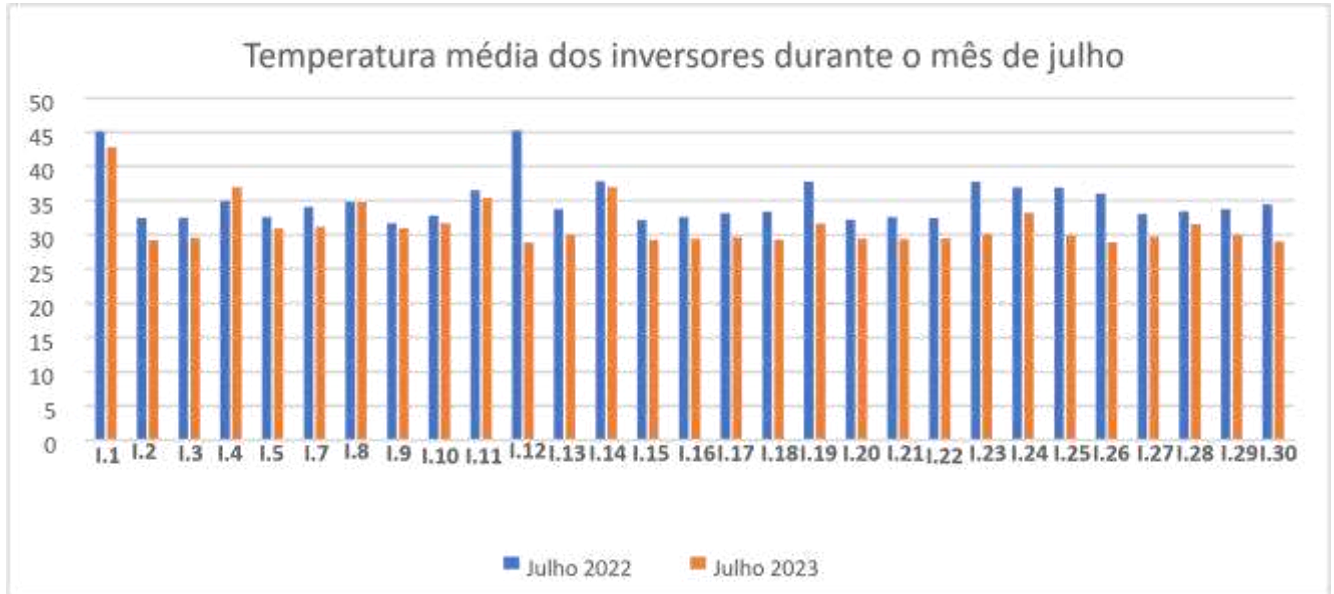
2) Os inversores são colocados a 1,80 metros do solo e pesando cerca de 100 kg cada, os operadores não conseguiam desmontar os inversores sem colocar sua saúde em risco.

A solução implementada foi alterar a configuração geográfica dos inversores no parque, movendo os inversores montados em altura para o espaço exterior e à altura de um homem.

Dessa forma, o estudo a seguir analisa as temperaturas dos inversores antes da intervenção e após a intervenção para contatar se foi efetivo o trabalho realizado. Assim, dados de temperatura dos inversores durante o verão europeu (julho) de 2023 e 2022 foram extraídos do SCADA Kerwin de fabricante Schneider, plataforma de monitoramento e armazenamento de dados dos parques, e feita a comparação da média mensal de temperatura de cada inversor em cada ano.

No que diz respeito à temperatura dos inversores, o operador O&M observou uma diminuição geral do calor tanto dentro quanto fora do ambiente onde ficavam os inversores, conforme pode ser visto no gráfico e nas tabelas a seguir:

Gráfico 1 – Médias de temperatura dos inversores no mês de julho em 2022 e 2023



Fonte: Próprio Autor

	Inv. 1	Inv.2	Inv.3	Inv.4	Inv.5	Inv.7	Inv.8	Inv.9	Inv.10
Redução [%]	-5,5	-11,2	-10,0	+5,5	-5,3	-9,5	-0,1	-2,2	-3,6

Fonte: Próprio Autor

	Inv. 11	Inv.12	Inv.13	Inv.14	Inv.15	Inv.16	Inv.17	Inv.18	Inv.19	Inv.20
Redução [%]	-3,1	-56,6	-12,3	-2,3	-9,9	-10,7	-11,8	-13,9	-19,4	-9,4

