

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

RAFAELA OLIVEIRA DE AZEVEDO

**Simulação Fluidodinâmica Computacional de Jato de Água em Superfície Plana:
*avaliação de parâmetros operacionais para limpeza de módulos fotovoltaicos***

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

RAFAELA OLIVEIRA DE AZEVEDO

**Simulação Fluidodinâmica Computacional de Jato de Água em Superfície Plana:
*avaliação de parâmetros operacionais para limpeza de módulos fotovoltaicos***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheira Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Francisco Rafael
Moreira da Mota Prof.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Azevedo, Rafaela Oliveira
**Simulação Fluidodinâmica Computacional de Jato de
Água em Superfície Plana: avaliação de parâmetros operacionais
para limpeza de módulos fotovoltaicos** / Rafaela
Oliveira Azevedo; orientação de Francisco Rafael
Moreira da Mota. - Florianópolis, SC, 2025.

60 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Simulação Fluidodinâmica Computacional. 2. Energia
Solar. 3. Tensão de Cisalhamento. 4. Limpeza Automatizada.
5. Módulos Fotovoltaicos. I. Rafael Moreira da
Mota, Francisco. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. III. Simulação Fluidodinâmica Computacional de
Jato de Água em Superfície Plana.

Simulação Fluidodinâmica Computacional de Jato de Água em Superfície Plana:
avaliação de parâmetros operacionais para limpeza de módulos fotovoltaicos

RAFAELA OLIVEIRA DE AZEVEDO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de fevereiro, 2025.

Banca Examinadora:

Francisco Rafael Moreira da Mota, Dr. Eng.

Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

Vitor Farias de Borba, Me.
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

Ao meu pai, Luis Fabian Pereira Barbosa, que sempre me apoiou e é um pilar fundamental em minha vida. Seu suporte incondicional e incentivo constante foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e, em especial, à minha mãe, expresso minha mais profunda gratidão pelo suporte incondicional e pelo incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Vocês me proporcionaram a base necessária para seguir minha caminhada com tranquilidade, segurança e determinação. Sem o amor, o apoio e a confiança de vocês, esta conquista não seria possível.

A Bernardo Pozzan, que, com paciência e generosidade, me levou e buscou durante toda a graduação, garantindo que eu pudesse me dedicar aos estudos com mais conforto e tranquilidade. Sua ajuda constante fez toda a diferença nessa jornada e neste trabalho final; sou imensamente grata por todo o apoio.

Ao meu orientador, Francisco Rafael Moreira da Mota, um professor excepcional, cujo conhecimento e dedicação tornaram esta experiência uma das mais enriquecedoras da graduação. Obrigada por me orientar neste desafio, compartilhando aprendizado e incentivando minha evolução acadêmica e profissional.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação, deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho investiga a aplicação da Simulação Fluidodinâmica Computacional (CFD) para otimizar a remoção de sujeira em módulos fotovoltaicos por meio de jatos de água pressurizados. Como consequência do acúmulo de sujeira nos módulos, a eficiência dos painéis solares pode ser significativamente reduzida pelo acúmulo de poeira e outros contaminantes, comprometendo a geração de energia. O estudo utilizou o software ANSYS Fluent para modelar o impacto do jato d'água sobre uma superfície plana, variando parâmetros operacionais como inclinação do bocal e pressão de operação. Foram analisadas três geometrias de inclinação de bocal com valores de 90°, 135° e 145°, sob diferentes pressões de operação, para determinar a distribuição da tensão de cisalhamento e sua influência na remoção de partículas. Os resultados indicam que a Geometria 3, com inclinação de 145°, apresentou melhor desempenho na eficiência de limpeza, proporcionando um arraste mais prolongado das partículas ao longo da superfície do módulo, apesar de apresentar picos de tensão de cisalhamento menores que a Geometria 1. Além disso, observou-se que a inclinação do bocal tem um papel fundamental na distribuição da tensão de cisalhamento, afetando diretamente a capacidade de remoção de sujeira. Como contribuição prática, este estudo sugere a aplicação desses resultados na projeção de um sistema automatizado de limpeza para módulos fotovoltaicos, permitindo que sensores detectem a necessidade de limpeza e ativem os jatos de água automaticamente, reduzindo a necessidade de mão de obra e otimizando o uso de recursos. Trabalhos futuros podem explorar a modelagem de um painel inteiro, a análise de diferentes tipos de bocais e a implementação experimental dos sistemas simulados. Os achados deste estudo contribuem para o avanço da manutenção automatizada de usinas solares, garantindo maior eficiência e viabilidade econômica na geração de energia solar.

Palavras-chave: Simulação Fluidodinâmica Computacional. Energia Solar. Tensão de Cisalhamento. Limpeza Automatizada. Módulos Fotovoltaicos.

ABSTRACT

This study investigates the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation to optimize the removal of dirt from photovoltaic modules using pressurized water jets. As a consequence of dirt accumulation on the modules, the efficiency of solar panels can be significantly reduced by the accumulation of dust and other contaminants, compromising energy generation. The study employed ANSYS Fluent software to model the impact of water jets on a flat surface, varying operational parameters such as nozzle inclination and operating pressure. Three nozzle inclination geometries with values of 90° , 135° , and 145° were analyzed under different operating pressures to determine the shear stress distribution and its influence on particle removal. The results indicate that Geometry 3, with a 145° inclination, exhibited the best cleaning efficiency, providing a more prolonged drag effect on particles along the module surface, despite presenting lower shear stress peaks than Geometry 1. Additionally, it was observed that nozzle inclination plays a fundamental role in the distribution of shear stress, directly affecting the ability to remove dirt. As a practical contribution, this study suggests applying these results to the design of an automated cleaning system for photovoltaic modules, allowing sensors to detect the need for cleaning and automatically activate water jets, reducing labor requirements and optimizing resource use. Future research may explore the modeling of an entire panel, the analysis of different nozzle types, and the experimental implementation of the simulated systems. The findings of this study contribute to the advancement of automated maintenance in solar power plants, ensuring greater efficiency and economic viability in solar energy generation.

Keywords: Computational Fluid Dynamics. Solar Energy. Shear Stress. Automated Cleaning. Photovoltaic Modules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mantenedor limpando os módulos.	21
Figura 2 – Kit de Limpeza Manual.	22
Figura 3 – Tabela de Equipamentos de Limpeza Recomendado pelas Empresas.	23
Figura 4 – Gráfico da Melhoria de Eficiência conforme o tempo.	23
Figura 5 – Desenho técnico do Módulo Fotovoltaico.	26
Figura 6 – Geometria 1 - Bocal inclinado em 90°.	27
Figura 7 – Geometria 2 - Bocal inclinado em 135°.	28
Figura 8 – Geometria 3 - Bocal inclinado em 145°.	29
Figura 9 – Detalhe das geometrias utilizadas. Inclinação do bocal: (a) 90°;(b) 135° e (c) 145°.	29
Figura 10 – Estrutura do <i>Workbench</i>	30
Figura 11 – Malha gerada na geometria 1.	31
Figura 12 – Malha gerada na geometria 2.	31
Figura 13 – Malha gerada na geometria 3.	32
Figura 14 – Condições de contorno adotadas.	33
Figura 15 – Tensões de cisalhamento são observadas na superfície, com uma pressão de operação de 10 kPa.	35
Figura 16 – Malhas simuladas para geometria 2 com uma (1), duas (2) e três (3) camadas de refinamento junto ao painel.	36
Figura 17 – Validação do Modelo.	38
Figura 18 – Características de jatos de água.	39
Figura 19 – Jatos formados.	39
Figura 20 – Perfil de distribuição da pressão normal na região de impacto.	40
Figura 21 – Perfil de distribuição da pressão normal à superfície de incidência.	40
Figura 22 – Resultados dos picos de tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 2.	41
Figura 23 – Resultados dos picos de tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 3.	42
Figura 24 – Resultados dos picos de tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1.	43
Figura 25 – Resultados da distribuição da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 2.	44
Figura 26 – Resultados da distribuição da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 3.	45
Figura 27 – Resultados da distribuição da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1.	46

