

OBSERVAÇÕES PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS BIFACIAIS EM USINA DE GRANDE PORTE NO BRASIL

Viviane Tavares Nascimento – viviane.tav.nascimento@gmail.com

Miguel Edgar Morales Udaeta

André L. Veiga Gimenes,

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automações Elétricas (GEPEA)

Silvio Ikuyo Nabeta

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Energia e Automações Elétricas

Luis Claudio Araujo

Volt Max Engenharia

André Flavio Schiante dos Santos

Fabio Micerino

Santo Antônio Energia S.A

Resumo. *O presente trabalho caracteriza quesitos funcionais para painéis bifaciais voltada a implantação da tecnologia em larga escala visando usinas de grande porte. Metodologicamente são desenvolvidas análises para a implantação de uma usina de geração solar com tecnologia bifacial para uma localidade no Brasil, contribuindo com a avaliação das condições de performance para locais mais quentes e com maior incidência de luz solar justificando pesquisas relacionadas à admissão de sistemas bifaciais no país. A análise se baseia na caracterização das inovações para tecnologias de geração fotovoltaica que proporcionam melhorias significativas na eficiência dos módulos solares, evidenciando o crescimento na instalação e a diversificação das expectativas dos atores. Como tecnologia caracterizada, as células bifaciais atualmente são aquelas com maior poder de atração para novos projetos, com perspectivas de superar as tecnologias monofaciais. As mudanças no desenho destas células permitem que a luz solar seja melhor aproveitada permitindo a geração de energia elétrica em ambos os lados, aumentando significativamente a eficiência. Esses dados reforçam a queda do custo para a energia gerada, demonstrando estimativa de reduzido tempo de retorno do investimento. As análises de projetos implantados em outras regiões confirmam as expectativas para o uso dessas tecnologias, mas ainda implicam em uso de dados de outros países e relativo desconhecimento no comportamento desses módulos para o Brasil, reforçando o caráter ainda pontual das instalações e a necessidade de dados gerados localmente. Como resultado, o estudo apresenta informações verificadas relativas à implantação de uma usina de grande porte no Brasil, o que permite analisar questões pertinentes à tendência contínua de crescimento da geração de energia por fontes fotovoltaicas, bem como a avaliação de condições para o desenvolvimento de um novo modelo de negócios para geradores, com a possibilidade de aumento da eficiência e oferta de energia no mercado empregando múltiplas tecnologias de geração.*

Palavras-chave: *Tecnologia Bifacial, Características técnicas, Escalabilidade*

1. INTRODUÇÃO

Após queda intensa na emissão de carbono durante o ano de 2020, devido à pandemia de COVID (*CO*rona *V*irus *D*isease) 19, as emissões voltaram a crescer em 2021. Somente em relação ao setor elétrico, a emissão de carbono aumentou 7% em um ano, notadamente pela recuperação de atividades e esforço para ampliar rendimentos econômicos (International Energy Agency, 2022). O aumento das emissões de carbono no setor elétrico produz questionamentos sobre os papéis das fontes renováveis de geração, e a busca por melhores índices pode ampliar a vantagem competitiva de tecnologias desenvolvidas recentemente frente às fontes já conhecidas.

Esse ponto de vista reforça a importância do papel das fontes solar fotovoltaica e seu crescimento dentro do setor. O fornecimento por fontes fotovoltaicas está em contínuo crescimento no mundo, causada por intensa capacidade instalada, ainda no ano de 2021, o que gerou a economia de aproximadamente 1.100 Mt de emissões anuais de CO₂. Essa quantidade foi calculada com base da emissão produzida por demais fontes, e que foi evitada pelo crescimento desta fonte, e ao considerar o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos (International Energy Agency, 2022). Os dados reforçam a importância das fontes fotovoltaicas na transição energética, principalmente ao considerar avanços relativos a esses sistemas no passado recente.

Inovações na tecnologia proporcionaram aumento das vantagens em relação ao desempenho e custos; as inovações auxiliam no crescimento na utilização da fonte, classificando fontes fotovoltaicas como aquelas aptas a atender diversos públicos e em diversas localidades geográficas. O crescimento da fonte é notado em países distintos como a China, Estados Unidos, Índia, alterando a dinâmica do mercado para essa tecnologia. Para o caso brasileiro, seu papel é de destaque frente aos demais países da América Latina, com aproximadamente 5,5 GW instalados nos últimos anos (International Energy Agency, 2022) (International Energy Agency, 2021).

A queda nos custos amparada pelas vantagens ambientais para tecnologias de geração de energia fotovoltaica é reforçada por mudanças significativas na oferta desses sistemas. Como uma forte tendência, as tecnologias bifaciais – células, módulos e sistemas - estão atraindo a atenção, com perspectivas de superar as tecnologias monofaciais (International Energy Agency, 2021). Mudanças no desenho destas células permitem que a luz solar atinja a célula dos dois lados, aumentando significativamente a eficiência. A crescente variedade dessas células e a queda nos preços dos módulos apontam para o aumento na adoção desses sistemas no futuro próximo.

A implantação desses sistemas em maior escala ainda está em desenvolvimento em diversas localidades, o que implica em estudos mais focados na determinação de vantagens e pontos de atenção para a tecnologia. O aumento na sua eficiência e redução de custos representam uma vantagem operacional frente às demais fontes que, em conjunto, podem significar vantagem no encontro da demanda e redução no tempo de investimentos. Esse trabalho tem como objetivo a análise de características funcionais relevantes para a implantação em usina com múltiplas tecnologias de geração no Brasil. Para isso, o artigo apresenta uma revisão das características técnicas para esses sistemas e expõe questões relativas à evolução das células e sistemas bifaciais, apontando parâmetros pertinentes à adoção da tecnologia, aponta termos específicos para o direcionamento de estudos de viabilidade para esses sistemas e destaca a simulação para um implantação de grande porte no Brasil.

Com o foco na viabilidade de implantação de sistemas bifaciais em grande escala para o Brasil, esse artigo está dividido em quatro seções. A Seção 2 contém a revisão da literatura para o tema, destacando a evolução da tecnologia bifacial e diferenças frente à tecnologia monofacial. A Seção 3 descreve parâmetros técnicos relevantes para a construção de uma viabilidade e avaliação da implantação do sistema. A Seção 4 aponta um estudo de caso real para a implantação de usina com sistemas bifaciais no estado de Rondônia, e a seção 5 apresenta a conclusão e os próximos passos para a pesquisa.