Fonte: Próprio Autor

	Inv. 21	Inv.22	Inv.23	Inv.24	Inv.25	Inv.26	Inv.27	Inv.28	Inv.29	Inv.30
Redução [%]	-10,9	-10,0	-25,2	-11,3	-23,1	-24,5	-11,4	-6,0	-12,2	-18,5

Fonte: Próprio Autor

No gráfico 1, são apresentadas as médias de temperatura no interior dos inversores do parque solar de Parroc nos meses de julho de 2022 e julho de 2023. Como a intervenção foi feita em julho de 2023, necessitava-se comprovar que a atuação surtiu efeito em seus objetivos. Nas tabelas, são apresentadas a comparação em percentual das temperaturas dos meses de julho de cada inversor.

Além de analisar apenas as temperaturas médias nos inversores, é fundamental considerar as temperaturas médias na França nesses dois anos para uma conclusão mais precisa. De acordo com a *Météo-France* (2024), 2022 foi o ano mais quente desde o início do século XX, seguido de perto por 2023, que ficou em segundo lugar. No entanto, a diferença entre os dois anos foi mínima: enquanto a temperatura média em 2022 foi de 14,5 °C, em 2023 foi de 14,4 °C. Assim, a variação entre os períodos não é significativa.

Dessa maneira, pode-se observar que a intervenção de O&M cumpriu seu papel, uma vez que todos os inversores registraram uma queda na temperatura, exceto o inversor 4, em comparação ao mesmo mês do ano anterior, chegando a quedas significativas como o do inversor 12 que registrou redução de mais de 50%, atingindo o objetivo de garantir mais segurança para os colaboradores que atuavam nesse parque.

4.6 Desafios e Oportunidades em O&M

4.6.1. No Brasil

A operação e manutenção (O&M) de usinas solares no Brasil apresenta um conjunto de oportunidades e desafios que impactam diretamente a eficiência e a rentabilidade dos empreendimentos fotovoltaicos. A energia solar tem demonstrado grande potencial de crescimento, especialmente com os avanços regulatórios e tecnológicos que permitem uma maior inserção na matriz energética nacional.

O Brasil possui um dos maiores potenciais solares do mundo, com elevada incidência de radiação ao longo do ano, favorecendo a expansão da energia fotovoltaica. Ao final de 2024, a capacidade instalada de energia solar no país chegou a 50 gigawatts, representando quase 21% da matriz elétrica brasileira, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR).

Com o crescimento do setor, surgem oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas eficientes de O&M. A digitalização e automação dos processos contribuem para a redução de custos operacionais e aumento da confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, a ABSOLAR aponta que a geração distribuída está impulsionando investimentos em capacitação profissional, promovendo a especialização da mão de obra e a geração de empregos no setor.

Outro fator relevante é o desenvolvimento de regulamentações mais favoráveis. A Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL e sua atualização pela Resolução 687/2015

estabeleceram diretrizes claras para a geração distribuída, permitindo maior viabilidade econômica para consumidores e investidores.

Apesar das oportunidades, a O&M de usinas solares no Brasil enfrenta desafios significativos. A variabilidade climática pode afetar a eficiência dos módulos fotovoltaicos, exigindo estratégias adaptativas de manutenção. Segundo estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o acúmulo de sujidades, como poeira e resíduos orgânicos, pode reduzir a geração de energia em até 25%, tornando essencial a implementação de protocolos de limpeza eficientes e economicamente viáveis.

Outro desafio relevante está na infraestrutura e logística de manutenção, especialmente em usinas localizadas em áreas remotas. A disponibilidade de peças de reposição, mão de obra qualificada e equipamentos adequados pode ser limitada, aumentando os custos e o tempo de resposta para correções. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aponta que cerca de 30% das usinas fotovoltaicas no Brasil estão em áreas de difícil acesso, impactando diretamente a eficiência operacional (PASSINI et al., 2024).

Além disso, a falta de padronização nos contratos de O&M pode impactar a qualidade dos serviços prestados, dificultando a implementação de boas práticas e métricas de desempenho consistentes. A adaptação às regulamentações ambientais e setoriais também representa um fator crítico, exigindo conformidade com normas e diretrizes específicas, conforme apontado no estudo do Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS, 2023).

Diante desse cenário, a busca por soluções inovadoras e a implementação de estratégias de O&M bem estruturadas são fundamentais para garantir a eficiência operacional e a longevidade das usinas solares no Brasil. O desenvolvimento de novas tecnologias, a capacitação profissional e a criação de padrões mais rigorosos podem contribuir para um setor mais resiliente e competitivo, consolidando a energia solar como uma alternativa sustentável e economicamente viável para a matriz energética do país.