Figura 28 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 2 com 21 bar.	47
Figura 29 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1 com 21 bar.	47
Figura 30 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 3 com 35 bar.	48
Figura 31 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1 com 35 bar.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos com diferentes malhas.	37
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	13
1.2	Justificativa e relevância	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Fundamentos da Energia Solar	16
2.2	Acumulação de sujeira e eficiência energética	17
2.3	Técnicas de limpeza de painéis fotovoltaicos	18
2.3.1	Limpeza Manual	18
2.3.2	Limpeza com Jatos de Água	18
2.3.3	Limpeza por Sucção a Vácuo	18
2.3.4	Sistemas Automáticos	19
2.3.5	Precipitadores Eletrostáticos	19
2.4	CFD como ferramenta na geração de energia solar	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Descrição do Procedimento Atual de Limpeza	21
3.2	Modelagem CFD do Jato de Água para Limpeza de Pannel	24
3.2.1	Geometria utilizada	24
3.2.2	Modelagem e simulação, utilizando o <i>ANSYS Fluent</i>	30
3.2.3	Geração e avaliação da malha	30
3.2.4	Parametrização do modelo	32
3.2.5	Avaliação dos resultados	33
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	34
4.1	Avaliação da Malha	36
4.2	Validação do Modelo	37
4.3	Avaliação do jato de água	38
4.4	Avaliação da Pressão de Operação e Inclinação do Bocal	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.1	Proposta de um Sistema de Limpeza Automatizado	50
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICES	53
	APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS	54
	ANEXOS	58
	ANEXO A – DATASHEET DO MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZADO	59

1 INTRODUÇÃO

A eficiência dos módulos fotovoltaicos influencia diretamente a viabilidade econômica e sustentável das usinas solares. No entanto, a sujeira acumulada na superfície dos módulos é um dos principais fatores que impactam negativamente essa eficiência, reduzindo a capacidade de geração de energia. Estudos indicam que a sujeira, composta por poeira, barro, areia e outros resíduos orgânicos, pode diminuir significativamente a quantidade de irradiância recebida pelos módulos fotovoltaicos, afetando diretamente seu desempenho.

De acordo com OLORUNFEMI *et al.* (2022), essa sujeira pode reduzir o desempenho das plantas solares em até 85%, dependendo do tipo de contaminante acumulado. Além disso, o acúmulo de sujeira não apenas compromete a eficiência energética, mas também pode acelerar o envelhecimento e a corrosão dos módulos devido a condições climáticas adversas como chuvas fortes, neve ou alta umidade. A oclusão parcial dos módulos, causada por corpos estranhos, pode ainda levar à queima precoce das células fotovoltaicas, resultando em uma queda acentuada e permanente na produtividade do sistema.

Normalmente, uma usina solar com desempenho eficiente compreende uma *Performance Ratio* (PR), indicativo da performance da usina com base na irradiação e geração, entre 75% e 85%. Contudo, quando é verificada a presença de sujeira acumulada nos módulos, essa PR pode ser impactada, deixando a usina com uma performance significativamente inferior à prevista. A relevância deste tema reside na contribuição direta para a melhoria da eficiência energética e na redução dos custos operacionais das usinas solares. Um sistema de limpeza eficaz não apenas maximiza o desempenho dos módulos fotovoltaicos, mas também prolonga sua vida útil, garantindo a sustentabilidade e a viabilidade econômica das instalações de energia solar a longo prazo.

A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias avançadas de limpeza também fortalecem a posição competitiva do setor solar, incentivando a adoção de energia limpa e renovável. Além disso, a implementação de soluções de limpeza adequadas e bem planejadas é importante para evitar o aumento nos custos de produção, que podem ser ocasionados pela necessidade de recursos adicionais para manter as superfícies dos módulos em condições ideais de operação (OLORUNFEMI; OGBOLUMANI; NWULU, 2022).

Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas de limpeza de sujeira em módulos fotovoltaicos se torna uma prioridade para garantir a viabilidade econômica e sustentável das usinas solares. Um sistema de limpeza eficaz não apenas maximiza o desempenho dos módulos, mas também contribui para a longevidade deles, reduzindo

os custos operacionais e promovendo a adoção crescente de energia limpa.

Este Trabalho de Conclusão de Curso visa modelar e simular o escoamento de um jato de água sobre uma superfície plana (módulo fotovoltaico), utilizando ferramentas avançadas de simulação para analisar e otimizar o processo de limpeza. A pesquisa se concentrará em simulações computacionais, excluindo testes práticos de campo, devido às limitações de recursos e ao foco no desenvolvimento teórico. Com uma abordagem que integra conhecimentos em dinâmica de fluidos, controle de processos e tecnologia fotovoltaica, este projeto busca difundir o conhecimento sobre a influência de parâmetros operacionais do processo de limpeza para a manutenção e operação de usinas solares.

1.1 Contextualização

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias baseadas em recursos renováveis, sendo a energia solar uma das mais promissoras. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil possui uma vantagem competitiva expressiva nesse setor devido à alta incidência de radiação solar ao longo de todo o território nacional, com índices de irradiação que variam entre 3,5 e 6,3 kWh/m².dia. Essa característica torna o país um ambiente propício para o crescimento das instalações fotovoltaicas, tanto em sistemas distribuídos quanto em grandes usinas solares.

Embora o potencial técnico e econômico da energia solar seja amplamente reconhecido, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos pode ser gravemente afetado pela presença de sujeira e outros contaminantes sobre a superfície dos módulos. Poeira, fuligem, partículas de poluição industrial e resíduos orgânicos são exemplos de agentes que diminuem a eficiência ao impedir a passagem da luz solar para as células fotovoltaicas.

A necessidade de manutenção periódica e eficaz dos módulos fotovoltaicos para evitar a redução da geração de energia motivou o desenvolvimento de diversas tecnologias e estratégias de limpeza. No entanto, muitas dessas soluções ainda apresentam desafios técnicos e operacionais, como o alto consumo de água, a dificuldade de automação em larga escala e o risco de danos mecânicos aos painéis. Conforme destacado por Anglani *et al.* (2015), técnicas inadequadas de limpeza, quando realizadas manualmente, podem resultar em arranhões no vidro de proteção dos painéis, comprometendo a eficiência a longo prazo. Por sua vez, a utilização de jatos de água com pressão e orientação inadequadas pode causar a deterioração das vedações dos painéis e até mesmo curto-circuitos, agravando os riscos associados à manutenção inadequada.

