

GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS EM USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA REGIÕES SEMIÁRIDAS DO BRASIL.

Lucas Alves Pinheiro¹
Humberto Ícaro Pinto Fontinele²

RESUMO

Esta pesquisa analisa os desafios e oportunidades da gestão sustentável de recursos hídricos em usinas solares fotovoltaicas nas regiões semiáridas do Brasil, onde a escassez hídrica e a elevada incidência solar coexistem. O estudo destaca o papel crucial dos reservatórios hídricos nas regiões semiáridas do Brasil, que garantem o abastecimento de mais de 10 milhões de pessoas e suportam atividades produtivas, como a irrigação para 50 mil hectares, mas que enfrentam desafios como perdas por evaporação e conflitos de uso. Paralelamente, a operação de usinas fotovoltaicas, que estão se tornando cada dia mais popular na região, devido à alta disponibilidade de radiação solar, requer práticas de manutenção, como a limpeza de módulos fotovoltaicos e resfriamento dos sistemas, que demandam volumes significativos de água, intensificando a pressão sobre os recursos hídricos locais. As diversas tecnologias presentes nos painéis fotovoltaicos influenciam na resiliência ao acúmulo de sujeira na face que recebe a radiação, influenciando diretamente na eficiência do painel. Esse trabalho aborda também essa influência no volume de água demandada na manutenção desses sistemas. Soluções como tecnologias de reuso de água, captação de água da chuva e lavagem a seco na redução dos impactos ambientais. A inter-relação entre gestão de água e geração de energia solar é apontada como estratégia essencial para viabilizar a sustentabilidade do semiárido brasileiro, trazendo produção de energia e equilíbrio na conservação dos recursos naturais. Este estudo conclui que a implantação de políticas públicas e inovação tecnológica é fundamental para integrar a demanda por energia e água, consolidando o semiárido brasileiro como modelo de sustentabilidade.

Palavras-chave: Recursos hídricos, Energia solar fotovoltaica, Semiárido brasileiro.

ABSTRACT

This research analyzes the challenges and opportunities of sustainable water resource management in photovoltaic solar power plants in the semi-arid regions of Brazil, where water scarcity and high solar incidence coexist. The study highlights the crucial role of water reservoirs in these regions, which ensure the supply of more than 10 million people and support productive activities such as irrigation for 50,000 hectares. However, these reservoirs face challenges such as evaporation losses and conflicts over water use. At the same time, the operation of photovoltaic plants becoming increasingly popular in the region due to the high availability of solar radiation requires maintenance practices such as cleaning photovoltaic modules and cooling systems, which demand significant volumes of water, further increasing pressure on local water resources. The various technologies used in photovoltaic panels influence their resistance to dirt accumulation on the surface exposed to radiation, directly affecting panel efficiency. This study also examines the impact of these technologies on the

¹ Discente da Especialização em Gestão de Recursos Hídricos Ambientais e Energéticos, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), luckasalves@yahoo.com.br.

² Docente do Programa de Pós-graduação, PGEA da UNILAB, icarofontainele@unilab.edu.br.

volume of water required for system maintenance. Solutions such as water reuse technologies, rainwater harvesting, and dry-cleaning methods are explored as strategies to mitigate environmental impacts. The interrelationship between water management and solar energy generation is identified as an essential strategy to ensure the sustainability of Brazil's semi-arid region, balancing energy production with natural resource conservation. This study concludes that implementing public policies and technological innovations is crucial to integrating energy and water demands, establishing the Brazilian semi-arid region as a model of sustainability.

Keywords: Water resources, Photovoltaic solar energy, Brazilian semi-arid region.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (2021), a gestão sustentável de recursos hídricos tem se tornado um dos grandes desafios globais do século XXI, especialmente em regiões onde a escassez hídrica já é uma realidade, como os territórios do semiárido. No Brasil, o semiárido ocupa cerca de 12% do território nacional, abrangendo nove estados do Nordeste e parte de Minas Gerais. Essas regiões lidam com climas rigorosos, marcados por pouca chuva e elevados níveis de evaporação. Nesse contexto, a implementação de usinas de geração fotovoltaicas surge como uma alternativa viável e estratégica para o desenvolvimento sustentável, aproveitando a abundante radiação solar da região. A geração fotovoltaica contribui para atenuar a escassez hídrica porque, ao contrário das usinas hidrelétricas e termoeletricas, que consomem grandes volumes de água em seus processos de operação e resfriamento, as usinas solares produzem energia sem depender diretamente de recursos hídricos para sua operação contínua. Dessa forma, ao utilizar a intensa radiação solar disponível nas regiões semiáridas, a energia fotovoltaica reduz a pressão sobre reservatórios e cursos d'água, preservando o uso da água para abastecimento humano, irrigação e outras atividades essenciais. A diversificação da matriz energética com o uso de fontes solares, ajuda a reduzir os efeitos das secas e dos períodos sem chuva, oferecendo maior segurança tanto para os recursos hídricos quanto energéticos, além de se estabelecer como uma alternativa promissora para áreas suscetíveis às alterações climáticas.

Conforme discutido pela GNPW (Gás Natural Soluções Energéticas) Group (2024), a transição energética para fontes renováveis, como a solar, é essencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Entretanto, a instalação e a operação de usinas solares podem ter impactos significativos no ciclo hidrológico, devido à demanda por água em processos como a limpeza dos módulos fotovoltaicos e o resfriamento de sistemas, dependendo do tipo de tecnologia empregada. Em regiões semiáridas, onde a água é um recurso escasso e fundamental para a agricultura, criação de animais e uso humano, a administração eficaz e sustentável desse recurso, no contexto do funcionamento de usinas solares, é vital para prevenir disputas e incentivar a harmonia entre as necessidades energéticas e hídricas.

A crescente necessidade de transição energética para fontes limpas e renováveis tem impulsionado a expansão das UFVs (Usinas Fotovoltaicas) em diversas regiões do mundo, especialmente no semiárido brasileiro, onde a alta incidência solar favorece a produção de eletricidade. No entanto, o funcionamento dessas usinas traz dificuldades ligadas à utilização de água, especialmente em locais que já sofrem com a falta desse recurso. A administração responsável da água nessas operações se torna, assim, um aspecto essencial para assegurar a viabilidade tanto ambiental quanto econômica de projetos desse tipo no futuro.

Segundo a ABSOLAR (2025), até janeiro de 2025, a fonte solar fotovoltaica no Brasil alcançou uma potência instalada de 52,1 GW, sendo 35,0 GW provenientes de geração distribuída e 17,1 GW de geração centralizada. Esse avanço no mercado fotovoltaico reflete o crescente interesse por fontes renováveis de energia, impulsionado pela busca por alternativas

sustentáveis diante das mudanças climáticas e da necessidade de diversificação da matriz energética brasileira.

Por outro lado, um relatório da Agência Nacional de Águas (2024) destaca que o agravamento do fenômeno da seca em diversas regiões do Brasil, como Nordeste, Sudeste, Norte e Centro-Oeste, intensificou a crise hídrica, deixando os principais reservatórios do país em condições críticas para a geração de energia. Essa situação resultou no aumento da tarifa de energia elétrica, por meio da Bandeira Escassez Hídrica, representando um acréscimo de R\$ 7,877 a cada 100 kWh consumidos, que corresponde a um aumento de 8,42%. Nesse cenário, a diversificação das fontes energéticas no Brasil, especialmente por meio de energias renováveis, como a solar, tem ganhado destaque.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2024) ressalta como alterações nas condições climáticas, como variações na temperatura e na precipitação, podem impactar a eficiência e a produção de energia solar. Esse estudo enfatiza a importância de considerar esses efeitos no planejamento e desenvolvimento de projetos de geração distribuídas, buscando promover uma matriz energética mais resiliente e sustentável. Assim, a integração de projetos solares fotovoltaicos no planejamento energético aumenta a robustez do sistema, minimizando os efeitos das variações hídricas e reforçando a segurança energética do país.

O objetivo geral deste estudo é investigar os desafios e as oportunidades da gestão sustentável de recursos hídricos em UFV nas regiões semiáridas do Brasil, visando encontrar soluções inovadoras, que unam a geração de energia fotovoltaica e a conservação dos recursos hídricos. Para alcançar esse objetivo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos: 1) avaliar o impacto do uso de água nas usinas solares fotovoltaicas em regiões semiáridas, considerando a escassez hídrica local, 2) investigar as tecnologias e práticas sustentáveis de uso da água para limpeza dos painéis fotovoltaicos, 3) propor soluções e estratégias integradas de gestão de recursos hídricos e energéticos que promovam a eficiência no uso da água nas usinas solares e contribuam para a sustentabilidade energética no semiárido.

Este estudo justifica-se pela urgência em promover a integração entre a gestão hídrica e a geração de energia renovável de maneira equilibrada e sustentável, por meio de um levantamento sobre as tecnologias voltadas ao uso eficiente de recursos hídricos em usinas fotovoltaicas.