2. FATORES DETERMINANTES PARA A AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS BIFACIAIS

A viabilidade de determinado projeto de geração de energia solar depende da eficiência de conversão, que determina qual a proporção de energia solar pode ser convertida em energia elétrica. A eficiência é o parâmetro relativo ao uso de células fotovoltaicas que é constantemente melhorado, com foco no aumento da conversão e consequente redução de calor, melhorando o rendimento da geração de energia e ampliando as vantagens dessa fonte (Araújo do Nascimento, 2004).

A eficiência de um módulo solar tem relação com a célula escolhida para fazer a conversão de energia, e é definida como a taxa de energia convertida por medida de área do módulo. Os valores variam de acordo com o fabricante das células e módulos, mas valores médios podem ser referenciados. A célula tem eficiência maior em comparação ao módulo, pois durante o processo de encapsulamento no processo de fabricação há perdas de eficiência. Assim, a eficiência que deve ser considerada para a compra e instalação é a do módulo. A Tab. 1 mostra os valores de eficiência para diferentes tipos de módulo solar, incluindo o bifacial, objeto de estudo.

Tabela 1 - Eficiência por tipo de módulo solar

Tipo de módulo solar	Eficiência da célula
Monocristalino Monofacial	Acima de 18%
Policristalino Monofacial	15–17%
Monofacial de filme fino	11–15%
Monocristalino Bifacial	Acima de 20%

Como inovação de desenho, as células bifaciais adicionam uma camada de revestimento antirreflexo e contatos posteriores, o que permite que essas células absorvam a luz solar de ambos os lados. Quando as células solares são expostas ao sol, a luz transmite por meio dos revestimentos antirreflexo de ambos os lados. Ainda que essa inovação aumente a eficiência, processos de degradação conhecidos podem ser ampliados por suas propriedades estruturais.

A partir do interior do módulo, a primeira degradação importante é a induzida por temperatura elevada. A impressão dos dedos metálicos no lado posterior pode causar efeitos de degradação se houver formação de ácido acético pela decomposição do encapsulante EVA (*Ethylene Vinyl Acetat*) ou se os dedos se soltarem. Como o revestimento antirreflexo é exposto ao lado posterior em módulos bifaciais, a degradação induzida pelo potencial (*Potential Induced Degradation*, PID) – efeito indesejado de degradação do módulo e que pode causar perdas significativas no tempo - pode ocorrer e causar efeitos diferentes para células com emissor frontal ou traseiro. O efeito PID ocorre quando há a transferência de íons de sódio do vidro do módulo para a camada antirreflexiva das células, ocasionado pela diferença de potencial entre os módulos localizados no lado negativo, causando a interrupção do efeito fotovoltaico e difusão dos íons de sódio no encapsulante de EVA (Souza, 2021)

A folha traseira transparente e os módulos de vidro duplo sem moldura podem ser outras fontes de potencial degradação, e uma iluminação não homogênea do lado posterior pode aumentar os pontos quentes (*hot spots*) que podem ocorrer devido a uma iluminação não homogênea do lado frontal. A moldura, vidro, encapsulante, e outros componentes de embalagem dos módulos desempenham um papel na extensão do PID, que pode ser reduzida quando o módulo bifacial é sem moldura ou com a utilização de elastômero de poliolefinas como material encapsulante. O elastômero de poliolefinas é um polímero usados em peças automotivas, revestimentos de fios e cabos, calçados, entre outros, e que tem

como propriedade ajudar o a tornar o componente mais resiliente e flexível; a redução do PID é perceptível quando este polímero é empregado para substituir o EVA (Guerrero-Lemus, Vega, Kim, Kimm, & Shepard, 2016).

Para a geração de eletricidade, uma parte da luz solar é utilizada e o resto é dissipado como perdas de energia na célula e da célula para o módulo, perdas categorizadas como reflexão e resistência de interligação. As perdas na célula podem ser divididas em três grupos de acordo com o tempo de vida do transportador, nomeadamente a geração, o transporte e os processos de recombinação (Guerrero-Lemus, Vega, Kim, Kimm, & Shepard, 2016). A Fig. 1 resume as perdas para células e módulos bifaciais.

Os módulos bifaciais geram maior potência e maior corrente em comparação com os monofaciais. A descoordenação das células pode induzir diferenças de temperatura locais mais elevadas no módulo. As células solares com elevadas tensões de ruptura induzem temperaturas mais elevadas quando operam em polarização inversa (por exemplo, sob sombra). A instalação de duas filas de módulos bifaciais a uma distância específica do tubo de seguimento centrado pode reduzir ou prevenir o sombreamento e a instalação de módulos com a caixa de junção perto do tubo de seguimento reduzirá o sombreamento do cabeamento.

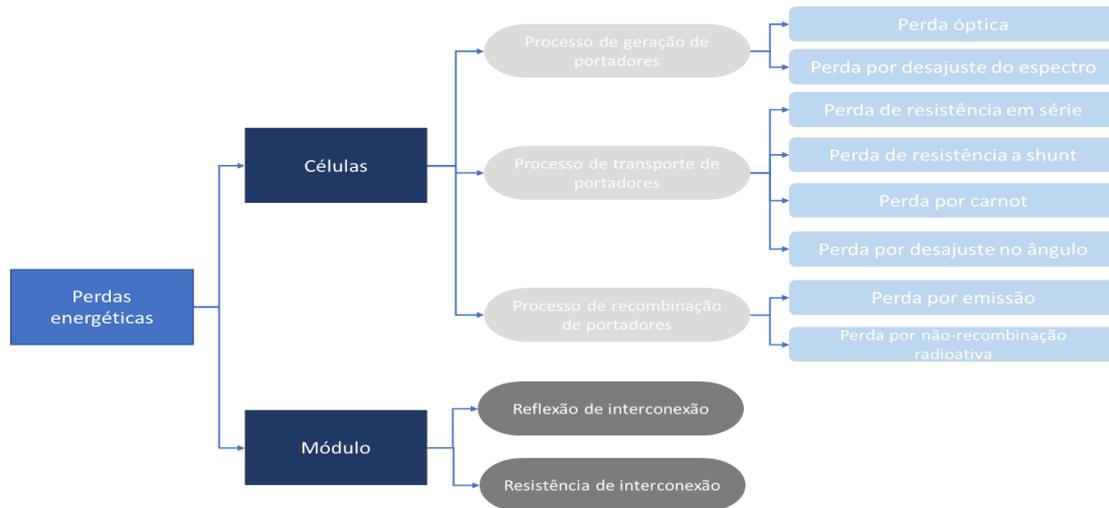


Figura 1- Perdas para células e módulos bifaciais

Fonte: Adaptada de (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020)