1.2 Justificativa e relevância

A eficiência dos módulos fotovoltaicos influencia diretamente a viabilidade econômica e sustentável das usinas solares. A sujidade acumulada na superfície dos módulos é um dos principais fatores que impactam negativamente essa eficiência, reduzindo a capacidade de geração de energia. Portanto, o desenvolvimento de um sistema eficaz de limpeza de sujidade torna-se imperativo para maximizar o desempenho dos módulos fotovoltaicos.

A automação dos processos de limpeza emergiu como uma solução tecnológica para superar as limitações dos métodos convencionais. A automação permite a integração de sensores de monitoramento de sujeira, sistemas de acionamento remoto e bocais projetados para aplicar jatos de água em pressões e ângulos otimizados. O estudo realizado por Hudedmaniet *al.* (2017) destaca que sistemas automatizados podem reduzir significativamente o consumo de água e energia, além de minimizar os custos operacionais associados à manutenção manual.

Em grandes usinas solares, onde os módulos estão distribuídos em grandes extensões de terreno, a automação desempenha um papel fundamental. Sem ela, a limpeza frequente dos painéis exigiria mão de obra intensiva e altos custos logísticos. A aplicação de jatos de água por meio de bocais automáticos, conforme proposto por este trabalho, baseia-se nos parâmetros otimizados apresentados por Anglani *et al.* (2015), que demonstram a eficácia de ângulos de impacto de 75° a 90° e pressões controladas para remover partículas sem comprometer a integridade dos módulos.

A relevância deste tema está na contribuição direta para a melhoria da eficiência energética e na redução dos custos operacionais das usinas solares. Além disso, um sistema de limpeza eficaz prolonga a vida útil dos módulos fotovoltaicos, contribuindo para a sustentabilidade e a viabilidade econômica a longo prazo das instalações de energia solar. A pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de limpeza avançadas também fortalecem a posição competitiva do setor solar, incentivando a adoção de energia limpa e renovável.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar, utilizando simulação fluidodinâmica computacional, a influência dos parâmetros operacionais de jato de água no processo de limpeza de painéis solares.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos para o projeto, destacam-se:

- a) pesquisar sobre as diferentes soluções para a limpeza automática de painéis;
- b) pesquisar sobre as diferentes soluções para a simulação numérica de limpeza automática de painéis;
- c) selecionar os modelos matemáticos que serão utilizados para simulação do processo de limpeza do painel;
- d) implementar a modelagem e a simulação do processo de limpeza, utilizando o *software* escolhido;
- e) estudar a influência dos parâmetros operacionais e condições de contorno do modelo, buscando otimizar o processo de limpeza.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fundamentos da Energia Solar

A energia solar é uma das fontes renováveis mais promissoras para a diversificação da matriz energética mundial. Proveniente da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, essa forma de energia é gerada a partir de reações nucleares no núcleo solar, onde a fusão do hidrogênio resulta na liberação de grandes quantidades de energia térmica e radiação. Ao atingir a Terra, essa radiação pode ser aproveitada por diferentes tecnologias para conversão em energia térmica ou elétrica, desempenhando um papel fundamental na transição para um sistema energético mais sustentável. (DUFFIE; BECKMAN, 2013)

A radiação solar que chega à superfície terrestre depende de fatores como a posição geográfica, as condições atmosféricas e a inclinação da superfície receptora. Tais elementos influenciam diretamente a quantidade de energia disponível para conversão. Dessa forma, a distribuição da radiação solar é determinante para a eficiência dos sistemas que utilizam essa fonte energética (ENERGYSHOP, 2023).

A forma de conversão da energia solar em eletricidade mais comum ocorre por meio de sistemas fotovoltaicos, que utilizam células solares feitas de materiais semicondutores, como o silício. Esses materiais, ao absorverem fótons provenientes da radiação solar, promovem a movimentação de elétrons, gerando uma corrente elétrica contínua. Esse processo, denominado efeito fotovoltaico, tem sido amplamente explorado para aplicações tanto residenciais quanto comerciais (USP, 2023).

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos é influenciada por diversos fatores, incluindo a qualidade dos materiais das células, a tecnologia de fabricação e as condições de instalação. Além disso, a orientação e a inclinação dos módulos solares são determinantes para maximizar a captação da radiação solar. A orientação ideal dos módulos varia conforme a localização geográfica, sendo ajustada para garantir o maior rendimento energético (IFSUL, 2023).

O Brasil se destaca como um dos países com maior incidência de radiação solar no mundo, o que proporciona um grande potencial para a geração de energia elétrica a partir da tecnologia fotovoltaica. De acordo com a ABSOLAR (2024), a irradiação solar diária no território nacional varia entre 3,5 e 6,3 kWh/m².dia. A região Nordeste apresenta a maior média de irradiação solar, com valores em torno de 5,5 kWh/m².dia. Mesmo a região Norte, que possui a menor média de irradiação solar do país (aproximadamente 4,7 kWh/m².dia), supera o potencial de aproveitamento solar de países líderes no setor, como Alemanha e Japão. (ABSOLAR, 2024)

Dessa forma, a energia solar representa uma alternativa promissora para atender à crescente demanda energética global de maneira sustentável. A sua adoção

em larga escala permite não apenas a diversificação da matriz energética, mas também a mitigação de impactos ambientais decorrentes do uso de fontes convencionais de energia.

2.2 Acumulação de sujeira e eficiência energética

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos é diretamente influenciada pela limpeza das superfícies dos painéis solares. O acúmulo de sujeira, poeira e outros detritos na superfície dos módulos pode causar uma redução significativa na geração de energia elétrica. Estudos indicam que a sujeira acumulada atua como uma barreira, diminuindo a quantidade de luz solar que atinge as células fotovoltaicas e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência do sistema (OLORUNFEMI; OGBOLUMANI; NWULU, 2022).

A magnitude do impacto da sujeira na eficiência energética dos painéis solares varia conforme diversos fatores, incluindo a localização geográfica, as condições climáticas e o ambiente circundante. Regiões áridas ou semiáridas, por exemplo, tendem a apresentar maiores taxas de deposição de poeira, o que pode resultar em perdas de eficiência mais acentuadas. Além disso, áreas urbanas com altos níveis de poluição também estão sujeitas a um maior acúmulo de partículas nos módulos fotovoltaicos (OLORUNFEMI; OGBOLUMANI; NWULU, 2022).

O trabalho de Anglani *et al.* (2015) destaca que a sujeira nos painéis solares não apenas reduz a eficiência, mas pode, a longo prazo, impactar a vida útil dos módulos, aumentando a necessidade de manutenções corretivas. A interação entre a poeira e outros fatores ambientais, como alta umidade e poluição, pode formar camadas mais aderentes, que são mais difíceis de remover. Assim, métodos eficientes de limpeza tornam-se essenciais para garantir a integridade do sistema.

Para mitigar os efeitos negativos da sujeira na eficiência dos painéis solares, diversas estratégias de monitoramento e limpeza têm sido propostas. Olorunfemi, Ogbulumani e Nwulu (2022) realizaram uma revisão sistemática sobre sistemas inteligentes de monitoramento e limpeza de painéis solares, destacando a importância de abordagens automatizadas para a manutenção da eficiência energética. Tais sistemas utilizam tecnologias avançadas, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, para detectar e remover a sujeira de forma eficiente, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e otimizando o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Anglani *et al.* (2015) também exploraram o uso de jatos de água em alta pressão como um método eficaz de remoção de sujeira em superfícies solares. Eles concluíram que parâmetros como o ângulo de impacto, o tipo de bico utilizado e a pressão do jato desempenham papéis cruciais na eficácia da limpeza. Simulações Fluidodinâmicas Computacionais (CFD) foram usadas para determinar os melhores cenários de aplicação, demonstrando que ângulos de impacto entre 75% e 90% produzem

melhores resultados de remoção de sujeira.