Nesse contexto, este artigo aborda os desafios e oportunidades da gestão sustentável de recursos hídricos em usinas solares fotovoltaicas no semiárido brasileiro, onde a escassez hídrica é uma realidade. São analisados o impacto do uso de água na limpeza dos módulos solares, tecnologias disponíveis para otimizar a eficiência e práticas sustentáveis, como reúso de água, captação de chuva e limpeza a seco. A pesquisa utiliza revisão bibliográfica e estudos de caso para quantificar o consumo hídrico e propor soluções que integrem gestão hídrica e geração de energia renovável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Potencial hídrico no Brasil

O Brasil destaca-se globalmente na concentração de água doce, sendo responsável por 53% da concentração sul-americana e 12% da concentração mundial. A descarga de água doce dos rios brasileiros atinge 177.900 m³/s, com a Amazônia Internacional contribuindo com mais 73.100 m³/s (Rebouças, 2015). No entanto, essa riqueza hídrica não é uniformemente distribuída pelo território nacional, resultando em disparidades significativas entre oferta e demanda (Moreira et al., 2020).

A análise regional revela um cenário diverso. As 12 principais bacias hidrográficas do Brasil apresentam características únicas. No Centro-Oeste, a irrigação demanda grandes

volumes de água, enquanto o Sudeste enfrenta degradação ambiental e poluição (Braga et al., 2015). O Norte é abundante em recursos hídricos, necessitando de ações de conservação, enquanto o Nordeste sofre com escassez e exige investimentos em conservação e gestão de vazões (Libânio et al., 2005).

Em 2022, o Brasil retirou cerca de 64,18 trilhões de litros de água (equivalente a 2.035,2 m³/s) de diversas fontes, como rios, lagos e aquíferos. A irrigação representou 50,5% desse total, seguida pelo abastecimento urbano (23,9%) e pela indústria (9,4%). Outros usos incluíram dessedentação animal (8%), termelétricas (5%), abastecimento rural (1,6%) e mineração (1,6%) (ANA, 2024).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433/97, tem como objetivo principal promover o uso racional e integrado dos recursos hídricos em todo o território nacional. A legislação tem como objetivo assegurar que a água esteja acessível tanto para as gerações atuais quanto para as futuras, incentivando a reutilização do recurso hídrico e a proteção do meio ambiente. Ela estabelece diretrizes para o planejamento, gestão e uso dos recursos hídricos, além de promover a descentralização da gestão e a participação da sociedade na tomada de decisões. A Lei nº 9.433/97 também instituiu instrumentos de gestão, como os planos de bacias hidrográficas, a cobrança pelo uso da água e a gestão integrada das águas transfronteiriças, com o intuito de otimizar o uso e assegurar a sustentabilidade dos recursos. Além disso, a legislação estabelece metas claras para a melhoria da quantidade e qualidade dos recursos hídricos, com foco na recuperação de áreas degradadas, na proteção dos mananciais e na prevenção de conflitos pelo uso da água (Santos et al., 2008). Dessa forma, a PNRH representa um marco para a administração eficaz e contínua dos recursos hídricos no Brasil.

Em conclusão, o Brasil, que é um dos maiores detentores de água doce do mundo, enfrenta desafios na gestão de seus recursos hídricos devido à distribuição desigual entre as regiões. O Nordeste sofre com escassez, enquanto o Sudeste enfrenta problemas de poluição, exigindo soluções específicas para cada região. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) é fundamental para promover o uso racional da água, com instrumentos de gestão e diretrizes para sua preservação. No Semiárido, a captação de água da chuva surge como uma alternativa eficiente para amenizar a escassez de recursos hídricos. Portanto, é fundamental direcionar esforços em políticas públicas, inovação tecnológica e conscientização para assegurar a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental no Brasil.

2.2 Reuso da Água

O reuso de água é uma alternativa fundamental para enfrentar a crescente escassez hídrica, contribuindo para a diminuição do consumo de água potável em atividades que não exigem esse nível de qualidade. Segundo Moura et al. (2020), o reuso de água é uma prática que envolve a utilização de águas previamente utilizadas em alguma atividade humana, após tratamento adequado, para fins diversos, como irrigação agrícola, paisagismo, lavagem de veículos e até mesmo em processos industriais.

O reuso de água emerge como uma estratégia essencial para lidar com a crescente crise de escassez hídrica, promovendo a redução do consumo de água potável em aplicações que não demandam esse padrão de qualidade. Essa prática minimiza a pressão sobre fontes de captação de água superficiais e subterrâneas, substituindo a água potável em situações que toleram uma qualidade inferior. A redução da demanda permite que a água de alta qualidade seja direcionada exclusivamente para o abastecimento público e outros usos prioritários, favorecendo a conservação dos recursos hídricos e promovendo o planejamento econômico (CAGECE, 2022).

Assim, grandes volumes de água potável são preservados por meio do reuso, ao se empregar água de qualidade inferior para fins que não exigem potabilidade (Moreira et al., 2020). A reutilização da água é uma ferramenta eficaz para melhorar a relação entre a qualidade

e a quantidade desse recurso, além de ajudar a reduzir conflitos por usos concorrentes.

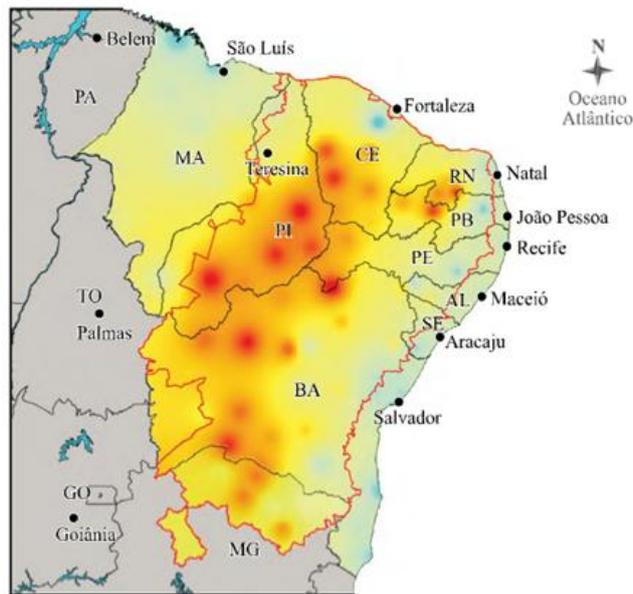
Diversos setores podem se beneficiar do aproveitamento da água de chuva. No setor industrial, ela se apresenta como uma opção mais econômica em relação à água disponibilizada por empresas fornecedoras, sendo também muito utilizada na área da construção. A agricultura também se destaca, já que as águas pluviais são naturalmente destiladas, proporcionando uma fonte eficiente e econômica (Rillo et al., 2006).

Portanto, é relevante ressaltar que, em grande parte dos casos, é possível aproveitar as águas pluviais de forma benéfica e sustentável, desde que o devido tratamento seja aplicado, de acordo com a destinação da água de reuso.

2.3 Uso da água no semiárido

O semiárido brasileiro é marcado pela distribuição irregular das chuvas, altos índices de radiação solar e temperaturas elevadas, fatores que, somados à limitada disponibilidade de eletricidade, dificultam o acesso à água (Valer et al., 2013). Essa região também possui características distintas, como solo raso, alta taxa de evaporação, desmatamento e peculiaridades na formação social. Esses fatores tornam a área única em um contexto global, pois não há outra região no mundo que combine condições semelhantes em termos de clima, ecologia, biologia e aspectos socioeconômicos (Albiero et al., 2017). A área de abrangência geográfica do semiárido brasileiro é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Abrangência semiárido brasileiro



Fonte: Adaptado INMET (2019), elaborado por ETENE/Banco do Nordeste.

As condições climáticas adversas tornam o uso e a gestão da água nesta região desafios críticos. O semiárido é caracterizado por chuvas escassas, irregulares e concentradas em poucos meses do ano, além das elevadas taxas de evaporação, o que exige uma gestão eficiente para atender às necessidades básicas da população e das atividades predominantes, como agricultura e pecuária (Valer et al., 2013). A água, frequentemente armazenada em açudes, cisternas ou pequenos reservatórios, é usada para múltiplos fins, mas sua disponibilidade limitada e, muitas vezes, sua má qualidade dificultam o atendimento das demandas essenciais em muitas localidades (Albiero et al., 2017).