A complexidade de montagem implica em cuidados especiais para o lado inferior do módulo que fica diretamente exposto aos raios ultravioletas refletidos no solo, pulverização e vapor de água (Appelbaum, 2016). A temperatura para os módulos inferiores, em comparação aos módulos monofaciais, é ainda um ponto em debate (Guerrero-Lemus, Vega, Kim, Kimm, & Shepard, 2016), (Appelbaum, 2016). É esperado que por ter dois módulos expostos à radiação solar, a tecnologia bifacial possua temperaturas maiores de operação: no entanto, estrutura no lado posterior também tem efeitos diretos na temperatura do módulo todo, e afeta diretamente a temperatura de operação (Appelbaum, 2016) (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020). O fato de a superfície traseira ser totalmente exposta reduz a absorção de luz infravermelha e reduz a temperatura de operação quando comparado aos módulos monofaciais. As células bifaciais operam a uma temperatura mais baixa caracterizada por um coeficiente de temperatura de apenas 0,22%/°C ao nível do módulo, em comparação com células monofaciais típicas de 0,43%/°C, para células de heterojunção (Appelbaum, 2016).

Os valores mais altos para as correntes geradas, em comparação aos módulos monofaciais, também acrescentam a preocupação de não sobrecarregar os componentes do sistema bifacial e causar problemas de segurança. Dessa forma, os fatores que influenciam a corrente contínua dos módulos bifaciais devem ser considerados durante a montagem do sistema e a seleção dos componentes. Entre os fatores, são incluídos parâmetros de desempenho do módulo, albedo terrestre, e parâmetros de concepção do sistema, por exemplo, tamanho, inclinação, azimute, altura, número de filas, e espaçamento entre filas (International Energy Agency, 2021). Os sistemas bifaciais operam com correntes contínua significativamente mais elevadas do que os sistemas monofaciais semelhantes, como resultado de albedo elevado. Esses dados auxiliam na otimização do desenho dos sistemas bifaciais com foco na redução dos custos e definição de mecanismos de segurança para a corrente superior produzida nos módulos bifaciais (International Energy Agency, 2021).

Ainda como parâmetro vital para a análise do desempenho dos módulos bifaciais está a inclinação fixa dos módulos, que influenciam na quantidade de luz que atinge o lado posterior do módulo, especialmente quando esses módulos são do tipo fixo. Ainda que a quantidade de luz no lado posterior dependa de outros fatores, como analisado anteriormente, a altura, inclinação e azimute do conjunto, o número e espaçamento das filas e posição do módulo dentro da fila também são parâmetros que carecem de atenção durante a análise desses módulos, e a simulação da inclinação fixa deve ser estudada (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020) (International Energy Agency, 2021).

Dada a capacidade de geração dos dois lados, o ângulo de inclinação tem alto impacto na performance dos módulos bifaciais: a geração anual de energia dos módulos bifaciais e monofaciais aumenta ligeiramente até os seus ângulos ótimos serem alcançados e depois diminui acentuadamente, e o valor do ângulo ótimo dos módulos bifaciais é superior em comparação aos módulos monofaciais, sob as mesmas condições. O ângulo de inclinação tem menos efeito

no rendimento energético do lado de trás em comparação com o lado da frente, devido a efeitos na irradiação difusa e refletida do céu e do solo; o rendimento total de energia bifacial e o correspondente aumento contínuo do ganho bifacial são diretamente influenciados por estes efeitos. A dependência do ângulo de inclinação para determinar o ganho bifacial determina quais locais são mais adequados para implantação, como é o caso de fachadas de edifícios (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020).

O reflexo do solo é uma influência direta para a irradiação traseira do albedo, que em valor elevado implica em alto rendimento energético e em ganho bifacial. Por esse motivo, locais com valor mais alto de albedo, como, por exemplo, areia e neve, implica em ganhos bifaciais de até 29% (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020). O albedo, como a medida relacionada à refletividade da superfície e parâmetro fundamental para avaliar as condições do local em que se deseja instalar os módulos, permite avaliar quanto da energia solar refletida do solo será absorvida.

O albedo varia conforme as características do solo ou superfície em que a luz solar será refletida: para cada tipo de cobertura terrestre há uma resposta espectral diferenciada. No caso dos módulos bifaciais, a reflexão da luz solar no solo implica em melhorias significativas de desempenho, uma vez que esse parâmetro tem relação com a temperatura e com a absorção dos raios solares incidentes. Quanto mais escura a superfície em que os módulos serão instalados, menor a reflexão no entorno e para a usina. Assim, para cada tipo de superfície e paisagem, há um valor de albedo pré-definido. A irradiação traseira também depende da elevação do módulo. Em análises, é sugerido que os módulos devem ficar entre 0,5-1,5 m acima do nível do solo, para abranger o ganho com o tamanho do espaço. A sujidade e sombreamento também podem gerar perdas no desempenho dos módulos bifaciais, ainda que os módulos quando em posição vertical tenha menores perdas por sujidade. Pelo próprio desenho dos módulos, a limpeza do lado posterior não é necessária, e o sombreamento implica em redução de perdas de até 12% para esses módulos (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020).

Ainda que o desenho dos módulos possa levar a redução de impactos em índices de manutenção e operação, o solo deve ser o mais limpo e claro possível. As vantagens de a tecnologia bifacial ter menores perdas devido às condições meteorológicas e de instalação podem ser potencializadas pela implantação de objetos que possam reduzir os efeitos na parte posterior do módulo. Projetos sugerem que a instalação de rochas brancas pode reduzir os efeitos do sombreamento e reduzir as perdas para os módulos bifaciais. Em suma, a tecnologia bifacial tem a vantagem de sofrer menos perda de energia devido à sujidade e sombreamento sob as mesmas condições meteorológicas e de instalação.