Em resumo, o acúmulo de sujeira nos painéis solares representa um desafio significativo para a manutenção da eficiência energética dos sistemas fotovoltaicos. A implementação de soluções inteligentes de monitoramento e limpeza, bem como o uso de técnicas como jatos de água modelados por CFD, é essencial para garantir o desempenho ideal desses sistemas, contribuindo para a sustentabilidade e a viabilidade econômica da energia solar.

2.3 Técnicas de limpeza de painéis fotovoltaicos

A limpeza de painéis fotovoltaicos é um processo essencial para garantir a eficiência energética dos sistemas solares e reduzir os impactos do acúmulo de poeira e sujeira. Com base nos estudos de Anglani *et al.* (2015) e Hudedmani *et al.* (2017), diferentes métodos de limpeza foram avaliados, levando em consideração sua eficiência, custo e impacto nos módulos fotovoltaicos.

2.3.1 Limpeza Manual

A limpeza manual é um dos métodos mais tradicionais e amplamente utilizados. Consiste na remoção de sujeira usando panos, escovas ou esponjas, com ou sem o uso de água. Apesar de ser uma técnica simples, é ineficiente em grandes instalações solares devido ao tempo e esforço físico necessário, além do risco de danificar os painéis. Hudedmani *et al.* (2017) destacam que o uso inadequado de produtos de limpeza pode reduzir a transparência do vidro dos painéis, afetando sua eficiência.

2.3.2 Limpeza com Jatos de Água

De acordo com Anglani *et al.* (2015), o uso de jatos de água com pressão controlada é uma das abordagens mais eficazes para a remoção de sujeira sem causar danos aos módulos solares. Simulações de CFD realizadas no estudo mostraram que parâmetros como o ângulo de incidência (75° a 90°) e a pressão (5 a 70 Pa) são cruciais para maximizar a eficiência da limpeza. Além disso, o consumo de água pode ser otimizado, tornando a técnica mais sustentável.

2.3.3 Limpeza por Sucção a Vácuo

Outro método descrito por Hudedmani *et al.* (2017) é a limpeza por sucção a vácuo, que utiliza dispositivos para aspirar a sujeira dos painéis. Embora seja eficaz para a remoção de poeira superficial, essa técnica apresenta limitações em áreas de difícil acesso, como cantos, e pode causar danos devido a movimentos repetitivos sobre o vidro dos módulos.

2.3.4 Sistemas Automáticos

Os sistemas automáticos, como escovas motorizadas e limpadores automáticos baseados em *wipers*, têm se mostrado eficientes para grandes instalações solares. Esses sistemas funcionam de forma programada, reduzindo a necessidade de mão de obra. Hudedmani *et al.* (2017) relatam que a automação garante maior uniformidade na limpeza, mas o uso inadequado de escovas ou materiais abrasivos pode comprometer a integridade dos painéis.

2.3.5 Precipitadores Eletrostáticos

O estudo de Hudedmani *et al.* (2017) introduz o uso de precipitadores eletrostáticos (ESP) como uma abordagem inovadora para a limpeza de painéis solares. Esses dispositivos utilizam um campo eletrostático para atrair partículas de poeira para eletrodos carregados positivamente, removendo a sujeira sem contato físico. O sistema é controlado por um microcontrolador Arduino, que ativa o processo com base no peso da sujeira acumulada. Essa técnica oferece vantagens significativas, como maior eficiência em ambientes com alta concentração de poeira e a eliminação de danos mecânicos.

Nos últimos trinta anos, foram realizados estudos consistentes sobre aspectos e técnicas de limpeza, como a tecnologia de spray, jateamento abrasivo com água (AWJ), jato de ar em superfícies lisas e rugosas, além de pesquisas relacionadas em setores similares, como dinâmica de impacto de gotas, erosão do solo e mitigação de sujeira. (ANGLANI, 2015, p. 391).

Como citado anteriormente por Anglani *et al.* (2015), existem muitos estudos de qual seria a melhor forma de limpeza e como escolhê-la adequadamente. Acontece que a escolha da técnica de limpeza ideal depende de diversos fatores, como o tipo de instalação, o ambiente e os recursos disponíveis. Enquanto métodos convencionais, como limpeza manual e sucção a vácuo, apresentam limitações e custos mais altos, abordagens automatizadas e sistemas inovadores, como precipitadores eletrostáticos, oferecem soluções promissoras para melhorar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

2.4 CFD como ferramenta na geração de energia solar

A Dinâmica dos Fluidos Computacional ou Fluidodinâmica Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) tem se consolidado como uma tecnologia essencial para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis na geração de energia solar. Essa ferramenta permite a simulação de fenômenos complexos relacionados ao fluxo de fluidos, transferência de calor e interações ambientais, otimizando o desempenho e a eficiência de sistemas fotovoltaicos e solares térmicos.

Uma das primeiras aplicações pela qual o CFD é responsável no mercado da energia solar, é a Simulação do Fluxo de Ar e Acúmulo de Poeira. Um dos principais desafios para a eficiência dos sistemas fotovoltaicos é a deposição de poeira e sujeira, que pode reduzir significativamente sua capacidade de geração. A modelagem com CFD permite estudar o comportamento aerodinâmico ao redor dos módulos solares, identificando padrões de fluxo de ar que promovem a deposição de partículas (OLORUNFEMI; OGBOLUMANI; NWULU, 2022). Esses dados são utilizados para desenvolver soluções como sistemas de limpeza automática e ajustes no *design* dos painéis, visando minimizar a acumulação de sujeira.

Outro tópico que o CFD apresenta-se como importante é a Análise Térmica e Resfriamento de Módulos Fotovoltaicos. A aplicação do CFD possibilita a análise detalhada da distribuição térmica nos painéis e a avaliação de diferentes estratégias de resfriamento. Métodos como ventilação natural, resfriamento evaporativo ou sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos (PV-T) podem ser testados virtualmente, economizando recursos e tempo no desenvolvimento (HUDEDMANI *et al.*, 2017)).

Usinas de concentração solar utilizam espelhos para concentrar a radiação solar em um ponto focal, aquecendo fluidos de transferência de calor. Com o CFD, é possível modelar o comportamento desses fluidos, como sais fundidos ou óleos térmicos, avaliando sua eficiência em diferentes condições climáticas e operacionais (ANGLANI, 2015). Além disso, a ferramenta permite identificar perdas térmicas e propor melhorias no design dos coletores parabólicos e torres solares.

A geração de energia solar é sensível a fatores ambientais, como vento, radiação solar, chuva e poeira. A utilização do CFD permite prever como esses fatores afetam a eficiência de sistemas solares em diferentes regiões, auxiliando na escolha ideal da localização e do layout das usinas solares. Por exemplo, simulações podem indicar o ângulo de inclinação ideal dos módulos para maximizar a captação de radiação solar ao longo do ano.