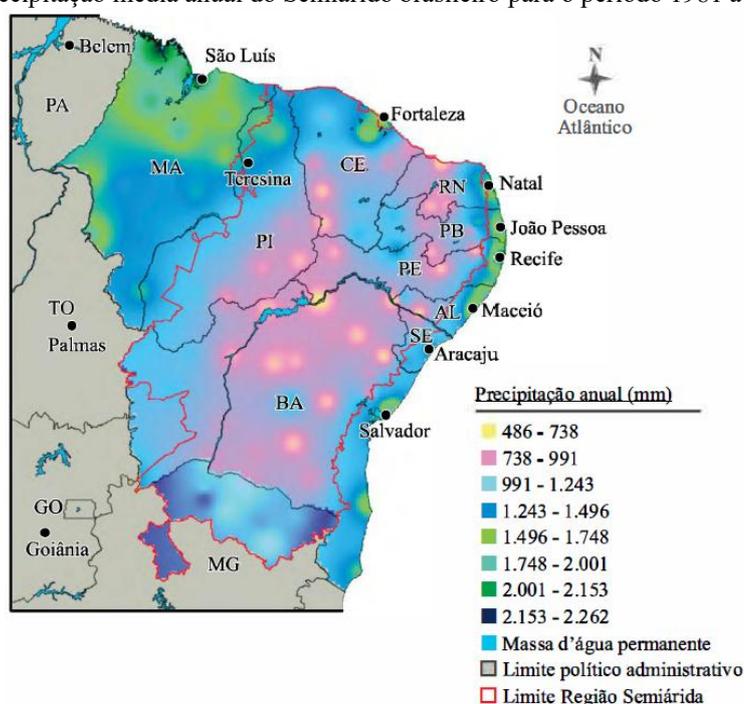
Além da água na região semiárida tem várias funções, não se destinando apenas ao uso humano, mas também a várias atividades econômicas, como a irrigação, que é uma das

principais necessidades de água nessa área. No entanto, práticas ineficientes de irrigação podem agravar o problema da escassez, ressaltando a necessidade de adotar tecnologias mais sustentáveis, como sistemas de irrigação por gotejamento e manejo eficiente do solo (Mendelsohn et al., 2012).

2.4 Aspecto Climáticos no Semiárido Brasileiro

O clima do semiárido brasileiro é caracterizado por sua marcante variabilidade espaço-temporal de precipitações, baixas totais anuais de chuvas e temperaturas elevadas durante quase todo o ano. Essa região é marcada por veranicos, que são períodos sem chuva dentro da estação chuvosa, além de eventos extremos, como secas prolongadas e, ocasionalmente, enchentes (Correia et al., 2011, p. X). Segundo Marengo (2006), o semiárido sofre entre 18 e 20 anos de seca a cada 100 anos, sendo essa frequência maior desde o século XX. Na Figura 2, mostra a precipitação média anual do seminário brasileiro.

Figura 2 – Precipitação média anual do Semiárido brasileiro para o período 1981 a 2010.

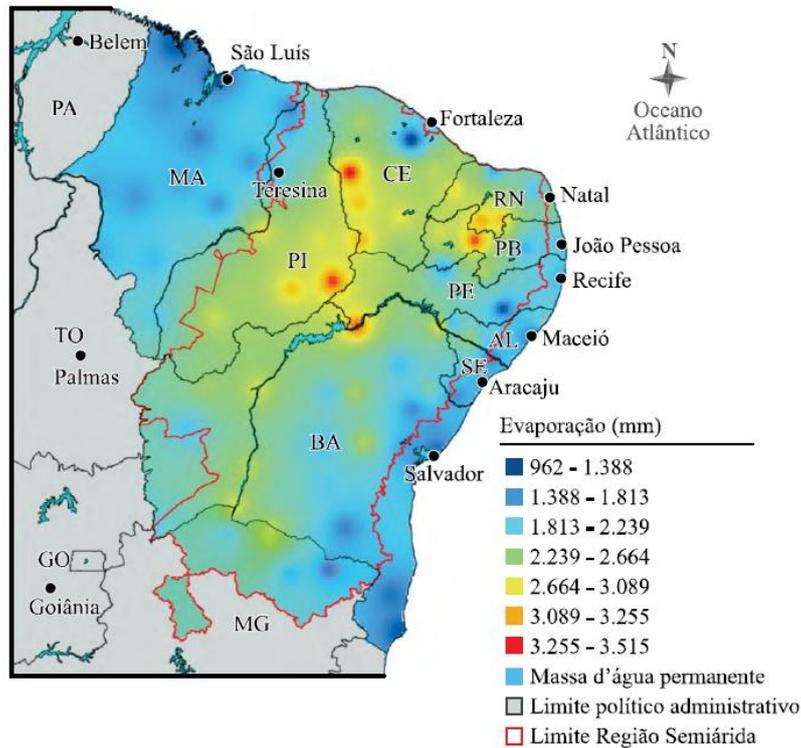


Fonte: Dados do INMET (2019), elaborado por ETENE/Banco do Nordeste.

A análise da Figura 4 revela uma significativa variação nos totais anuais de precipitação na região. No litoral leste, os índices de chuva ultrapassam 1.500 mm por ano, enquanto no interior esses valores diminuem drasticamente, chegando a menos de 500 mm. Essa redução nos totais anuais acompanha a transição do litoral para o interior. No entanto, existem pontos específicos no interior onde as chuvas alcançam cerca de 1.200 mm anuais, graças à presença de microclimas criados por serras e montanhas (Moura et al., 2018).

Outro aspecto importante é a alta taxa de evapotranspiração, resultado das elevadas temperaturas médias anuais, que oscilam entre 24 °C e 28 °C. A evapotranspiração reduz a disponibilidade de água no solo, agravando o déficit hídrico da região. Além disso, a intensidade da radiação solar durante todo o ano também contribui para o aumento das taxas de evaporação nos reservatórios hídricos (Moura et al., 2018). Na Figura 3, mostra as taxas de evaporação média anual do seminário brasileiro.

Figura 3 – Evaporação média anual do Semiárido brasileiro para o período 1981 a 2010.

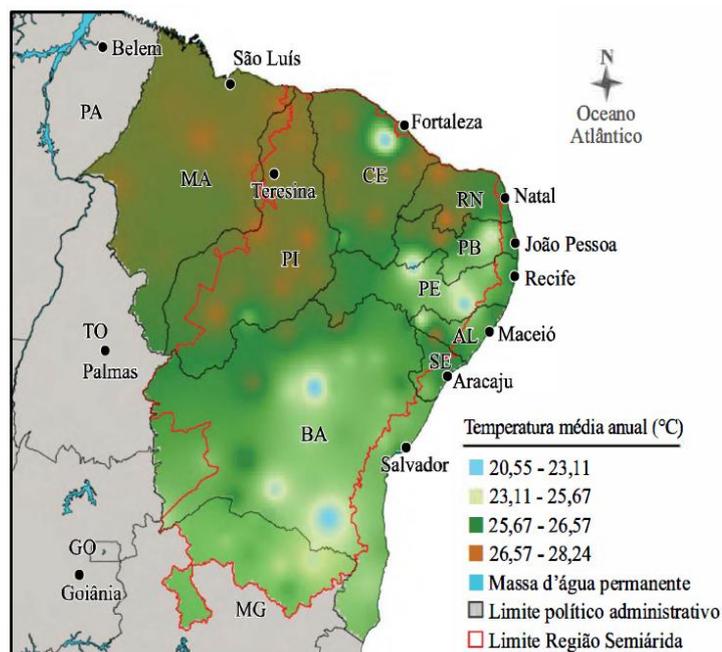


Fonte: Dados do INMET (2019), elaborado por ETENE/Banco do Nordeste.

As altas taxas de evaporação no Semiárido brasileiro, tanto nas superfícies de água como no solo, representam uma significativa perda na disponibilidade hídrica da região. Essa diminuição afeta de forma direta o desenvolvimento das espécies, resultando em uma seleção natural das que estão mais adaptadas à falta de água. Além disso, essa situação influencia o desenvolvimento de estratégias de convivência das famílias e da agropecuária local, visto que a falta de água afeta a vida cotidiana e as práticas agrícolas.

As características climáticas da região Semiárida, que exibem médias anuais de temperatura entre 24°C e 28°C, intensificam os desafios relacionados ao fornecimento de água. A umidade relativa do ar é baixa, especialmente na região central, onde atinge cerca de 56%, e aumenta conforme se aproxima da faixa de transição com o litoral. Além disso, os ventos fortes e secos, em conjunto com o relevo e o solo da região, contribuem para a aridez e as condições extremas do clima, que afetam tanto a fauna quanto a flora, assim como a vida humana e a produção agropecuária (Moura et al., 2018). A Figura 4 - mostra as taxas de temperatura média anual do seminário brasileiro.

Figura 4 – Temperatura média anual do Semiárido brasileiro para o período 1981 a 2010.



Fonte: Dados do INMET (2019), elaborado por ETENE/Banco do Nordeste.

As altas temperaturas, associadas às elevadas taxas de evapotranspiração e aos baixos índices de precipitação, são fatores cruciais para o fenômeno da seca, comum no Semiárido. Esses fatores climáticos se combinam de tal forma que aumentam a falta de água, piorando a condição de déficit hídrico na região.