A orientação tem relação direta com a produção de energia, e é de conhecimento que os módulos, tanto monofaciais como bifaciais geram mais energia elétrica quanto maior a irradiância. Dado o alcance dos raios, a irradiância frontal é superior a posterior, resultando em menor ganho bifacial com um sistema de rastreamento (*tracking system*) (Gu, Ma, Ahmed, Zhang, & Peng, 2020). Há a possibilidade de instalação vertical, reduzindo os custos de manutenção e limpeza dos módulos.

Melhorias para encapsulantes é um tema vital para módulos solares: eles são empregados para proteger as células solares contra condições ambientais que possam acelerar a degradação, reduzindo o rendimento e ampliando riscos de segurança. Os encapsulantes sofrem degradação e são sensíveis a determinadas condições térmicas e de radiação, como é o caso de regiões arenosas. Para esses casos, as pesquisas para o futuro próximo avaliam o uso de encapsulantes mais resistentes à essas condições e até mesmo o desenvolvimento de células que não necessitam desse tipo de recurso, mas o desenvolvimento de novos materiais precisa de avaliação quanto ao aumento da eficiência que podem causar ou até mesmo se podem contribuir para aumentar a degradação das células solares.

O interesse nos encapsulantes também envolve questões relacionadas à resistência mecânica dos módulos e das células bifaciais. Há duas tendências de pesquisa para o tema: a configuração de vidro duplo (com e sem moldura) e a configuração da contracapa transparente em vidro. O primeiro tem demonstrado propriedades mecânicas positivas e pode suportar condições ambientais adversas, no entanto a configuração proposta é pesada e pode exigir diferentes estruturas e procedimentos de montagem que poderiam aumentar os custos de implantação. Os projetos que utilizam folhas de apoio transparentes surgiram como uma alternativa porque permitem a instalação de módulos bifaciais com os mesmos sistemas de montagem utilizados para os módulos monofaciais. As questões em torno da degradação acelerada das folhas de apoio levantaram preocupações sobre o uso de folhas de apoio transparentes, particularmente para projetos em regiões desérticas (Barrows, 2020).

3- ANÁLISE DOS PARÂMETROS DETERMINÍSTICOS PARA A TECNOLOGIA BIFACIAL

A análise dos parâmetros e configurações apresentados têm impacto na avaliação da viabilidade econômica de módulos bifaciais, uma vez que a escolha da tecnologia para o empreendimento depende das implicações que possam reduzir o custo da energia, considerando os aspectos de investimento inicial e custos de operação para o sistema. A propriedade intrínseca desses sistemas de gerar energia dos dois lados e, portanto, com maior eficiência, reduz os custos e permite a instalação desses módulos em locais que impediriam a instalação de módulos do tipo monofacial (Kumbaroğlu, Çamlıbel, & Avci, 2022).

As análises apontam que tanto para módulos instalados em grande quanto para sistemas de menor escala o Custo Nivelado da Eletricidade (LCOE, *Levelized Cost of Electricity*) é reduzido, e em condições ideais de elevação e inclinação superam as instalações de tecnologias monofaciais em qualquer lugar do globo. Ainda assim, a avaliação do parâmetro econômico destaca que o ganho para tecnologias bifaciais depende de muitos fatores, como sombreamento mútuo, ângulo de inclinação, solo, temperatura, entre outros. O ganho é alto para situações em que os sistemas são instalados em temperaturas moderadas e mais afastadas da linha do Equador, o que reforça a questão da temperatura para a operação

adequada desse tipo de sistema, e na posição vertical, reduzindo os efeitos do solo e reforçando a exequibilidade desse desenho de módulo (International Energy Agency, 2021).

A redução do LCOE é uma vantagem significativa dos módulos bifaciais em comparação aos monofaciais, ainda que circunstâncias específicas possam aumentar índices de performance para os sistemas em questão. A alta resistência e flexibilidade, o que amplia os índices de segurança e durabilidade para a tecnologia, são aliados à longa vida útil para ampliar a competitividade da tecnologia frente à demais fontes de geração de energia elétrica (Kumbaroğlu, Çamlıbel, & Avci, 2022).

Os investimentos iniciais ainda são altos, e o manuseio dos módulos e operação ainda são questões que exigem conhecimento específico e equipes especializadas, o que amplia os custos operacionais do sistema. Ainda há poucos sistemas implantados, o que ressalta o desconhecimento pontual para os módulos bifaciais, e a formação de rede de conhecimento e execução de projetos (Kumbaroğlu, Çamlıbel, & Avci, 2022). A existência de uma rede já formada para os módulos monofaciais pode contribuir para mitigar esses problemas, com auxílios pontuais para o manuseio e especificidades da nova tecnologia.

Tabela 2 - Análise FOFA para tecnologias bifaciais

Forças	Fraquezas
<ul style="list-style-type: none"> - Geração de eletricidade de alta eficiência - O módulo bifacial é leve - Alto rendimento energético. - Altos níveis de resistência, em conformidade com as normas e padrões vigentes. - Longa vida útil e alta durabilidade. - Baixo custo de manutenção devido ao desenho sem moldura de vidro - Alta resistência a chama e baixa propagação de fogo. - Fornece uma camada de isolamento contra incêndios elétricos. - LCOE mais baixo em comparação com módulos padrão monofacial sob todas as condições - Excelente taxa de geração quando rastreadores são empregados. - Gera energia na montagem fixa na mesma quantidade que a gerada em módulos padrão com rastreadores. - Ganho mínimo de 6% nas instalações com telhado branco. - Baixa pegada de carbono. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custos de investimento inicial acumulados maiores que para módulos monofaciais padrão. - Maior custo por watt com base na potência frontal. - Menor carga frontal DC, implicando em menor custo de instalação e operação em plantas solares bifaciais. - Requer equipes de instalação e logística qualificadas para cumprir com as normas mais recentes e requisitos de qualidade do manuseio de módulos de vidro. - Nova tecnologia com execução relativamente rara, baixo suporte ao cliente e contabilização.
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> -Maior produção de eletricidade na mesma área quadrada de módulos/telhados/solo. - Módulos de 60 células, incluindo o aparelho de montagem em um telhado pesa menos que os módulos padrão. - LCOE mais baixo pode ser ainda mais baixo com ganhos induzidos por Pesquisa e Desenvolvimento. - Grande oportunidade nos mercados de sistemas integrados em construções. - Fontes solares podem evoluir para uma estratégia de investimento de longo prazo, exigindo maior vida útil para os sistemas de geração. - Custo de investimento por eletricidade produzida 1º ano é igual às plantas solares onde as plantas são projetadas para ter menos carga DC do que as usinas padrão, resultando em igual produção de eletricidade - nos anos seguintes o custo LCOE por eletricidade produzida torna-se mais baixo à medida que os módulos bifaciais envelhecem mais lentamente, produzindo comparativamente mais eletricidade ao longo do tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Perda de incentivos de preços para investimentos futuros - Posição frente ao mercado para geradores já atuantes. -Questionamentos quanto ao estado atual do mercado e regras. - Esquema tarifário -Esquema para importação da tecnologia -Cadeia de fornecedores e formação de mão de obra especializada. - Mapeamento de possíveis fabricantes internos -Apoio governamental para tecnologia e inovação.