4.6.2. Na França

Assim com o Brasil, a operação e a manutenção (O&M) de usinas de energia solar na França apresentam um conjunto específico de desafios e oportunidades que influenciam diretamente a eficiência e a lucratividade das instalações fotovoltaicas. O contexto francês é marcado pelo rápido crescimento do setor solar, por avanços tecnológicos significativos e por considerações regulatórias e ambientais específicas.

A França embarcou em uma ambiciosa transição energética com o objetivo de aumentar a participação das energias renováveis em sua matriz energética. Em 2022, a capacidade instalada de energia solar atingiu cerca de 13,5 GW, e as previsões indicam um aumento significativo nos próximos anos (PMarket Research, 2024). Essa dinâmica oferece oportunidades significativas para as tecnologias de gerenciamento inteligente, permitindo que o desempenho da usina de energia seja otimizado e, ao mesmo tempo, reduza os custos operacionais.

A França tem apostado em sistemas de gerenciamento inteligente que usam algoritmos avançados e ferramentas de análise de dados para monitorar o desempenho da usina em tempo real (PMarket Research). Por exemplo, empresas como a EDF Renouvelables integraram soluções de inteligência artificial para prever as necessidades de manutenção, minimizando o tempo de inatividade e maximizando a eficiência energética. Essas abordagens proativas podem detectar anomalias na operação de painéis solares, facilitando uma intervenção rápida e eficaz.

Apesar dessas oportunidades, o setor de O&M de usinas solares na França enfrenta uma série de desafios. A diversidade de tecnologias usadas, desde painéis monocristalinos até sistemas de dupla face, dificulta a padronização dos procedimentos de manutenção e exige habilidades especializadas para cada tipo de equipamento (PMarket Research).

As regulamentações ambientais e os requisitos de conformidade também desempenham um papel crucial no setor. As empresas precisam navegar em um cenário regulatório em constante mudança, o que pode levar a custos adicionais. Por exemplo, o Conselho Nacional Francês para a Proteção da Natureza (CNPEN) recomendou a proibição de novas instalações solares em áreas naturais até que o potencial de superfícies artificiais, como telhados e estacionamentos, tenha sido esgotado. Essa recomendação tem o objetivo de proteger a biodiversidade, mas também pode complicar a implantação de novas instalações, segundo o jornal *Le Monde* (2024).

Para maximizar as oportunidades e superar os desafios da O&M de usinas solares na França, é essencial investir em inovação tecnológica e no treinamento contínuo dos profissionais do setor. A adoção de práticas avançadas de manutenção e a integração de soluções digitais podem melhorar a competitividade e a sustentabilidade do setor fotovoltaico francês. Além disso, é necessária uma estreita colaboração entre os participantes públicos e privados para desenvolver políticas favoráveis e estruturas regulatórias adequadas, facilitando assim a transição para uma energia mais limpa e mais eficiente.

4.6. Comparação e Contrastes

Diante de tudo que foi apresentado nesse capítulo, a comparação entre Brasil e França revela contrastes significativos na estrutura, regulamentação e práticas de O&M dos parques solares. Enquanto o Brasil se beneficia de incentivos fiscais e um grande potencial solar, enfrenta desafios relacionados à logística e manutenção das usinas. Por outro lado, a França investe fortemente em transição energética e inovação tecnológica, buscando reduzir sua dependência da energia nuclear e aprimorar a eficiência dos parques solares. Ambos os países possuem desafios únicos, mas também oportunidades significativas para expandir e aperfeiçoar a geração solar.

Os parques solares no Brasil e na França possuem configurações semelhantes, utilizando painéis fotovoltaicos com trackers, inversores e pontos de transformação. No entanto, uma diferença fundamental reside no ponto de entrega da energia ao sistema de transmissão.

Na França, a transmissão é centralizada e operada exclusivamente pela RTE (Réseau de Transport d'Électricité), o que significa que a entrega de energia ocorre diretamente nas fronteiras da planta solar. Dessa forma, a responsabilidade pela transmissão cabe à RTE, e não à equipe de O&M da usina.

No Brasil, a estrutura é mais descentralizada, com diversas concessionárias de transmissão. Assim, a equipe de O&M tem a responsabilidade de garantir a transmissão da energia por meio de linhas de transmissão (LT) até uma subestação coletora pertencente a uma dessas concessionárias. Essa diferença estrutural impacta diretamente a gestão e responsabilidade operacional dos parques solares em cada país.