2.5 Uso de Água na operação de Sistemas Fotovoltaicos

A principal demanda por água nas usinas solares está associada à limpeza dos módulos solares, necessária para remover poeira, sujeira e outros detritos que reduzem a eficiência na conversão de energia. Em áreas semiáridas, como o Nordeste brasileiro, essa necessidade pode gerar desafios significativos devido à limitada disponibilidade de recursos hídricos. No caso dos sistemas fotovoltaicos, o resfriamento do sistema de processamento de energia não é uma demanda relevante, uma vez que esses sistemas convertem diretamente a luz solar em eletricidade, sem envolver processos térmicos que exijam resfriamento. Diferentemente, as usinas de Energia Solar Concentrada (CSP) requerem resfriamento para condensar o vapor gerado em seus ciclos termodinâmicos. Os sistemas de conversão de energia solar variam conforme a tecnologia empregada, destacando-se duas principais formas de captação de energia solar: energia solar fotovoltaica (FV) e energia solar concentrada (CSP), que são exploradas a seguir.

2.5.1 Energia Solar Concentrada (CSP)

A Energia Solar Concentrada (CSP), segundo Mendelsohn et al. (2012), utiliza espelhos ou lentes para concentrar a luz solar em um ponto ou linha, gerando calor suficiente para acionar um ciclo termodinâmico, como uma turbina a vapor, e produzir eletricidade. Diferente dos sistemas fotovoltaicos, que convertem diretamente a luz solar em eletricidade, o CSP depende desse processo térmico, sendo mais adequado para regiões com alta incidência solar direta e contínua. Para Mendelsohn et al. (2012), a tecnologia CSP é mais amplamente utilizada em regiões com alta incidência de radiação solar direta e constante, conhecidas como regiões de alta insolação, como Estados Unidos e Europa. Essa tecnologia é menos viável em locais com alta presença de nuvens ou nebulosidade, onde a radiação solar direta é limitada.

O resfriamento é uma etapa essencial para garantir a eficiência do ciclo termodinâmico, pois após a luz solar concentrada gerar vapor e mover a turbina, o vapor precisa ser resfriado e condensado para reiniciar o ciclo. Essa fase de condensação é crucial, pois sem ela o sistema perderia eficiência e não funcionaria corretamente. O resfriamento pode ser úmido, consumindo grandes volumes de água, ou seco, utilizando ar, o que é preferido em áreas com escassez hídrica, como regiões semiáridas ou desérticas, mesmo com uma leve perda de eficiência térmica. A escolha entre esses métodos impacta diretamente a viabilidade e sustentabilidade dos projetos de CSP. Na Figura 5 é apresentada a foto de uma CSP do tipo calha parabólica, localizada em Nevada no Estados Unidos, com potência instalada de 64 MW (Mendelsohn et al., 2012).

Figura 5 – Sistema CSP do tipo calha parabólica.



Fonte: MENDELSON et al. (2012).

2.5.2 Energia Solar Fotovoltaica (FV)

O funcionamento dos sistemas fotovoltaicos (FV) baseia-se na conversão direta da energia da radiação solar em eletricidade, por meio do efeito fotovoltaico. Esses sistemas são formados por painéis compostos por células fotovoltaicas (Figura 6) combinadas em série e em paralelo e encapsuladas, formando um equipamento chamado módulo fotovoltaico, responsáveis por transformar a luz solar em energia elétrica. Quando a luz solar incide sobre os módulos fotovoltaicos, os fótons transferem energia para os elétrons do material semicondutor (geralmente silício), liberando-os de seus átomos e criando pares de elétrons e lacunas. Esse movimento de elétrons gera uma corrente elétrica contínua (CC), que é conduzida pelos terminais do módulo. Esse processo ocorre de forma independente em cada módulo, mas, ao serem conectados, os módulos otimizam a geração de energia conforme necessário (Rashad et al., 2013).

Figura 6 – Planta Solar FV



Fonte: Autor (2024).

Ao contrário do sistema CSP, sistemas baseados nesta tecnologia utilizam a água somente para garantir a transparência das superfícies dos painéis fotovoltaicos, o que geralmente ocorre por meio de lavagem com água ou, ocasionalmente, pela ação da chuva (Mendelsohn et al., 2012). Em grandes instalações, a limpeza é frequentemente realizada com equipamentos que pressurizam e pulverizam água nos painéis ou com dispositivos que liberam água de forma gradual, os quais são acompanhados de escovas acopladas, que ajudam a remover as impurezas acumuladas, como mostrado na Figura 7 (Bunyan; Ali; Alnaser, 2016).

Figura 7 – Limpeza de painéis fotovoltaicos.



Fonte: Autor (2024).

Para Mendonça (2021), a geração de energia fotovoltaica no semiárido brasileiro tem se destacado como uma alternativa sustentável, com baixo impacto hídrico em comparação com usinas hidrelétricas e termelétricas. No caso das usinas fotovoltaicas (FV), os registros indicam que o consumo de água pode variar entre 0 m³/MWh e 0,125 m³/MWh, com uma média estimada de 0,118 m³/MWh (Macknick et al., 2011). Com base no estudo, realizado por

Mendonça (2021), a água utilizada na região tem custo de aproximadamente R\$ 60,00/m³, refletindo os custos com o transporte em áreas com escassez hídrica. Apesar do custo da água, soluções como a captação de água da chuva têm mostrado eficácia para reduzir o impacto financeiro. No aspecto econômico, a energia fotovoltaica no mercado livre é competitiva, com custos de operação anual de cerca de R\$ 20,00 por kWp instalado, o que torna a energia fotovoltaica uma opção viável e rentável em relação a outras fontes de energia (Mendonça, 2021). A critério exemplificativo, na Tabela 1, a seguir, são resumidos os principais dados referentes ao uso de água e aos custos associados à operação do parque solar Ituverava (Tabocas, Bahia), de 292 MWp de carga instalada e 5.790.000 m² de área de painéis.

Tabela 1 – Informações levantadas de O&M do parque solar Ituverava.

Indicador	Valor
Consumo de água por MWh (O&M)	0,118 m ³ /MWh
Custo da água (caminhão-pipa)	R\$ 60,00/m ³
Custo de operação (O&M)	R\$ 20,00/kWp/ano

Fonte: Adaptado de MENDONÇA (2021, p.36).

O artigo de Mendonça (2021), apresenta dados financeiros sobre o Parque Solar Ituverava, que consome aproximadamente 9.540 m³ de água por ano para limpeza, ao custo de R\$ 60,00/m³, totalizando R\$ 572.400,00/anual. Esse consumo equivale a 0,118 m³/MWh, resultando em um custo de água de R\$ 0,53 por real de energia gerado e representando apenas 0,53% da receita anual de R\$ 108.560.000,00. Apesar de ser financeiramente pouco significativo e não comprometer a viabilidade econômica do projeto, esse custo pode ser reduzido com práticas sustentáveis, como captação de água da chuva, reuso após tratamento e tecnologias de limpeza a seco, que também aumentam a eficiência operacional. Entretanto, mesmo com impacto financeiro modesto, o consumo hídrico em usinas fotovoltaicas é ambientalmente relevante, especialmente em regiões semiáridas onde a água é escassa e disputada.

2.6 Viabilidade de Uso da Água das Chuvas Para Limpeza de Módulos FV

Nesse sentido, a água da chuva se configura como uma opção mais apropriada para fins não potáveis, como a irrigação e a lavagem de veículos, liberando os recursos hídricos mais nobres para usos mais essenciais e críticos (Goldenfum, 2015; Soares et al., 1997).

A eficiência da geração de energia de uma usina solar fotovoltaica depende, em grande parte, da quantidade de irradiância solar que incide sobre as células solares dos módulos. No entanto, a presença de partículas acumuladas nos módulos fotovoltaicos pode afetar diretamente essa eficiência, reduzindo a produção de energia. Este problema tende a se intensificar com a expansão das usinas fotovoltaicas, especialmente aquelas com potências na faixa de MW e GW, o que exige um foco crescente na gestão e manutenção dos módulos para garantir um desempenho ideal (Maghami et al., 2016).

Um dos métodos eficazes para mitigar os impactos da acumulação de poeira nos módulos é a utilização da água da chuva, que pode desempenhar um papel significativo no controle da sujeira e na limpeza dos painéis solares. A captação de água da chuva, além de contribuir para a eficiência operacional das usinas fotovoltaicas, é uma prática fundamental para reduzir o desperdício de água, especialmente em regiões semiáridas como o Brasil. Essa abordagem não só auxilia na conservação hídrica, mas também oferece benefícios socioambientais e econômicos, com potencial para ser amplamente adotada em várias regiões do país (Dantas et al., 2017). Nesse contexto, torna-se essencial avaliar a qualidade da água da chuva para atender às necessidades específicas dos parques fotovoltaicos, considerando as

diferentes demandas de operação e manutenção.