Fonte: adaptado de (Kumbaroğlu, Çamlıbel, & Avci, 2022)

O crescimento de importância de fontes renováveis de geração de energia pode ampliar o acesso às estratégias de investimento e acesso à essas novas fontes, reforçado por investimento em Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), e a longa vida útil para os sistemas. A falta de apoio e dificuldade de acesso, tanto para cessão de subsídios quanto para novas pesquisas e formação de rede de conhecimento podem reduzir o interesse nos sistemas bifaciais, atrasando a diversidade da matriz energética e o acesso de interessados. Esses pontos são tidos como barreiras para a tecnologia. A Tab. 2 mostra o resultado da análise de Fraquezas, Oportunidades, Forças e Ameaças (FOFA) para a tecnologia bifacial, em relação à monofacial, com base na literatura para o assunto e análise do mercado para fontes de geração de energia renováveis.

4. CARACTERÍSTICAS LOCAIS DO ESTUDO DE CASO

A Hidrelétrica Santo Antônio está localizada a sete quilômetros de distância do centro de Porto Velho, via BR 364. A usina, composta por uma usina fotovoltaica e estação solarimétrica tem previsão de 751,8 kWp de potência de pico e 660 kW de potência nominal, em uma área de aproximadamente 3464 m². Para atender os requisitos do projeto, é estimada a implantação de 1440 placas fotovoltaicas de 530 Wp e seis inversores de 110kW. Para o projeto foi escolhida a tecnologia fotovoltaica bifacial com a finalidade de aumentar a produção de energia elétrica no local, compondo parte de um sistema de geração com múltiplas fontes de geração. As múltiplas fontes de geração não são apenas focadas no atendimento da demanda externa da usina, em caso, mas no atendimento de demandas internas de energia.

O aumento da eficiência dos painéis bifaciais ampliaria as vantagens operacionais da própria usina, contribuindo para a redução de custos operacionais e ampliando o aproveitamento de energia sobressalente para armazenamento. Apesar do maior custo para painéis do tipo bifacial e o necessário investimento inicial para a aquisição e início das operações para o sistema com múltiplas tecnologias, é esperado que o ganho na produção e redução de despesas proporcione o retorno do investimento inicial dentro do esperado pelos atores interessados na tecnologia.

Para as placas fotovoltaicas, do tipo bifaciais, foram escolhidas da fabricante Jinko Solar. As células são do tipo monocristalino, com 144 células (6X24). Para os inversores, foram determinados os da fabricante Solis, trifásico e com 10 MPPTs (*Maximum Power Point Tracking*), eficiência máxima de 98,7%. O modelo escolhido o Solis 110K – 5G, com potência máxima de entrada recomendada de 165 kW (entrada CC). Dadas as características do terreno, os módulos foram distribuídos de forma a ocupar a maior parte do local, ampliando as vantagens de uso do local física disponível da usina. A distribuição dos módulos no terreno pode ser visualizada na Fig. 2. As características de ambiente não urbano, ou seja, um solo sem cobertura de asfalto e com característica arenosa foram consideradas para a simulação, uma vez que o cálculo do albedo é vital para um empreendimento voltado à painéis bifaciais.

A simulação foi feita com o auxílio do PVSyst, software voltado ao dimensionamento de projetos fotovoltaicos. No caso do projeto, o foco da simulação foi verificar o desempenho para os painéis a partir das informações meteorológicas, infraestrutura escolhida e posição geográfica do local. A simulação foi feita para painéis fixos no solo (plano fixo), e para isso foram distribuídos 120 *sheds* no solo, o que permite determinar o ângulo otimizado de inclinação para os painéis e analisar o sombreamento dos módulos.

De acordo com o simulador, o azimute determinado foi de 20°, o ângulo limite das sombras era de 15,4°. Uma das justificativas para o valor do azimute é a posição geográfica para a cidade de Porto Velho, muito próxima da linha do Equador. As perdas por sujidade foram determinadas como 3% e as perdas de qualidade dos módulos em 0,8%.

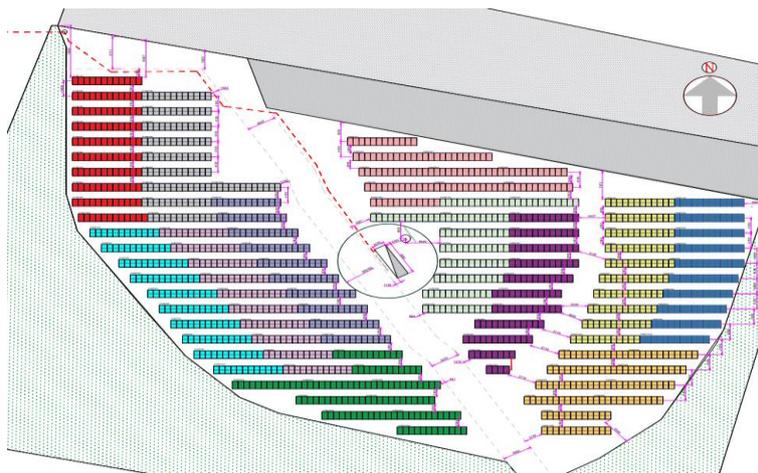


Figura 2 - Distribuição dos painéis no terreno destinado ao projeto

A análise do local de instalação mostra a ausência de elementos que façam sombra aos painéis, como árvores, muros e prédios, e o sombreamento é causado pelos próprios módulos existentes no local, o que justifica as baixas perdas por sombreamento; a posição geográfica do local, próxima à linha do Equador também contribui para as baixas perdas por sombreamento. As maiores perdas para o projeto são causadas pelas altas temperaturas do conjunto, um ponto de atenção para a tecnologia analisada e que pode ter impactos negativos no tempo dada à posição geográfica do local. As perdas são mostradas na Fig. 3, que também aponta perdas por sujidade e pelo efeito incidente, mostrado como Fator de

IAM (*Incident Angle Modifier*). Ao lado da figura, há a porcentagem de estimativa para cada perda possível no sistema, e as maiores perdas, como esperado para um sistema composto por módulos bifaciais, é devido à temperatura, atingindo valor superior a 7%. Essa, no caso, é a perda mais significativa prevista para o sistema.