O Brasil conta com inúmeros incentivos legais para a energia solar, incluindo redução de tarifas de transmissão, participação em leilões e isenções fiscais, como o Convênio ICMS 16/2015, que isenta a energia gerada por micro e minigeração distribuída. O Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022) também trouxe mudanças regulatórias importantes, como a taxação gradual do uso da rede, que terá um impacto nos rendimentos futuros das usinas.

Enquanto isso na França, as regulamentações são voltadas para a redução da dependência da energia nuclear e a ampliação da matriz renovável. A Lei sobre a Transição Energética para o Crescimento Verde (2015) e a Lei do Clima e da Resiliência (2021) são exemplos de esforços para incentivar a geração fotovoltaica. Além disso, há incentivos financeiros como tarifas fixas para pequenas instalações solares e programas de isenção fiscal para a venda de eletricidade fotovoltaica.

Em relação às práticas de O&M em plantas solares, segundo os casos apresentados concluímos que no Brasil, as equipes de O&M utilizam vários indicadores-chave de desempenho (KPIs) para monitorar a eficiência das usinas solares. E não obstante, estão em busca de mapear os melhores indicadores para analisar a performance das plantas e, também, do serviço de O&M. Além disso, práticas que são consideradas inovadoras, como inspeção termográfica, já está sendo aplicada para auxiliar o mapeamento de pontos de corretivas, além da limpeza de módulos que são utilizadas para reduzir perdas energéticas e evitar a degradação dos painéis fotovoltaicos.

Já na França, as práticas de O&M também envolvem monitoramento avançado de otimização operacional com análise de indicadores de desempenho. Empresas como a BayWa r.e. realizam análises detalhadas para compreender as perdas na geração e identificar fatores como degradação dos módulos, sombreamento e variações térmicas. A utilização de sistemas de inteligência artificial para prever necessidades de manutenção e otimizar a eficiência operacional é uma tendência crescente.

No Brasil, desafios incluem a logística de manutenção, a necessidade de mão de obra qualificada e a infraestrutura descentralizada. O acúmulo de sujeira nos painéis pode reduzir a geração em até 25%, exigindo estratégias de manutenção eficazes. Contudo, o alto potencial solar e os avanços regulatórios abrem espaço para crescimento e inovação no setor.

Na França, um dos principais desafios é a regulamentação ambiental, que pode limitar a implantação de novas usinas. Além disso, a diversidade de tecnologias dificulta a padronização das práticas de O&M. Entretanto, o país tem avançado no uso de inteligência artificial e sistemas de gerenciamento inteligente, o que otimiza a manutenção e melhora a eficiência das usinas solares.

5 CONCLUSÃO

A análise da Operação e Manutenção (O&M) de parques solares no Brasil e na França, dentro de um contexto global, revela avanços significativos e desafios inerentes à expansão da energia solar como parte da transição energética mundial. A crescente demanda por fontes renováveis, impulsionada pela necessidade de redução das emissões de carbono e pela busca por maior segurança energética, tem colocado a energia solar como peça-chave na matriz energética de diversos países.

No cenário global, a energia solar vem apresentando um crescimento exponencial, com recordes sucessivos de capacidade instalada e projeções ambiciosas para as próximas décadas. Governos e empresas têm investido em tecnologias inovadoras, inteligência artificial, automação e práticas eficientes de O&M para garantir a máxima eficiência e durabilidade dos ativos solares. No entanto, desafios como variabilidade climática, custos operacionais e integração com redes elétricas tradicionais ainda exigem soluções estratégicas e regulatórias específicas para cada contexto.

O Brasil, com seu vasto potencial solar e incentivos governamentais, tem expandido rapidamente sua capacidade fotovoltaica. No entanto, fatores como a descentralização da rede, a logística de manutenção e a qualificação da mão de obra exigem aprimoramentos constantes nas práticas de O&M. Já a França, com uma abordagem centralizada e regulada, busca reduzir sua dependência da energia nuclear e otimizar a gestão de seus parques solares por meio de inovações tecnológicas e políticas ambientais rigorosas.

A convergência entre essas realidades destaca a importância do compartilhamento de boas práticas e do investimento em novas tecnologias, como manutenção preditiva, análise de desempenho avançada e automação de processos. A colaboração internacional e a padronização de indicadores de eficiência podem ser estratégias fundamentais para impulsionar o setor solar globalmente, garantindo não apenas sua viabilidade econômica, mas também sua contribuição para um futuro mais sustentável e resiliente.