A água da chuva é, de maneira geral, classificada como "mole", ou seja, possui baixa concentração de sais de magnésio e cálcio. Essa característica torna a água da chuva apropriada para diversos processos industriais, incluindo aqueles necessários nas usinas fotovoltaicas, onde seu uso não potável se restringe ao controle de poeira durante a fase de construção e à limpeza dos módulos durante a operação e manutenção (O&M). De acordo com Valle (2007), a água da chuva apresenta uma qualidade suficientemente boa para demandas que não requerem água potável, como é o caso das usinas FV, exigindo apenas filtragens simples para remover partículas em suspensão, o que a torna uma opção prática e de baixo custo (Klise et al., 2013).

Ademais, a água da chuva oferece uma alternativa viável em comparação com a água potável, que é distribuída por empresas públicas ou privadas para uso comercial e doméstico. A água potável apropriada para consumo humano deve cumprir regras rigorosas de qualidade para satisfazer as exigências das pessoas, como hidratação e uso em produção de alimentos, por exemplo.

Portanto, a água da chuva se configura como uma solução estratégica e sustentável para o funcionamento de usinas fotovoltaicas, particularmente em áreas semiáridas do Brasil. Seu uso na utilização para limpeza dos módulos solares e na redução de poeira pode melhorar a performance das usinas, ao mesmo tempo que favorece uma gestão da água mais equilibrada e consciente. A qualidade da água da chuva, adequada para esses usos, e a sua capacidade de atender às necessidades não potáveis das usinas fotovoltaicas evidenciam o potencial dessa prática na implementação de soluções sustentáveis no setor de energia renovável.

2.7 Recursos Hídricos Subterrâneos

Os recursos hídricos subterrâneos possuem papel crucial no contexto das regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água superficial é limitada e frequentemente irregular. Nessas áreas, predominam formações de embasamento cristalino, que restringem a capacidade de armazenamento hídrico, pois os aquíferos subterrâneos dependem de fraturas e fissuras nas rochas. Embora esses recursos sejam estratégicos por estarem protegidos da evaporação e de agentes poluidores, sua exploração enfrenta limitações significativas devido às baixas vazões e à qualidade inferior, marcada por altos níveis de salinidade e sodicidade. Essas características destacam a importância de estratégias sustentáveis para a gestão desse recurso, especialmente para atender demandas locais de irrigação e consumo humano (Montenegro & Montenegro, 2012).

A exploração de aquíferos subterrâneos no semiárido brasileiro enfrenta desafios relacionados não apenas à quantidade, mas também à qualidade da água. Estudos apontam que as águas subterrâneas, sobretudo em aquíferos aluviais, frequentemente apresentam salinidade elevada, limitando seu uso direto para irrigação sem medidas de manejo adequadas (Suassuna & Audry, 1995; Montenegro et al., 2003c). Além disso, a exploração indiscriminada de poços, especialmente do tipo Amazonas, contribui para o rebaixamento dos lençóis freáticos e para a degradação da qualidade do recurso, o que mostram a necessidade de monitoramento e regulamentação mais eficazes. Apesar de avanços em iniciativas como perfuração de poços e técnicas de recarga artificial, essas ações ainda carecem de apoio técnico e políticas públicas robustas que promovam práticas sustentáveis (Montenegro & Montenegro, 2012).

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região semiárida requer uma atenção particular às tecnologias de manejo e métodos de conservação que reduzam os impactos ambientais. Técnicas como a construção de barragens subterrâneas e sistemas de captação de água de chuva em cisternas podem auxiliar na recarga de aquíferos e no aproveitamento das águas disponíveis para usos agrícolas e domésticos. Contudo, essas iniciativas devem ser acompanhadas de análises de viabilidade técnica e econômica, bem como de estudos contínuos

sobre a qualidade da água armazenada e extraída. A falta de planejamento integrado pode levar à exploração excessiva, ao rebaixamento dos lençóis freáticos e à contaminação das águas subterrâneas, comprometendo sua sustentabilidade. Por isso, é fundamental que políticas públicas sejam implementadas para regular o uso, promover a educação ambiental e fortalecer a pesquisa científica, garantindo assim a segurança hídrica nas regiões semiáridas (Montenegro & Montenegro, 2012)

2.8 Importância da Limpeza dos Módulos FV

A limpeza de módulos fotovoltaicos é uma prática crucial para manter o desempenho ideal de sistemas solares e minimizar as perdas causadas pela acumulação de sujeira. A sujeira, composta por poeira, resíduos orgânicos e outros materiais, impede que a radiação solar atinja diretamente as células fotovoltaicas, reduzindo a eficiência energética. Estudos mostram que a sujeira pode ocasionar perdas de eficiência de até 16,52% em sistemas localizados em regiões com pouca precipitação, como o semiárido brasileiro. Além disso, a ausência de limpeza dos módulos pode resultar em perdas de geração energética de até 11,71% em períodos secos de 17 dias sem chuvas (Araújo; Carvalho; Dupont, 2019).

A comparação entre a eficiência dos módulos antes e depois da limpeza, baseada nos estudos de Hickel et al. (2016) e Barbosa et al. (2018), mostra que frequência de limpeza é um fator determinante e deve ser ajustada conforme as condições ambientais e climáticas. Em áreas urbanas, industriais ou áridas, onde a acumulação de partículas é mais intensa, intervenções regulares são indispensáveis. Sistemas limpos frequentemente podem apresentar aumentos de rendimento de até 10% em relação aos negligenciados. Por outro lado, em regiões com chuvas regulares, a inclinação adequada dos módulos pode promover autolimpeza, reduzindo a necessidade de manutenção manual.

A escolha do método de limpeza é igualmente importante. Métodos manuais são amplamente utilizados, mas em grandes instalações, o uso de sistemas automatizados ou tecnologias específicas, como água desmineralizada, tem se mostrado mais eficiente. Apesar dos custos associados, o aumento na eficiência energética justifica o investimento, contribuindo para a redução do tempo de retorno financeiro do sistema, que varia entre cinco e oito anos dependendo do porte e das condições de operação (Moraes et al., 2022).

Segundo os estudos de Hickel et al. (2016) e Barbosa et al. (2018), além da limpeza regular, a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que minimizem a acumulação de sujeira nos módulos fotovoltaicos têm ganhado relevância. Revestimentos autolimpantes e materiais com propriedades hidrofóbicas podem reduzir significativamente o acúmulo de partículas e facilitar a manutenção. Essas inovações, juntamente com sistemas de vigilância em tempo real, possibilitam identificar reduções na eficiência e definir o instante mais adequado para ações corretivas. O avanço científico e tecnológico nesse setor é crucial para assegurar o melhor uso da energia solar, principalmente em grandes usinas geradoras, onde os efeitos da sujeira são intensificados.

2.9 Impacto Financeiro do Uso de Água na Geração FV

O uso de água em plantas fotovoltaicas, principalmente em regiões como o semiárido brasileiro, apresenta desafios financeiros significativos. Durante a operação dessas plantas, a limpeza dos módulos fotovoltaicos é essencial para manter a eficiência dos equipamentos, consumindo volumes consideráveis de água. Como apresentado por Mendonça (2021), no caso do Parque Solar Ituverava, foram necessários 9.540 m³ de água por ano para limpeza, representando uma despesa constante durante toda a vida útil do projeto, que pode chegar a 30

anos. Essa aplicação evidencia a importância de um planejamento financeiro para assegurar a viabilidade econômica do projeto.

Conforme Mendonça (2021), na fase de construção, o consumo de água é elevado devido à necessidade de compactação de solo, controle de poeira e preparação de concreto. Em Ituverava, o uso total estimado foi de 21.514 m³ em 18 meses. A alta demanda hídrica durante esta fase exige investimentos em infraestrutura para transporte e armazenamento de água, o que aumenta os custos de implementação do projeto.

A análise de Mendonça (2021) destacou a implementação de reservatórios de captação de água da chuva como uma solução viável para mitigar os impactos financeiros e ambientais. Apesar do custo inicial associado à construção dos reservatórios e sistemas de bombeamento, verificou-se que esta medida representa apenas 0,01% do custo total de construção do projeto. Este investimento reduz a dependência de fontes externas de água, trazendo economia a longo prazo e maior previsibilidade financeira para a operação da planta. Além disso, a adoção de métodos sustentáveis, como a reutilização da água e a captação de água da chuva, não somente diminui as despesas operacionais, mas também traz vantagens para o meio ambiente. No contexto de crescente escassez hídrica, especialmente em regiões semiáridas, essas práticas são essenciais para garantir a viabilidade econômica de longo prazo dos empreendimentos. Elas igualmente destacam a determinação das organizações em cumprir metas de sustentabilidade, harmonizando-se com as exigências tanto dos investidores quanto dos reguladores.