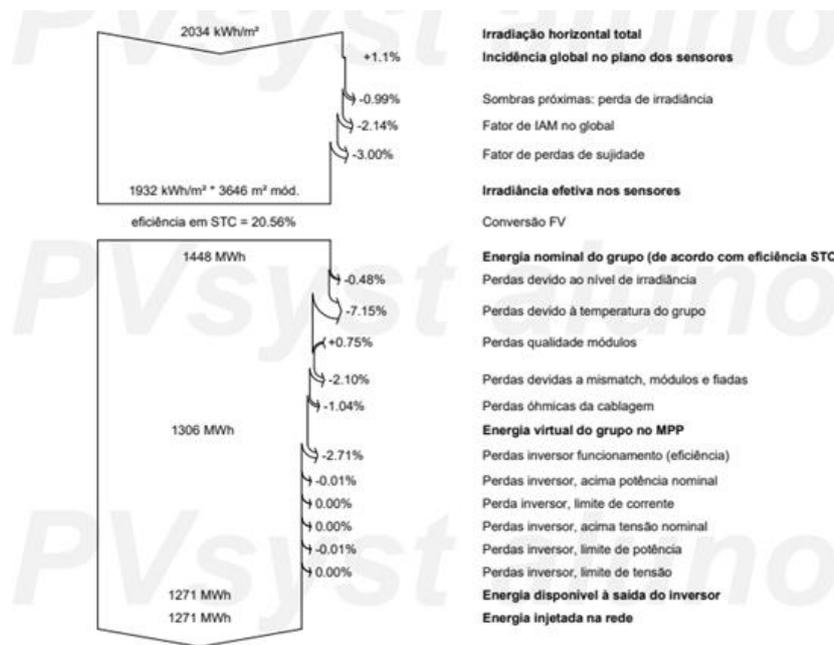


Figura 3 - Perdas estimadas para o projeto

Dada a importância da temperatura para a operação da usina e manutenção dos painéis, a distribuição da temperatura para o grupo, para o período de um ano, é apresentada na Fig. 4. Esse gráfico mostra a temperatura do grupo, média, por frequência, isto é, por hora de ocorrência, determinado a partir dos dados históricos para o local. A partir dessa figura, as temperaturas serão predominantemente altas durante o funcionamento. Durante a programação da manutenção, parte das boas práticas necessárias para a operação do projeto, os fatores que reduzem a vida útil das células e painéis, e que são diretamente ligados a esse fator devem ser monitorados. A simulação não permite estimar a degradação natural dos painéis e a falta de dados ainda para o país também contribui para essa incerteza. É esperado que após a instalação e coleta de dados, a partir de um tempo seja possível estimar a vida útil para esses painéis com maior segurança.

Ainda relacionado à temperatura e a sua possível contribuição para as perdas do conjunto, a Fig. 5 mostra os dados da irradiação efetiva na superfície, dada em W/m², e a temperatura média para um período de um ano. Para o conjunto, a irradiação e a temperatura se mantêm elevadas, como esperado dada a localização da usina.

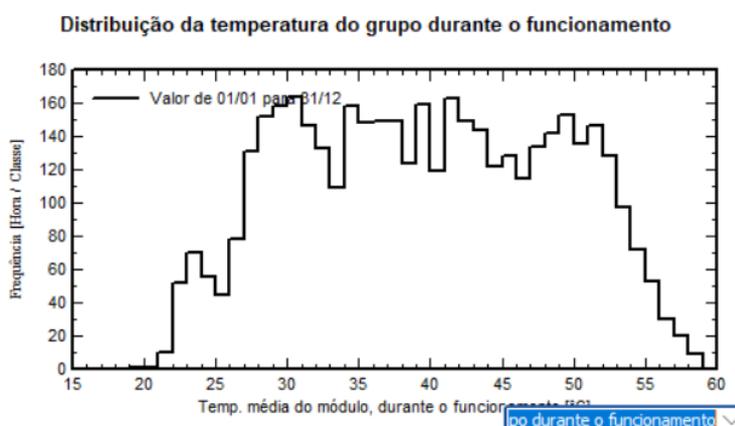


Figura 4 - Gráfico de distribuição da temperatura para o grupo para um período de um ano

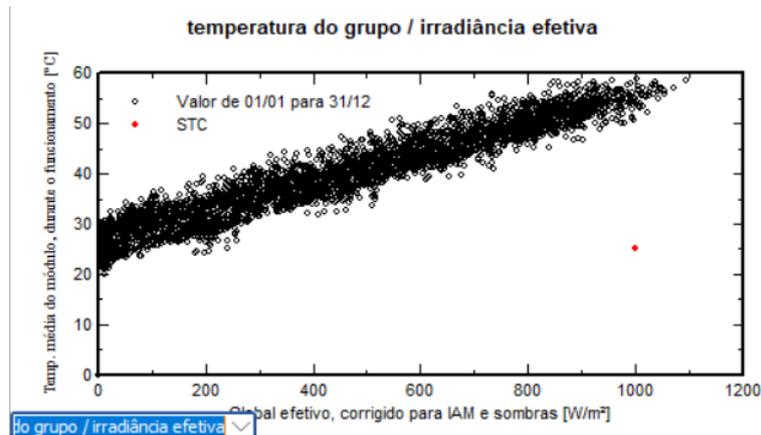


Figura 5 - Gráfico da temperatura médio do módulo pela irradiância, para o período de um ano

A partir do estudo dos efeitos da temperatura e constância da irradiância para o conjunto, analisadas tanto nas perdas quanto em gráficos específicos, é esperado que a produção estimada para o conjunto seja atingida. Os gráficos e dados a seguir mostram a estimativa de produção para o conjunto lida a partir da estimativa de energia injetada na rede para o período de um ano, as estimativas de produção efetiva de energia para o sistema, incluindo as perdas tanto por absorção e por perdas esperadas da infraestrutura, e os dados anuais, discriminados por mês, para a temperatura, incidência e energia produzida pelo sistema. Os dados citados estão descritos nas Fig. 6 e Fig. 7.