Os benefícios do uso de CFD na geração de energia solar são significativos. Entre eles, destacam-se a possibilidade de reduzir custos com experimentos físicos, a maior precisão no desenvolvimento de soluções personalizadas e a capacidade de prever cenários críticos antes da implementação em campo (HUDEDMANI *et al.*, 2017). No entanto, é importante reconhecer que as simulações dependem de condições iniciais e parâmetros precisos, além de demandarem recursos computacionais significativos.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do Procedimento Atual de Limpeza

O procedimento atualmente adotado para a limpeza dos módulos fotovoltaicos baseia-se em uma abordagem manual, Figura 1, visando garantir a remoção de impurezas acumuladas sobre a superfície dos painéis. O processo inicia-se com a aplicação de água sob pressão controlada, inferior a 690 kPa conforme estipulado no *datasheet* do módulo da Canadian Solar, assegurando que o fluido utilizado esteja isento de impurezas e com um pH entre 6,5 e 8,5 a 25 °C. Além disso, é necessário garantir que a diferença de temperatura entre a água e o módulo não exceda 10 °C, prevenindo choques térmicos que possam comprometer a integridade da superfície fotovoltaica.

Figura 1 – Mantenedor limpando os módulos.



Fonte: Autor

Após a aplicação da água, procede-se com a remoção manual dos resíduos restantes por meio de um pano macio e limpo, acoplado a uma haste com rodo, permitindo alcançar toda a extensão do módulo. Esse procedimento visa minimizar o impacto abrasivo da limpeza sobre a superfície dos painéis, reduzindo a possibilidade de microdanificações que possam comprometer a eficiência energética do sistema.

Adicionalmente, o processo de limpeza é complementado pelo uso de equipamentos auxiliares (Figura 1 e 3), tais como pranchetas para anotações e registro das condições dos módulos antes e depois da limpeza, além de um detector de tensão, garantindo a segurança operacional da equipe responsável pela manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

Figura 2 – Kit de Limpeza Manual.



Fonte: Autor

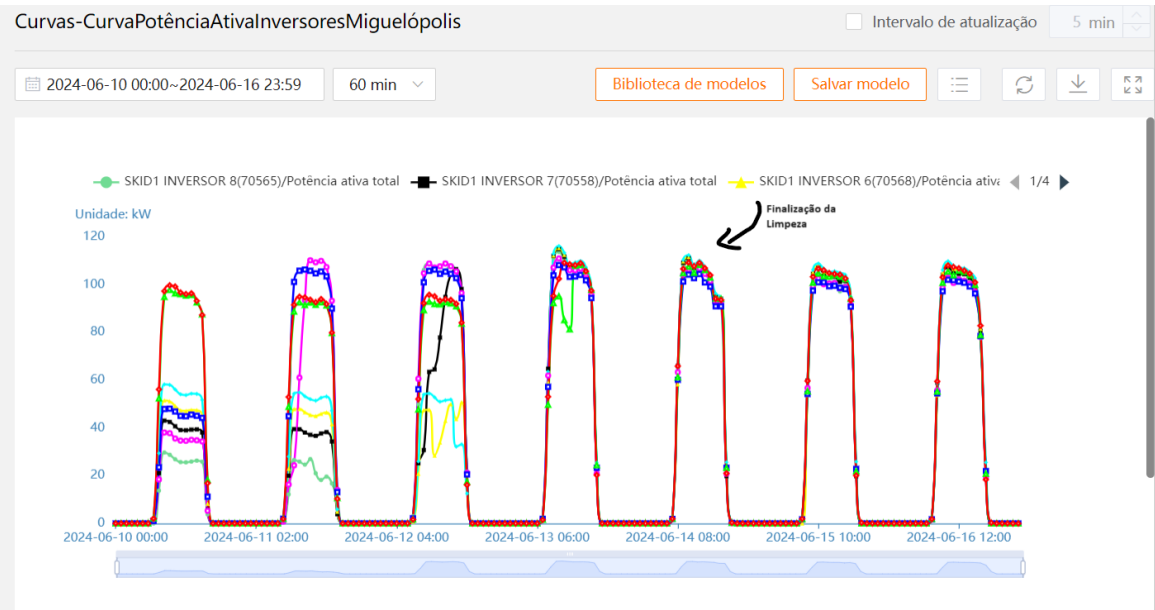
Figura 3 – Tabela de Equipamentos de Limpeza Recomendado pelas Empresas.

Item	Descrição	Unid	Qtde
1	Prancheta para anotações	Un	01
2	Equipamento para registro fotográfico	Un	01
3	Sistema de limpeza pressurizado hidráulico (motobomba, mangueiras, etc.)	Un	01
4	Água com pressão abaixo de 690 kPa, livre de impurezas, com pH entre 6,5 e 8,5 a 25°C, sendo que não pode existir uma diferença de temperatura entre a água e o módulo superior a 10°C	-	Conforme estado de sujidade dos módulos
5	Pano macio e limpo	Un	01
6	Haste com rodo para acoplamento do pano ou sistema pronto que é disponibilizado comercialmente destinado à limpeza de módulos fotovoltaicos	Un	01
7	Detector de tensão	Un	01

Fonte: Autor

A realização do processo de limpeza dos módulos fotovoltaicos em uma usina possibilita a observação direta da melhoria na eficiência energética do sistema. Esse resultado corrobora os estudos apresentados na Fundamentação Teórica, os quais demonstram que a remoção de sujeira acumulada sobre os painéis solares contribui significativamente para o aumento da captação da radiação solar e, conseqüentemente, para a otimização da geração de energia elétrica.

Figura 4 – Gráfico da Melhoria de Eficiência conforme o tempo.



Fonte: Autor

Na Figura 4, observa-se que as curvas representativas da Potência Ativa dos inversores apresentam defasagem entre si, evidenciando o impacto da sujeira

acumulada nos painéis solares sobre a geração de energia. Esse comportamento indica que a deposição de partículas na superfície dos módulos interfere na captação da radiação solar, reduzindo a eficiência do sistema fotovoltaico.

A partir do dia 14 de junho de 2024, nota-se uma uniformização das curvas, sugerindo uma melhoria no desempenho dos inversores após a realização do procedimento de limpeza. Esse resultado reforça a correlação entre a remoção de impurezas e o aumento da eficiência energética dos módulos fotovoltaicos, validando a importância da manutenção periódica para garantir um desempenho otimizado do sistema de geração solar.

Conforme discutido nos trabalhos de Olorunfemi *et al.* (2022) e Anglani *et al.* (2015), a presença de poeira e impurezas na superfície dos módulos reduz a eficiência do sistema devido à obstrução parcial da incidência da luz solar sobre as células fotovoltaicas. Dessa forma, a aplicação de técnicas adequadas de limpeza, conforme descrito no presente estudo, possibilita a recuperação do desempenho dos painéis, garantindo maior produtividade energética e prolongando a vida útil dos equipamentos.

3.2 Modelagem CFD do Jato de Água para Limpeza de Painel

Dentre os *software* comerciais disponíveis para simulação multifísica, optou-se por utilizar a solução oferecida pela ANSYS. A plataforma ANSYS Workbench possibilita a integração de diferentes *software* para a modelagem e simulação de problemas relacionados às ciências térmicas.