Em termos financeiros, o estudo revela que o custo de água para limpeza dos módulos fotovoltaicos no Parque Solar Ituverava foi de R\$ 572.400,00 por ano, representando 0,53% da receita total da venda de energia gerada. Esse custo, apesar de considerável, é pequeno em relação ao valor proporcionado pela comercialização de energia. Na Tabela 2 pode se observar que os gastos com operação e manutenção (O&M), que incluem o custo da água, representam cerca de 4,40% da receita anual da usina, conforme os dados obtidos.

Tabela 2 – Comparativo de receita e gastos com limpeza e uso de água.

Descrição	Valor(R\$)
Receita anual com venda de energia	108.560.000,00
Custo anual de água para limpeza	572.400,00
Custo de operação (O&M)	4.200.000,00
Total de gastos (limpeza + O&M)	4.772.400,00
Percentual dos gastos sobre a receita	4,40%

Fonte: Adaptado de MENDONÇA (2021, p.36).

Apesar desse custo, a implementação de sistemas de captação de água da chuva e tecnologias de reutilização poderia reduzir esse percentual, como sugerido por Mendonça (2021), ajudando a tornar a usina financeiramente mais viável e sustentável a longo prazo.

2.10 Estudos Brasileiros Sobre os Impactos da Sujeira na Geração FV

O artigo de Hickel et al. (2016) fornece resultados sobre os efeitos do acúmulo de sujeira em diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos. O estudo, realizado em Brotas de Macaúbas, na Bahia, utilizou dados de cinco sub-plantas (Figura 8) de 2 kWp cada. Os resultados indicam que a sujeira afeta os módulos de formas variadas, de acordo com as tecnologias que eles utilizam. Entre os módulos de silício cristalino, os de policristalino (p-Si) sofreram perdas 2,5 vezes maiores do que os de monocristalino (m-Si), devido à distribuição não uniforme da sujeira. Já entre os módulos de filmes finos, os de silício amorfo (a-Si) apresentaram as maiores perdas, enquanto os de seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) foram os menos afetados, evidenciando a influência da resposta espectral de cada tecnologia.

Figura 8 – Acúmulo de sujeira sobre módulos FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ μ c-Si, a-Si, p-Si, m-Si).



Fonte: Hickel et al., (2016).

O estudo de Hickel et al. (2016) também identificou que a distribuição não uniforme da sujeira contribui para descasamentos elétricos entre as células, intensificando o impacto nas perdas de potência total. Esses resultados reforçam a importância de considerar as condições de acúmulo de sujeira e a escolha da tecnologia FV mais adequada para maximizar a eficiência em ambientes com alta presença de material particulado (Hickel et al., 2016).

Barbosa, Faria e Gontijo (2018) analisaram os impactos do acúmulo de sujeira em uma micro usina fotovoltaica de 12 kWp, localizada no Centro Universitário de Patos, de Minas, Minas Gerais. O estudo comparou a produção de energia entre módulos limpos e sujos, mostrando que a limpeza periódica aumentou a geração de energia em até 10,26%. Os pesquisadores destacaram que poeira, fezes de aves e outros contaminantes formam uma camada sobre os módulos, reduzindo a incidência de luz solar e provocando aquecimento indesejado, o que afeta a eficiência e a durabilidade dos equipamentos. Assim, a manutenção regular, com frequência adaptada às condições locais, mostrou-se essencial para otimizar o desempenho e prolongar a vida útil dos sistemas fotovoltaicos. O estudo concluiu que um método de limpeza simples e econômico pode restabelecer a eficácia do sistema a patamares próximos aos valores iniciais de funcionamento, evidenciando a relevância da manutenção preventiva para otimizar a produção de eletricidade e prolongar a vida útil dos módulos. Na Figura 9 são apresentadas imagens das placas fotovoltaicas antes e depois da limpeza, respectivamente.

Figura 9 – Módulos fotovoltaicos antes da limpeza e depois da limpeza.



Fonte: Barbosa, Faria e Gontijo (2018).

O artigo de Mendonça (2021) avalia o impacto do uso de água para a limpeza de módulos fotovoltaicos no Parque Solar Ituverava, na Bahia, que possui uma área total de 2.384.928 m² de módulos. A limpeza dos módulos requer cerca de 2,0 litros de água por metro quadrado, totalizando 9.540 m³ de água por ano, que corresponde a 9,5 milhões de litros de água por ano, com limpezas realizadas duas vezes ao ano. O estudo indica que a adoção de sistemas para coletar água da chuva pode ser uma abordagem sustentável para diminuir o uso de água potável, favorecendo a independência hídrica do parque.

O parque solar Ituverava na Bahia, com capacidade instalada de 210 MWp, consome aproximadamente 9.540 m³ que é aproximadamente 0,022 m³/MWh de água por ano para a limpeza de seus painéis fotovoltaicos. Esse volume de água, custando em média R\$ 60,00 por metro cúbico, representa um gasto anual de R\$ 572.400,00. Comparado à receita gerada pela venda de 434,24 GWh de energia, estimada em R\$ 108,56 milhões, o custo da água equivale a cerca de 0,53% do valor de venda da energia produzida (Mendonça, 2021).

O artigo Soares Júnior, Cruz e Amaral (2018) investigaram o impacto da sujidade em módulos fotovoltaicos instalados na Universidade Estadual de Montes Claros, em Minas Gerais. A planta, com potência instalada de 12,6 kWp, é composta por três *arrays* contendo 84 módulos de silício policristalino (p-Si). A análise comparou dois *arrays*: um mantido sujo durante todo o experimento e outro limpo, em diferentes intervalos. Os resultados indicaram que o acúmulo de sujeira, observado entre 18/09/2017 e 30/09/2017, resultou em uma perda média de geração de energia de 20%. Além disso, concluiu-se que limpezas em intervalos menores que 15 dias não são necessárias, já que não apresentam benefícios significativos na eficiência.

Fraga et al. (2018) avaliaram o impacto da sujidade na planta fotovoltaica instalada no estádio Governador Magalhães Pinto, em Belo Horizonte, Minas Gerais. A planta possui 5.910 módulos de silício monocristalino (m-Si), com potência instalada de 1,42 MWp, distribuídos em 88 setores, sendo 42 setores com 75 módulos e 46 setores com 60 módulos. Cada setor é subdividido em três conjuntos (A, B e C). No estudo, os conjuntos A e B, localizados em regiões opostas do estádio, foram analisados, com dois setores limpos manualmente a cada cinco dias como referência. Após uma chuva de 7 mm no 23º dia e uma limpeza manual no 30º dia, verificou-se que a sujidade reduziu a potência de pico em 13,7% no período seco e 6,5% após a chuva. A produção diária de eletricidade foi reduzida em 16,5% no período seco e 8% após a chuva. A análise das partículas de poeira revelou tamanhos médios de 35,3 µm e 28,7 µm nos conjuntos A e B, respectivamente.

3 METODOLOGIA

3.1 Natureza da Pesquisa

A pesquisa é de natureza aplicada, uma vez que busca identificar soluções práticas para problemas específicos relacionados ao uso de recursos hídricos em usinas fotovoltaicas. A aplicabilidade direta dos resultados visa melhorar a gestão da água e a sustentabilidade das usinas em regiões semiáridas.

3.2 Tipos de Estudo

O estudo classifica-se como uma pesquisa exploratória, pois busca descrever e analisar a interação entre a geração de energia solar e o consumo de água nas usinas fotovoltaicas. Os principais estudos realizados incluem a quantificação do uso de água, as práticas de limpeza dos módulos fotovoltaicos e a identificação dos desafios enfrentados pelas usinas localizadas no semiárido brasileiro.

3.3 Abordagem Metodológica

Adota-se uma abordagem mista, combinando métodos quantitativos e qualitativos.

- Quantitativa: A pesquisa apresenta dado de volume de água utilizada em usina real de geração fotovoltaica, analisando a eficiência energética e a frequência de limpeza dos módulos, utilizando dados medidos para gerar uma visão precisa do impacto ambiental.

- Qualitativa: A análise qualitativa se concentra nas práticas de limpeza, nos desafios logísticos e na infraestrutura para captação de água, proporcionando uma compreensão mais detalhada dos processos e dificuldades enfrentadas pelas usinas em climas semiáridos.

3.4 Procedimentos Técnicos

A metodologia inclui dois procedimentos principais, que foram aplicados de forma sequencial para garantir um estudo abrangente. Esses métodos estão descritos abaixo.

- Revisão Bibliográfica: A primeira etapa consistiu em uma revisão da literatura científica e técnica sobre o uso de água em usinas fotovoltaicas e suas implicações ambientais, com destaque para regiões semiáridas. Essa revisão baseou-se em artigos científicos, relatórios técnicos e estudos de caso anteriores, sobre a interação entre geração solar e consumo de água.
- Estudo de caso: A partir da seleção de uma usina representativa, foi conduzido um estudo de caso para analisar as especificidades de cada operação, os impactos da sujeira acumulada nos módulos e as práticas regionais de gestão hídrica.