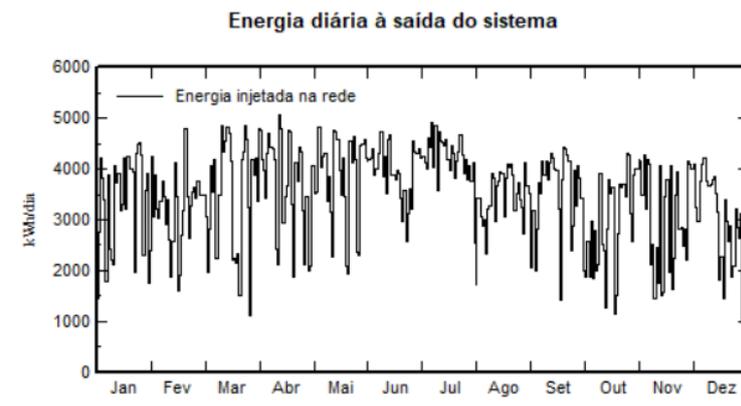


Figura 6 - Gráfico da energia injetada na rede por mês do ano.

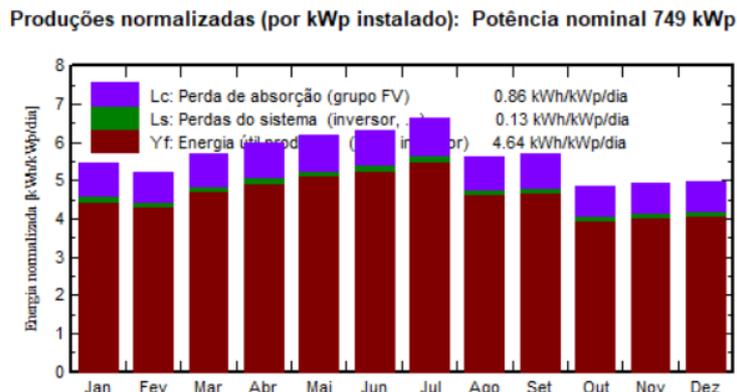


Figura 7 - Produção para o grupo por mês do ano, incluindo as perdas de absorção e do sistema

As figuras confirmam que as perdas esperadas para o sistema são relativamente baixas frente às vantagens de geração de energia, o que aponta para o atendimento das expectativas dos atores para projetos como o analisado. Essas vantagens são ainda evidenciadas pelos índices de irradiância, também uma possível vantagem para o projeto. Dados que os custos de aquisição de terreno e demais custos relacionados ao espaço físico em que o sistema será instalado não serão considerados para a análise econômica do projeto em questão, uma vantagem para os atores em questão, a localização se

apresenta como uma vantagem, nesse momento de análise. Após a instalação da usina e a aquisição de dados em volume e constância, será possível determinar o efeito da temperatura alta no funcionamento de todo o conjunto, o que dada a característica dos painéis bifaciais é um ponto de atenção. Dado o atendimento da expectativa de geração, conclui-se inicialmente que a implantação de um sistema baseado em tecnologias bifaciais é vantajosa para os atores interessados na admissão desses painéis em larga escala para o Brasil.

Dado o estágio de evolução e estudos da tecnologia, é reforçada a necessária atenção para as altas temperaturas de operação dos painéis. Os dados disponíveis para usinas em funcionamento ainda são referentes à locais com temperaturas mais amenas que a localização escolhida, o que reforça a novidade da tecnologia, e incertezas quanto a questão da temperatura e os problemas que podem causar.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O objetivo de analisar a viabilidade de uso de painéis bifaciais em projeto de grande escala para o Brasil foi satisfeito em duas etapas para esse trabalho. A primeira parte analisa características funcionais para a tecnologia bifacial e que podem ser uma vantagem operacional para projetos em larga escala no país. Esse estudo e caracterização das vantagens de desenho e funcionamento da tecnologia descreve não apenas as vantagens construtivas que levam a um aumento na eficiência, como o fato de poder gerar energia elétrica aproveitando os dois lados dos painéis, mas quais fatores de desenho podem acarretar problemas que diminuam a vida útil de operação dos painéis. Ainda que não analisado com profundidade, o tipo de terreno em que a instalação será feita também pode ser uma vantagem operacional para a tecnologia, e deve ser avaliado em trabalhos futuros. A análise de projetos instalados aponta para a vantagem de terrenos e artifícios que possam ampliar a eficiência na geração de energia elétrica.

Essa revisão mostra que a eficiência é consideravelmente mais alta para esses painéis frente à conhecida tecnologia monofacial, no entanto o estágio atual de implantação de projetos e os locais em que há projetos de larga escala em operação ainda são um ponto de atenção para o país. A atenção, nesse ponto, é para as altas temperaturas de operação que, aliadas às altas temperaturas do local de implantação da usina formam um ponto de atenção a ser acompanhado durante a manutenção do sistema e análise do projeto. A análise posterior, via simulação, aponta que as perdas por temperaturas são as mais significativas para o conjunto (cerca de 7%), e ao mesmo tempo que a vantagem da localização geográfica contribui para a geração de acordo com a expectativa dos atores, caso não seja monitorada pode reduzir o tempo de vida útil dos painéis. Ainda são necessários dados confiáveis para a usina em operação para determinar qual o risco que a questão da temperatura pode representar, mas essa questão pode ser considerada para análises da manutenção e programação de novos investimentos na usina em larga escala e para locais com perfil de temperatura semelhante. Como pontos fracos da análise de projetos anteriores, o desconhecimento da operação desses painéis em locais fora de países com clima mais moderado é uma desvantagem no método de avaliação das características técnicas apresentado.