Dessa forma, o avanço da O&M solar deve ser pautado pela inovação, pela adaptação às particularidades regionais e pelo compromisso com a sustentabilidade, promovendo um setor energético mais eficiente, confiável e preparado para atender às crescentes demandas globais por energia limpa.

REFERÊNCIAS

PERLIN, John. *The Evolution of Photovoltaic Technology: From Becquerel to the Present*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 9, p. 4021-4036, 2011.

PORTAL SOLAR. História e origem da energia solar. Portal Solar, 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/historia-e-origem-da-energia-solar>. Acesso em: 15 mai. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2024*. Paris, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2aedf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). *Brasil chega à sexta colocação no ranking mundial da energia solar e amplia protagonismo na transição energética*. Brasília, 2024. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2024/04/Press_Ranking_Mundial_Solar_Brasil_Sexto_Lugar.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional 2024: Relatório Síntese*. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

LE MONDE. *Protection de la biodiversité : faut-il changer les règles d'implantation des centrales solaires?* Le Monde, 5 set. 2024. Disponível em: https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/09/05/protection-de-la-biodiversite-faut-il-changer-les-regles-d-implantation-des-centrales-solaires_6304517_3244.html. Acesso em: 15 fev. 2025

FRANÇA. *Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte*. Journal Officiel de la République Française, Paris, 18 août 2015. Disponível em: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031044385>. Acesso em: 23 jan. 2025.

FRANÇA. *Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat* (Lei de Energia e Clima). **Journal Officiel de la République Française**, Paris, 9 nov. 2019. Disponível em: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039355955>. Acesso em: 23 jan. 2025.

FRANÇA. *Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE)*. Ministère de la Transition Écologique, 2020. Disponível em: <https://www.ecologie.gouv.fr/politiquespubliques/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>. Acesso em: 23 jan. 2025.

HØIAAS, Ingeborg et al. Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 161, p. 112353, 2022.

O SETOR ELÉTRICO. **Fascículo sobre energias renováveis**. Edição 160, 2020. Disponível em:
https://www.osetoreletrico.com.br/wpcontent/uploads/documentos/fasciculos/Edicao%20160_Renovaveis_fasc.pdf. Acesso em: 05 fev. 2025.

AZAM, Md Sadequl et al. Performance enhancement of solar PV system introducing semicontinuous tracking algorithm based solar tracker. **Energy**, v. 289, p. 129989, 2024.

NEXANS. Nexans Solar Technologies. *Nexans Brasil*, 2018. Disponível em:
<https://www.nexans.com.br/pt/Business/industry.and.solutions/Solar.Farms/NexansSolarTechnologies.html>. Acesso em: 05 fev. 2025.

A2 ENERGIA. Tudo sobre inversores: microinversor ou inversor string, qual escolher? *A2 Energia*. Disponível em: <https://a2energia.com.br/tudo-sobre-inversores-microinversor-ouinversor-string-qual-escolher/>. Acesso em: 05 fev. 2025.

SUNGROW. Sungrow's inversor central: o coração e a alma do seu sistema solar. *Sungrow Power Brasil*, [2023]. Disponível em:
<https://br.sungrowpower.com/SubscribeConfirmPage/2342/sungrow-s-inversor-central-ocora-o-e-a-alma-do-seu-sistema-solar>. Acesso em: 18 fev. 2025.

COSTA, André Luis Crispim; HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira; FERREIRA, Reginaldo Vagner. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, p. 201220, 2021.

HARRIS WILLIAMS. Renewable energy operations and maintenance. *Harris Williams*, 2023]. Disponível em: <https://www.harriswilliams.com/our-insights/renewable-energyoperations-and-maintenance>. Acesso em: 18 mai. 2024.

WALKER, H. A. **Best practices for operation and maintenance of photovoltaic and energy storage systems**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2018.

LIVERA, Andreas et al. Operation and maintenance decision support system for photovoltaic systems. **IEEE Access**, v. 10, p. 42481-42496, 2022.

KIKUMOTO, Bruno. Comissionamento de usinas e sistemas fotovoltaicos. *Canal Solar*, 24 fev. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/comissionamento-de-usinas-e-sistemasfotovoltaicos/>. Acesso em: 13 jun. 2024.