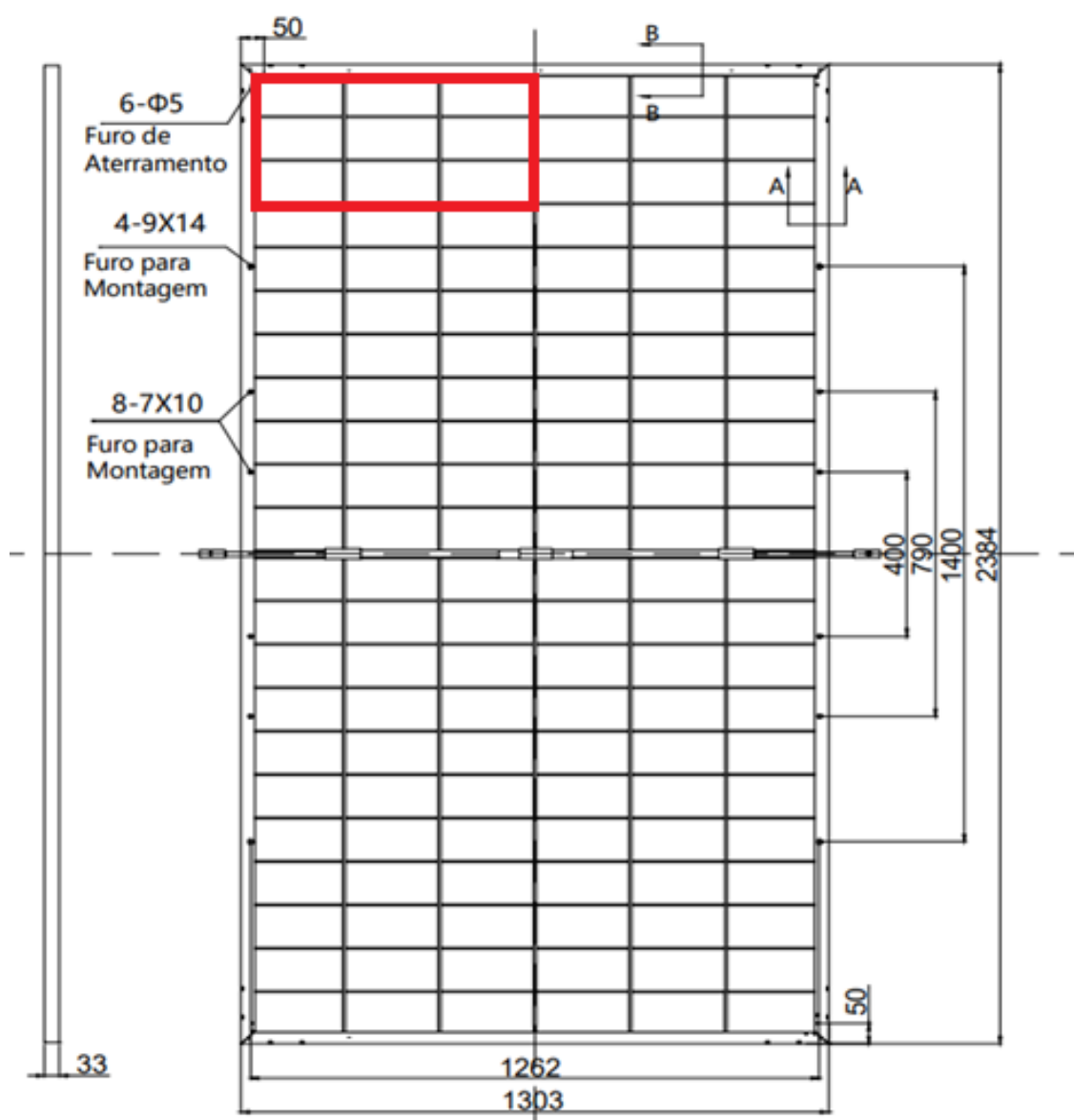
Para a modelagem e simulação de escoamentos multifásicos (problema em questão), os *software* CFX e Fluent podem ser utilizados. Para a simulação de jatos (de água ou ar), observou-se, na literatura, preferência por utilizar o Fluent.

3.2.1 Geometria utilizada

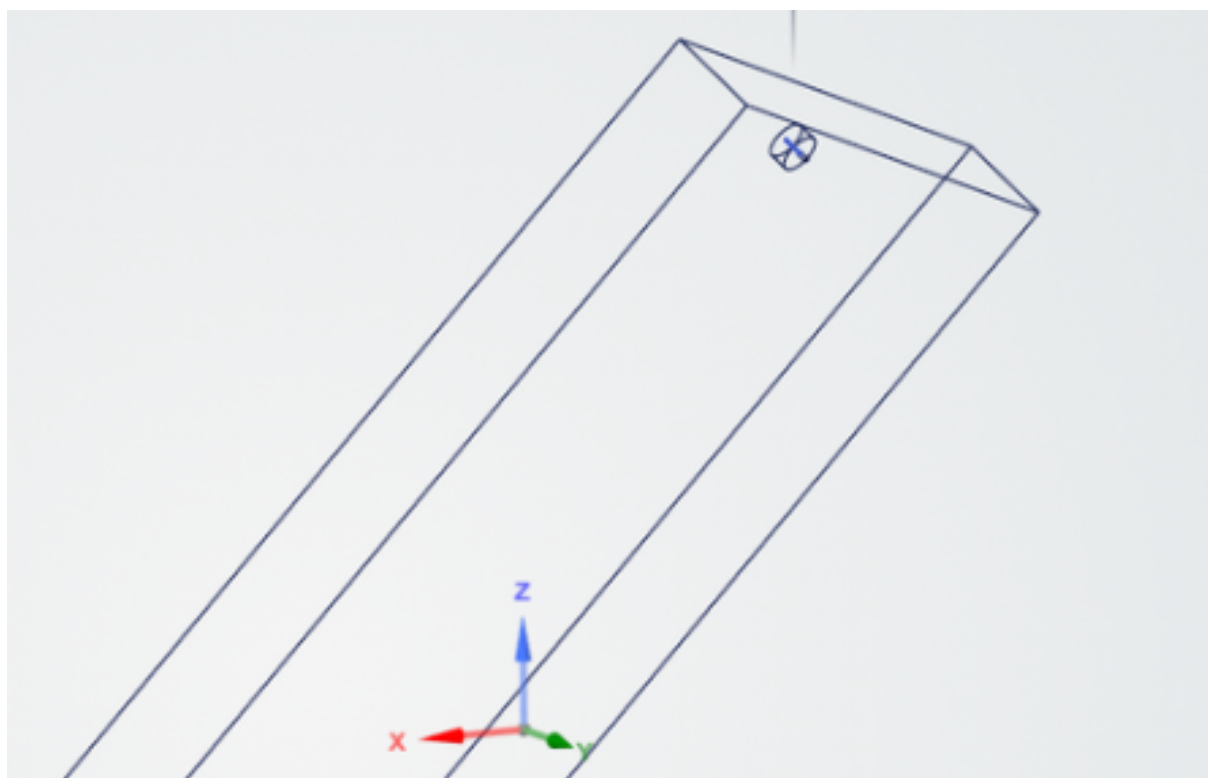
A geometria adotada neste trabalho foi modelada para representar de forma simplificada e eficaz a interação entre o jato de água e a superfície de um painel fotovoltaico. A metodologia utilizada baseia-se na criação de um domínio computacional composto por um paralelepípedo inclinado em 45° em relação ao eixo Z, de forma a replicar a inclinação típica dos módulos fotovoltaicos instalados em campo. Esse valor foi adotado com base na prática utilizada pela empresa na qual este estudo se apoia, onde os módulos são inclinados para favorecer o escoamento da água por gravidade, otimizando o processo de limpeza. Acima deste domínio, encontra-se posicionado um bico injetor (bocal), cuja inclinação será variada ao longo das simulações, visando avaliar o efeito da pressão (na saída do bocal) e do ângulo de impacto no processo de limpeza.