3.5 Método Científico

A pesquisa segue o método indutivo, baseado na coleta de dados de estudo já realizado em usina fotovoltaica, para gerar conclusões gerais sobre os impactos do uso de água e as melhores práticas para otimizar a racionalização desse uso. A análise dos dados coletados visa criar recomendações aplicáveis para outras usinas fotovoltaicas, instaladas em locais de climas semelhantes.

3.6 Técnicas de Coleta de Dados

As técnicas de coleta de dados foram aplicadas diretamente na usina selecionada para o estudo de caso e incluem:

- Quantificação das Demandas de Água: levantamento do volume de água utilizado na limpeza dos módulos fotovoltaicos na usina em questão. Essa medição foi realizada por meio de registros operacionais da usina em estudo e de dados apresentados no estudo;
- Análise das Práticas de Limpeza: estudo sobre a frequência e as metodologias de limpeza utilizadas comumente nas usinas, com foco nos impactos na eficiência energética e no uso de água;
- Investigação dos Desafios Regionais: levantamento das dificuldades enfrentadas pelas usinas no semiárido, com ênfase na disponibilidade de água, custos logísticos e limitações de infraestrutura para captação ou reutilização de água da chuva.

3.7 Análise dos Dados

A análise dos dados é feita utilizando os dados quantitativos, como o volume de água consumido, frequência de limpeza e a relação desta frequência com a eficiência energética. Os dados foram analisados para identificar e elaborar conclusões e recomendações sobre a gestão de água nas usinas fotovoltaicas no semiárido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Quantificação das Demandas de Água

A medição das necessidades de água em usinas de energia solar fotovoltaica é crucial para analisar os efeitos ambientais dessas estruturas, principalmente em áreas semiáridas, onde a disponibilidade de água é limitada. Essa análise abrange a medição dos volumes de água utilizados em processos operacionais, com destaque para a limpeza dos módulos fotovoltaicos, principal atividade consumidora de água.

O consumo médio de água em usinas solares varia conforme o tamanho da instalação, a frequência de limpeza e a tecnologia utilizada. No parque solar Ituverava, por exemplo, foi registrado um consumo de 0,118 m³/MWh, um valor alinhado com os reportados na literatura para regiões semiáridas. Tecnologias mais avançadas, como os módulos CIGS, apresentam maior resistência ao acúmulo de sujeira, reduzindo a necessidade de limpezas frequentes e, conseqüentemente, o consumo de água ao longo da vida útil do sistema.

A logística para obtenção de água, especialmente em regiões semiáridas, pode gerar custos elevados, como o transporte por caminhões-pipa, com valores médios de aproximadamente R\$ 60,00/m³. Esses custos tornam ainda mais relevantes alternativas como tecnologias de limpeza a seco, que utilizam sistemas automatizados ou ar comprimido, e a otimização dos intervalos de limpeza com base no monitoramento da eficiência dos módulos.

Embora o consumo hídrico em usinas solares seja significativamente menor do que em outras fontes energéticas, como as hidrelétricas, ele ainda pode causar impactos locais, principalmente em áreas com escassez crônica de água. A implementação de métodos sustentáveis, como a coleta de água da chuva e a utilização de tecnologias ponta, contribui para minimizar esses efeitos, promovendo um uso responsável desse recurso.

A medição detalhada do consumo da água é essencial para compreender os efeitos ambientais e econômicos das usinas solares, além de financiar políticas públicas que promovam uma integração sustentável entre os recursos hídricos e a energia. Tais análises guiam a implementação de tecnologias e práticas operacionais que melhorem a utilização da água, assegurando uma maior sustentabilidade para as usinas solares fotovoltaicas, até mesmo em áreas com alta vulnerabilidade em relação à água.

4.2 Análise geral dos estudos mencionados

Os estudos apresentados no artigo fornecem uma visão abrangente sobre os desafios e oportunidades da gestão de recursos hídricos em usinas solares fotovoltaicas no semiárido brasileiro. Eles destacam aspectos críticos relacionados ao consumo de água, impactos da sujidade nos módulos fotovoltaicos e a implementação de estratégias sustentáveis.

4.2.1 Consumo de Água em Usina Fotovoltaica

A operação de usinas fotovoltaicas, apesar de consumir significativamente menos água que outras fontes energéticas, ainda apresenta desafios relacionados ao uso eficiente desse recurso. Estudos como o de Mendonça (2021) no Parque Solar Ituverava mostram que:

- Consumo por unidade de energia: A média de 0,118 m³/MWh é relativamente baixa, mas se acumula em grandes projetos;
- Custo de água: Embora represente apenas 0,53% da receita total de venda de energia, o custo financeiro do uso de caminhões-pipa e o impacto ambiental em regiões de escassez hídrica tornam a gestão um ponto crítico.

4.2.2 Impactos da Sujidade nos Módulos Fotovoltaicos

Os estudos apontam que a acumulação de poeira, resíduos orgânicos e outras partículas nos módulos fotovoltaicos reduz significativamente a eficiência energética. Dados relevantes incluem:

- Perdas de eficiência: Até 16,52% de perda de eficiência em períodos secos (Araújo et al., 2019);
- Diferenças tecnológicas: Módulos de silício policristalino apresentam maior vulnerabilidade, enquanto os módulos CIGS demonstram maior resiliência à sujidade (Hickel et al., 2016);
- Frequência de limpeza: Estudos sugerem intervalos adaptados às condições locais, com períodos de até 15 dias em regiões com alta sujidade (Soares Júnior et al., 2018).

4.2.3 Estratégias Sustentáveis e Integração de Soluções

A integração entre práticas de gestão hídrica e tecnologias energéticas é central para viabilizar projetos no semiárido. Soluções destacadas incluem:

- Captação de água da chuva: Viável, de baixo custo inicial e com benefícios de longo prazo (Mendonça, 2021);
- Reuso de água: Uma prática cada vez mais necessária para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos locais;
- Limpeza a seco: Uma solução promissora, especialmente em regiões com extrema escassez hídrica.

Os estudos analisados fornecem evidências claras de que, embora as usinas fotovoltaicas apresentem um impacto hídrico reduzido em comparação com outras fontes de energia, a gestão sustentável da água é indispensável para garantir sua viabilidade no semiárido brasileiro. A implementação de novas tecnologias, em combinação com políticas governamentais eficientes, tem o potencial de fazer da região um exemplo de sustentabilidade e adaptabilidade às mudanças climáticas, reforçando a energia solar como uma opção fundamental para o progresso local.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão sustentável de recursos hídricos em usinas solares fotovoltaicas no semiárido brasileiro representa uma oportunidade estratégica para combinar a geração de energia limpa com a conservação dos recursos naturais em uma das regiões mais vulneráveis do país. Este estudo revelou que, embora as usinas fotovoltaicas apresentem uma dependência hídrica menor em comparação com outras fontes de energia, elas ainda exigem um planejamento cuidadoso no uso da água, especialmente nas atividades de limpeza dos módulos.

Os efeitos da sujeira acumulada nos painéis solares ressaltam a necessidade de realização de manutenções regulares para otimizar a eficiência energética e a vida útil dos equipamentos. A escolha de tecnologias fotovoltaicas mais eficientes, como os módulos CIGS (cobre, índio, gálio e selênio), juntamente à implementação de práticas sustentáveis como a captação e o reuso de água, surge como uma estratégia promissora para mitigar os desafios relacionados ao uso de água em grandes usinas solares.

A integração entre gestão hídrica e geração de energia renovável é, portanto, essencial para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro. A adoção de tecnologias mais

eficientes, a implementação de práticas de reutilização de água e o uso de sistemas de captação de água da chuva são fundamentais para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos na região. Este trabalho enfatiza a noção de que encontrar um meio-termo entre a proteção dos recursos hídricos e o crescimento da matriz de energia renovável é uma estratégia prática e imprescindível para garantir a resistência e o desenvolvimento da área.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a análise da viabilidade de sistemas de captação de água da chuva em grandes usinas solares fotovoltaicas no semiárido brasileiro, com ênfase na quantidade de água disponível, qualidade e custo-benefício dessa prática. Isso poderia oferecer informações importantes para melhorar a gestão de recursos hídricos da região e ajudar em soluções mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ALBIERO, D. et al. Sistema Híbrido Renovável de Geração de Energia Elétrica para o Semiárido. *Conexões-Ciência e Tecnologia*, v. 11, n. 1, p. 43-48, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=10&ano=2024>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, relatório conjuntura dos recursos hídricos no Brasil atualiza informações sobre águas do país, 20. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-atualiza-informacoes-sobre-aguas-do-pais>. Acesso em: 06 jan. 2025.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Reservatórios do semiárido brasileiro, 2019. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ccc25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53/attachments/Reservatrios_do_semiarido_brasileiro_hidrologia,_balano_hdrico_e_operao.pdf. Acesso em: 30 nov. 2024.