HUKSEFLUX. How to calculate PV performance ratio. *Hukseflux*, 2023. Disponível em:
<https://www.hukseflux.com/applications/solar-energy-pv-system-performancemonitoring/how-to-calculate-pv-performance-ratio>. Acesso em: 13 jun. 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

WALKER, H. A. **Best practices for operation and maintenance of photovoltaic and energy storage systems**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2018.

ENERGIA SOLAR SHOP. Termografia aérea de usinas solares fotovoltaicas. *Energia Solar Shop*. Disponível em: <https://www.energiasolarshop.com.br/product-page/termografiaa%C3%A9rea-de-usinas-solares-fotovoltaicas>. Acesso em: 25 jul. 2024.

GALLARDO-SAAVEDRA, Sara; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis; DUQUE-PÉREZ, Óscar. Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 93, p. 92-104, 2019.

GRIMACCIA, F. et al. Assessment of PV plant monitoring system by means of unmanned aerial vehicles. In: **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

GONZALO, Alfredo Peinado; MARUGÁN, Alberto Pliego; MÁRQUEZ, Fausto Pedro García. Survey of maintenance management for photovoltaic power systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110347, 2020.

AYVAZOĞLUYÜKSEL, Özge; FILIK, Ümmühan Başaran. Estimation methods of global solar radiation, cell temperature and solar power forecasting: A review and case study in Eskişehir. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 639-653, 2018.

CONCEICAO, Ricardo et al. Soiling effect in solar energy conversion systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, p. 112434, 2022.

FATHI, Mohamed; ABDERREZEK, Mahfoud; GRANA, Paul. Technical and economic assessment of cleaning protocol for photovoltaic power plants: Case of Algerian Sahara sites. **Solar Energy**, v. 147, p. 358-367, 2017.

KLIMM, Elisabeth et al. Soiling and abrasion testing of surfaces for solar energy systems adapted to extreme climatic conditions. In: **European PV Solar Energy Conference and Exhibition**. 2015.

WARD, G. T. Performance of a flat-plate solar heat collector. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 169, n. 1, p. 1091-1112, 1955.

BAKER, Derek Keith. Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes (INSHIP). 2020.

Guide EI – Installations photovoltaïques au sol, 2019. Disponível em: <link, se houver>. Acesso em: 14 fev. 2025.

GRANTEL ENGENHARIA. Subestação coletora Bon Nome. *Grantel Engenharia*, . Disponível em: <https://www.grantelengenharia.com.br/subestacao-coletora-bon-nome/>.

Acesso em: 14 fev. 2025.

REDISKE, Graciele et al. A proposed set of indicators for evaluating the performance of the operation and maintenance of photovoltaic plants. **Applied Energy**, v. 354, p. 122158, 2024.

HICKEL, Bernardo Meyer et al. Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos fv: revisão e medições de campo. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2016. p. 1-8.

MAGHAMI, Mohammad Reza et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1307-1316, 2016.

VOUILLON, Lucie. Development of a Tool to Compare the Operation of the Solar Plants Built by BayWa re France. 2022.

PASSINI, Aline Ferrão Custodio; NIZ, Isadora Victória Godonix; MUNARETTO, Lorimar Francisco; BORBA, Willian Fernando de; RODRIGUES, Alexandre Couto. Energia solar no Brasil: oportunidades e desafios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 15., 2024, Belém. Anais [...]. Belém: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2024. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2023/XV006.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025

PMarket Research. *Étude de marché sur la gestion intelligente de l'exploitation et de la maintenance des centrales photovoltaïques au niveau mondial et en France*. Disponível em: https://pmarketresearch.com/fr/rapports/etude-de-marche-sur-la-gestion-intelligente-delexploitation-et-de-la-maintenance-des-centrales-photovoltaïques-au-niveau-mondial-et-enfrance/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 15 fev. 2025.

ZULFAUZI, Irfan Adam et al. Anomaly detection using K-Means and long-short term memory for predictive maintenance of large-scale solar (LSS) photovoltaic plant. **Energy Reports**, v. 9, p. 154-158, 2023.

MÉTÉO-FRANCE. *Climat : 2023, la deuxième année la plus chaude*. 5 jan. 2024. Disponível em: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/climat-2023-la-deuxieme-annee-la-pluschaude>. Acesso em: 26 fev. 2025.

MIQUELA, Althea; BAGUL, Dhiraj; EZZAT, Ahmed Aziz. Defect detection in solar photovoltaic systems using unmanned aerial vehicles and machine learning. 2023.