A parede inferior do paralelepípedo foi configurada como a superfície de um módulo fotovoltaico real, que, em suas dimensões originais, possui 1.303 mm de comprimento por 2.384 mm de altura. No entanto, para fins de simplificação computacional e viabilidade das simulações, foi modelado um recorte da superfície do painel correspondente a 3 x 3 células fotovoltaicas, o que resulta em uma área reduzida de 651,5 mm de comprimento por 325,09 mm de altura como é observado na Figura 5. Essa abordagem permite otimizar o tempo de processamento sem comprometer a precisão dos resultados. As Figura 6-8 representam as geometrias modeladas; na Figura 9, pode-se observar o valor do ângulo referente à inclinação do bocal. Todas as geometrias foram modeladas utilizando o *software* SolidWorks.

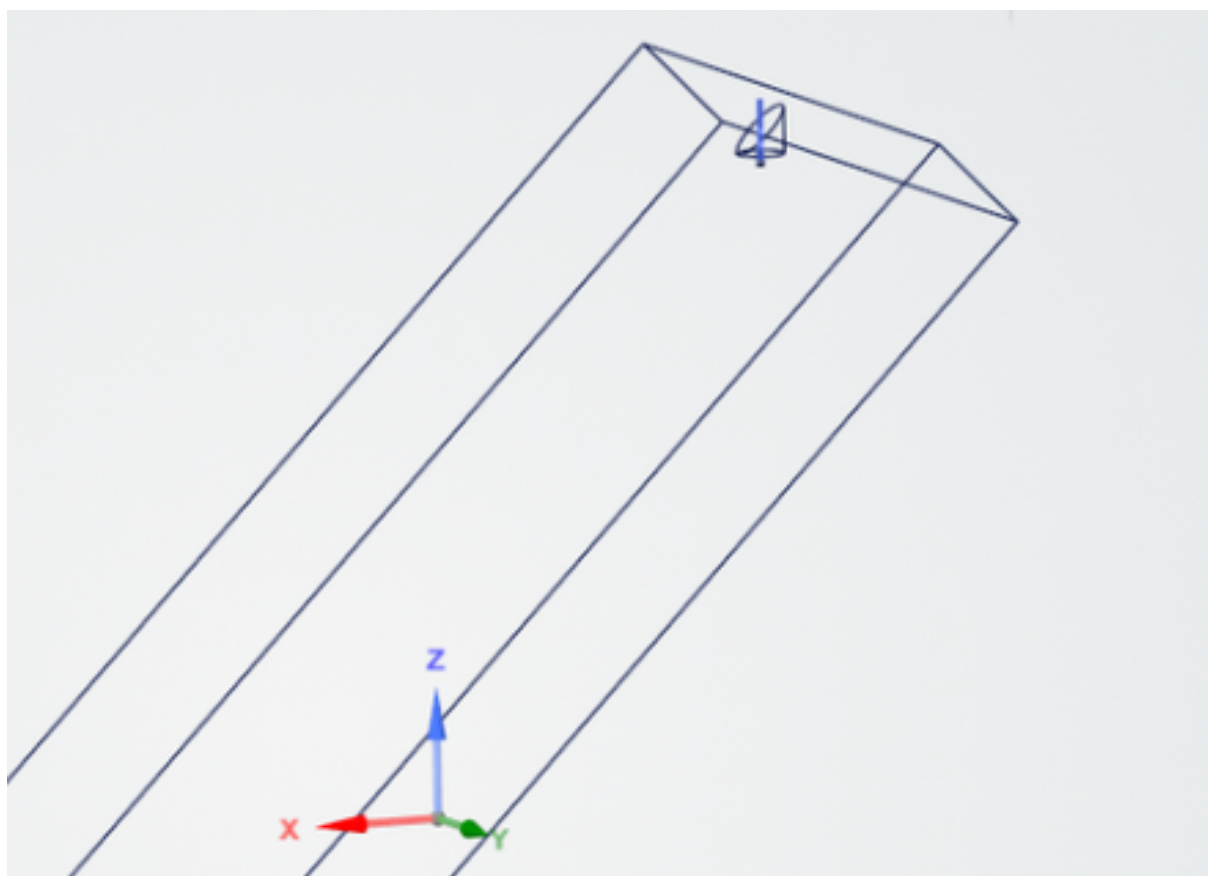
Figura 5 – Desenho técnico do Módulo Fotovoltaico.



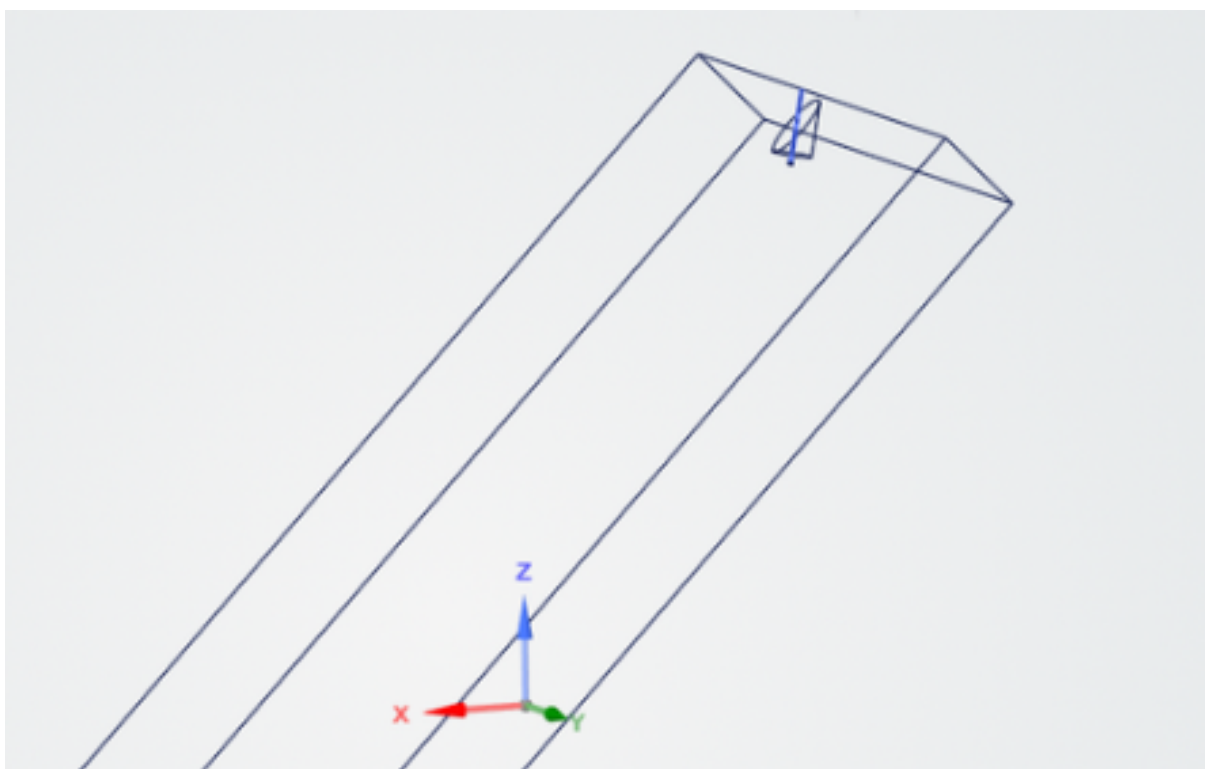
Fonte: Autor

Figura 6 – Geometria 1 - Bocal inclinado em 90°.