ASOLAR. Associação brasileira de energia solar fotovoltaica, 2025. Infográfico ABSOLAR. Disponível em: <https://absolar.org.br/mercado/infografico/>. acesso em: 06 fev. 2025.

ARAÚJO, D. N.; CARVALHO, P. C. M de; DUPONT, I. M. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 1-23, dez. 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56363>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BARBOSA, E. R.; FARIA, M. dos S. F. de; GONTIJO, F. de B. Influência da sujeira na geração fotovoltaica. *In: Congresso brasileiro de energia solar*, 7. 2018, Gramado. **Anais [...]**. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/655> . Acesso em 12 dez. 2024.

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, C. E. M.; Águas Doces no Brasil, Capital Ecológico, Uso e Conservação; 4ª Edição; Cap. 5 – Monitoramento de Quantidade e Qualidade das águas; Pg. 127 – 142; Editora Escrituras; São Paulo; 2015.

BUNYAN, H.; Ali, W.; ALNASER, M. Enhancing the Performance of Photovoltaic Panel by Proper Washing Periods in Kuwait. **Smart Grid And Renewable Energy**, [S.L.], v. 07, n.

06, p.190-196, 2016. Scientific Research Publishing, Inc. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2016.76015>. Acesso em: 21 nov. 2024.

BURSZTYN, M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no semiárido: o desafio da integração de políticas públicas. **Ambiente e Desenvolvimento**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3498.011>. Acesso em: 21 nov. 2024.

CAGECE. **Cagece vai fornecer água de reúso para Usina de Hidrogênio Verde no Ceará**. 2022. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/comunicacao/noticias/cagece-vai-fornecer-agua-de-reuso-para-usina-de-hidrogenio-verde-no-ceara/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. de.; CUNHA, T. J. F.; JESUS JÚNIOR, L. A. de.; ARAÚJO, J. L. P. de. A região semiárida brasileira. 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/916891/1/01Aregiaosemiaridabrasileira.pdf18122011.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2025.

DANTAS, S. G. Oportunidades e desafios da geração solar fotovoltaica no semiárido do Brasil. **Textos para Discussão**, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9680/1/TD2541.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2024.

DANTAS, S. G; POMPERMAYER, F. M. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. **Textos para Discussão**, 2018. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_2388.pdf. Acesso em: 21 nov. 2024.

GNPW. Desafios e oportunidades da transição energética: análise da desaceleração e caminhos para o futuro. GNPW, 2024. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/energia-limpa/desafios-e-oportunidades-da-transicao-energetica-analise-da-desaceleracao-e-caminhos-para-o-futuro/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

GOLDENFUM, Joel Avruch. Reaproveitamento De Águas Pluviais. Porto Alegre, Jun. 2015. Disponível em: <https://11nq.com/5qg5u>. Acesso em: 21 nov. 2024.

GONÇALVES, M. L. A.; PINHEIRO, S. M. G.; GONÇALVES, E. M.; EL-DEIR, S. G. Manejo dos recursos hídricos no semiárido brasileiro: estudo de caso dos diversos usos das águas do reservatório de Itaparica. **II Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido brasileiro**, 2015. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/wiasb/2015/TRABALHO_EV044_MD4_SA4_ID656_11092015222611.pdf. Acesso em: 21 nov. 2024.

HICKEL, B. M. 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, 7. 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1962>. Acesso em: 12 dez. 2024.

INPE. Instituto nacional de pesquisas espaciais, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/estudo-inedito-aponta-efeitos-das-mudancas-climaticas-na-energia-solar>. Acesso em: 20 nov. 2024.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 20 de jan. 2025.

IPEA. Associação Brasileira De Energia Solar Fotovoltaica, 2024. Infográfico ABSOLAR. Disponível em: <https://absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

KLISE, G. T.; TIDWELL, V. C.; RENO, M. D.; MORELAND, B. D.; ZEMBLICK, K. M.; MACKNICK, Jordan. Water Use and Supply Concerns for Utility-Scale Solar Projects in the Southwestern United States. Livermore, California: Sandia National Laboratories, 2013.

LIBÂNIO, P. A. C.; CHERNICHARO, C. A. de L.; NASCIMENTO, N. de O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 219-228, set. 2005. Fap UNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522005000300006>. Acesso em: 06 jan. 2025.

LUCENA, M. A. A.; OLIVEIRA, M. G. B.; BEZERRA, I. S. Consórcio de Energia Solar e Eólica em Áreas Isoladas no Semiárido Paraibano: um estudo de caso em Picuí–PB. **Revista Ambiental**, v. 1, n. 3, p. 115-124, 2016.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, DF: MMA, 2006. *E-book*. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Livro2_completo.pdf. Acesso em: 20 de jan. 2025.

MAGHAMI, M. R.; HIZAM, H.; GOMES, C.; RADZI, M. A.; REZADAD, Mohammad Ismael.; HAJIGHORBANI, Shahrooz. Power loss due to soiling on solar panel: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 67 [S.L.], v. 59, p. 1307-1316, jun. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044> . Acesso em: 21 nov. 2024.

MENDELSON, Michael.; LOWDER, Travis.; CANAVAN, Brendan. Utility-Scale Concentrating Solar Power and Photovoltaics Projects: A Technology and Market Overview. Colorado: **National Renewable Energy Laboratory**, 2012. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51137.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2024.

MENDONÇA, Rodrigo B. S. **Avaliação do Impacto do Uso de Água em Plantas Fotovoltaicas no Brasil com Estudo de Caso**. 2021. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/23297>. Acesso em: 15 dez. 2024.

MORAES, J. C. S.; MAGALHÃES, I. L.; PIMENTEL, S. P.; MARRA, E. G. Análise comparativa dos efeitos da sujidade e do sombreamento em sistemas fotovoltaicos instalados em telhado. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)**, Florianópolis, 23 a 27 de maio de 2022. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1110>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MOREIRA, Tatiana Martinez.; SEO, Emília Satoshi Miyamaru. Reúso da água de chuva: uma alternativa sustentável para os períodos de escassez hídrica. **Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research**. dez. 2020. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Livro2_completo.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

MOURA, M. S. B. de.; SOBRINHO, J. E.; SILVA, T. G. F da.; SOUZA, W. M. de. Aspectos meteorológicos do Semiárido brasileiro. 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1112124/1/AspectosmeteorologicosdoSemiaridobrasileiro2019.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2025.

MOURA, P. G., ARANHA, F. N., HANDAM, N. B., MARTIN, L. E., SALLES, M. J., CARVAJAL, E., JARDIM, R., & Sotero-Martins, A. (2020). Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 25(6), 791-808. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180201>. Acesso em: 02 jan. 2025.

RASHAD, Mohamed.; EL-SAMAHY, A. A.; DAOW, Mohamed.; Amin, Amr M. A. A. Comparative Study on Photovoltaic and Concentrated Solar Thermal Power Plants. **INASE Conferences**, 2013. Disponível em: <https://www.inase.org/library/2015/zakynthos/bypaper/ENG/ENG-25.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2024.

REBOLÇAS. A. C.; Águas Doces no Brasil, Capital Ecológico, Uso e Conservação; 4ª Edição; Cap. 1 – Água Doce no Mundo e no Brasil; Pg. 1 – 36; Editora Escrituras; São Paulo; 2015.

RILLO, Joaquin. **Viabilidade Econômica do Reúso da Água na Construção Civil**. 2006. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Anhembí Morumbi, 2006. Disponível em: <https://encurtador.com.br/MLevb>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ROSA, D. J. M.; ZILLES, R.; FEDRIZZI, M. C. Sistemas Fotovoltaicos de Dessalinização de Água Salobra para Uso Domiciliar na Região Rural do Semiárido Brasileiro. In: Reunión de Trabajo - Asades, 36., Tucuman, 2013. **Anais [...]** Tucuman: ASADES, 2013.

SANTOS, J.G.R.; SANTOS, E.C.X.R. Agricultura orgânica: teoria e prática. Editora da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, 2008. 228p.

SOARES, D. A. F.; SOARES, P. F.; PORTO, M. F. A.; GONÇALVES, O. M. Considerações a respeito da reutilização de águas residuárias e aproveitamento das águas pluviais em edificações. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1997 Vitória. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1997.

SOARES JÚNIOR, J. G.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7. 2018, Gramado. **Anais [...]**. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/123>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SUDENE. Superintendência Do Desenvolvimento Do Nordeste, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

VALER, Roberto; MORAES. Albemerc Moura de; MORANTE, Federico; ZILLES, Roberto; FEDRIZZI, Maria Cristina. Experiências no semiárido cearense na implantação de sistemas fotovoltaicos para irrigação: lições aprendidas. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 17, p. 04.01-04.10, 2013. Disponível em: <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/2042>. Acesso em: 10 nov. 2024.