Uma descrição breve de pontos a serem considerados para a avaliação econômica e análise dos pontos fracos e fortes da tecnologia é feita de forma complementar. Essa análise aponta quais vantagens e desvantagens da tecnologia em evolução podem ampliar o interesse na sua implantação, agregando valor ao projeto em questão. O estudo dos pontos fortes e fracos reforça que as possíveis desvantagens para a tecnologia bifacial ainda são pequenas frente as vantagens e a expectativa de eficiência de projetos futuros. A simulação via PVSyst confirma a atenção necessária para as perdas pela temperatura e o atendimento da expectativa de geração de energia elétrica dos atores interessados na tecnologia. As vantagens operacionais e a localização da usina em estudo podem beneficiar os atores, atendendo às expectativas de geração para a usina e reforçando a tendência de crescimento da instalação não somente no Brasil, mas em demais países. As altas temperaturas são um ponto de atenção para a execução do projeto, mas podem contribuir com novo conhecimento acerca o funcionamento dos painéis em países com temperaturas mais elevadas. Esse desconhecimento é natural, dado o estágio evolutivo da tecnologia e projetos em implantação e análise levantados.

Dadas as características levantadas em projetos anteriores e o resultado da simulação, os próximos passos para essa pesquisa são relacionados à avaliação dos dados e determinação de pontos que podem ampliar as vantagens operacionais da tecnologia. Assim, como próximos passos estão previstas além da análise dos dados levantados após a implantação do sistema e o estudo mais aprofundado das possibilidades de ganhos por tratamentos no terreno de instalação da usina, fato que pode ampliar as vantagens operativas do sistema, e a definição de planos de condução com foco em utilizar tecnologias complementares para aumentar a vantagem competitiva do uso de múltiplas fontes geradoras e assegurar o atendimento da demanda.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Santo Antônio Energia que financia o projeto de P&D “Geração Fotovoltaica em Multitecnologias e Estudo de Albedo para Geração Distribuída e Mobilidade com Veículos Elétricos” e que financiou os estudos que levaram à produção desse artigo.

REFERÊNCIAS

Appelbaum, J. (2016). Bifacial photovoltaic panels field. *Renewable Energy*, 85, p. 338e343.

- Araújo do Nascimento, C. (2004). *Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica*. Dissertação, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Lavras. Acesso em 03 de ago. de 2022, disponível em https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf
- Barrows, A. (27-28 de julho de 2020). *Trends in bifacial cell and module manufacturing*. Acesso em 19 de agosto de 2022, disponível em 2020 Bifacial PV Workshop: <https://www.dropbox.com/s/97wy44tgoce09vv/M2%20A%20-%20Alex.pdf?dl=0>
- Canal Solar. (24 de janeiro de 2022). *Painéis bifaciais com alterações de albedo e temperatura ambiente*. (Canal Solar) Acesso em 21 de agosto de 2022, disponível em Canal Solar: <https://canalsolar.com.br/paineis-bifaciais-com-alteracoes-de-albedo-e-temperatura-ambiente/>
- Gemeš, N. (25 de maio de 2022). *A comprehensive guide to bifacial solar panels*. Acesso em 18 de agosto de 2022, disponível em Green Citizen: <https://greencitizen.com/blog/bifacial-solar-panels/>
- Gu, W., Ma, T., Ahmed, S., Zhang, Y., & Peng, J. (2020). A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic. *Energy Conversion and Management*, 223, p. 113283.
- Guerrero-Lemus, R., Vega, R., Kim, T., Kimm, A., & Shepard, L. (2016). Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp. 1533–1549.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (14 de dezembro de 2022). *Cidades e Estados - Portal Cidades*. (IBGE) Acesso em 14 de dez. de 2022, disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ro/porto-velho.html>
- International Energy Agency. (2021). *Bifacial Photovoltaic*. Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems - Bifacial PV Modules and Systems, Photovoltaic Power Systems Programme. Acesso em 26 de jul. de 2022, disponível em https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf
- International Energy Agency. (2022). *Snapshot of Global PV Markets 2022*. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme. Acesso em 03 de agosto de 2022
- Kumbaroğlu, G., Çamlıbel, M., & Avci, C. (08 de julho de 2022). Techno-economic comparison of bifacial vs. monofacial solar panels. *Engineering Structures and Technologies*, 13(1), pp. 7-18. doi:<https://doi.org/10.3846/est.2021.17181>
- Meteonorm Software. (14 de dezembro de 2022). *Intro - en*. Acesso em 14 de dez. de 2022, disponível em <https://meteonorm.meteotest.ch/en/>
- Prefeitura de Porto Velho. (14 de dezembro de 2022). *A cidade*. Acesso em 14 de dez. de 2022, disponível em <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/17800/a-cidade>
- Sandhu, J. (16 de março de 2022). *Bifacial solar panels: innovative and more efficient*. Acesso em 18 de agosto de 2022, disponível em Solar Reviews: <https://www.solarreviews.com/blog/bifacial-solar-panels>
- Souza, J. (03 de maio de 2021). *Efeito PID - Degradação Induzida pelo Potencial em Módulos Fotovoltaicos*. Acesso em 09 de agosto de 2022, disponível em ECORI Energia Solar: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/efeito-pid---degradacao-induzida-pelo-potencial-em-modulos-fotovoltaicos>

OBSERVATIONS FOR THE IMPLEMENTATION OF BIFACIAL SYSTEMS IN A LARGE POWER PLANT IN BRAZIL

Summary. *The present work characterizes functional requirements for bifacial panels aimed at the implementation of bifacial panels in large plants. Methodologically, analyses are developed for the implementation of a solar generation plant with bifacial technology for a location in Brazil, contributing to the evaluation of performance conditions for hotter places and with a higher incidence of sunlight, justifying research related to the admission of bifacial systems in the country. The analysis is based on the characterization of innovations for photovoltaic generation technologies that provide significant improvements in the efficiency of solar modules, evidencing the growth in installation and the diversification of actors' expectations. As a characterized technology, bifacial cells are currently those with the greatest power of attraction for new projects, with prospects of surpassing monofacial technologies. Changes in the design of these cells allow sunlight to be better used, allowing the generation of electrical energy on both sides, and significantly increasing efficiency. This data reinforces the drop in the cost of the energy generated, demonstrating an estimated reduced payback time. The analyses of projects implemented in other regions confirm the expectations for the use of these technologies, but still imply the use of data from other countries and a relative lack of knowledge in the behavior of these modules for Brazil, reinforcing the still punctual nature of the facilities and the need for locally generated data. As a result, the study presents verified information related to the implementation of a large-scale power plant in Brazil, which allows the analysis of issues pertinent to the continuous growth trend of energy generation by photovoltaic sources, as well as the evaluation of conditions for the development of a new business model for generators, with the possibility of increasing efficiency and energy supply in the market using multiple generation technologies.*

Keywords: *Bifacial Technology, Technical Features, Scalability*