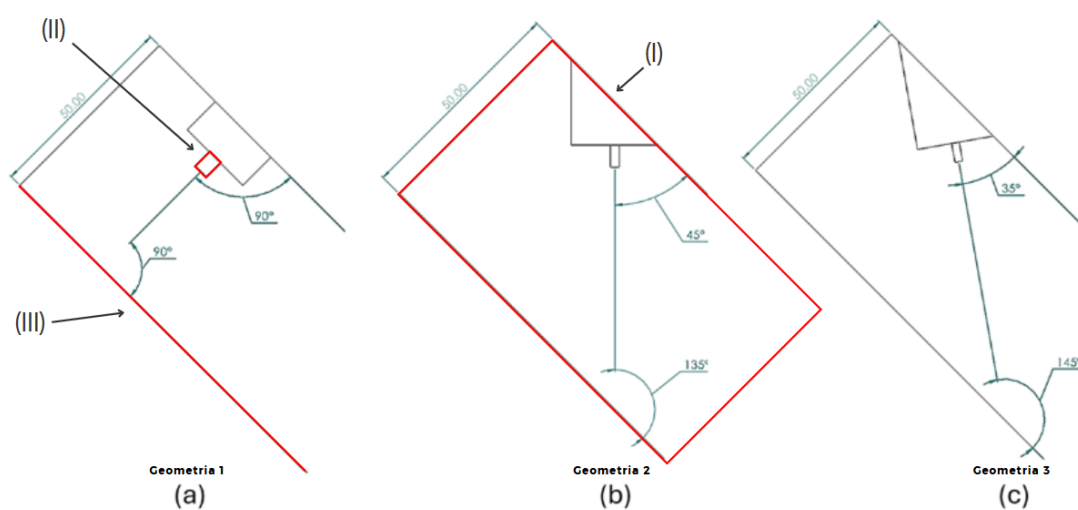
Fonte: Autor

Figura 7 – Geometria 2 - Bocal inclinado em 135° .

Fonte: Autor

Figura 8 – Geometria 3 - Bocal inclinado em 145°.

Fonte: Autor

Figura 9 – Detalhe das geometrias utilizadas. Inclinação do bocal: (a) 90°; (b) 135° e (c) 145°.

Fonte: Autor

Dessa forma, em resumo, as geometrias são compostas por:

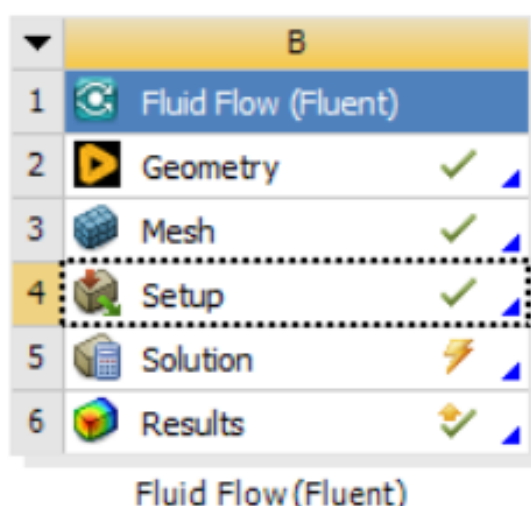
- um paralelepípedo inclinado - inclinação de 45° em relação ao eixo Z, simulando a instalação real de um painel;

- bico injetor ou bocal - posicionado na superfície superior do paralelepípedo, com possibilidade de variação angular para estudo de diferentes cenários (ver Figura 9);
- parede/superfície Inferior do paralelepípedo - representa a superfície do módulo fotovoltaico, onde ocorrerá a incidência do jato de água.

3.2.2 Modelagem e simulação, utilizando o *ANSYS Fluent*

Para a execução das simulações no *ANSYS Fluent*, seguiu-se uma sequência estruturada de etapas, conforme ilustrado na Figura 10. A seguir, detalha-se cada passo realizado no processo.

Figura 10 – Estrutura do *Workbench*.



Fonte: Autor

A geometria da simulação foi inicialmente desenvolvida no *SolidWorks*, conforme descrito na seção 3.2.1 deste trabalho. O modelo consiste em um domínio computacional de paralelepípedo inclinado em 45° com um bico injetor posicionado acima do painel fotovoltaico. A geometria foi exportada e importada para o *ANSYS Workbench* para continuidade do processo de simulação.

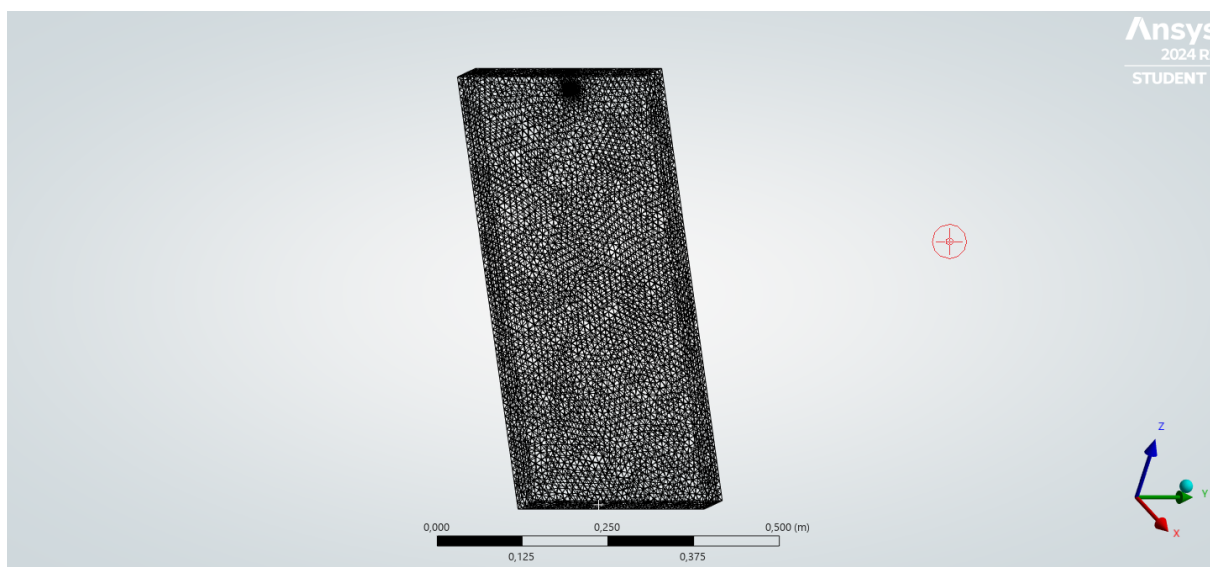
3.2.3 Geração e avaliação da malha

Após a importação da geometria, procedeu-se à geração da malha no módulo de *Mesh* do *ANSYS*. A malha foi configurada com o objetivo de garantir uma resolução suficiente para capturar os detalhes importantes do fluxo sem ultrapassar as limitações impostas pela licença estudantil. Nas Figuras 11-13, pode-se observar a malha gerada para cada geometria.

Os seguintes parâmetros de malha foram definidos:

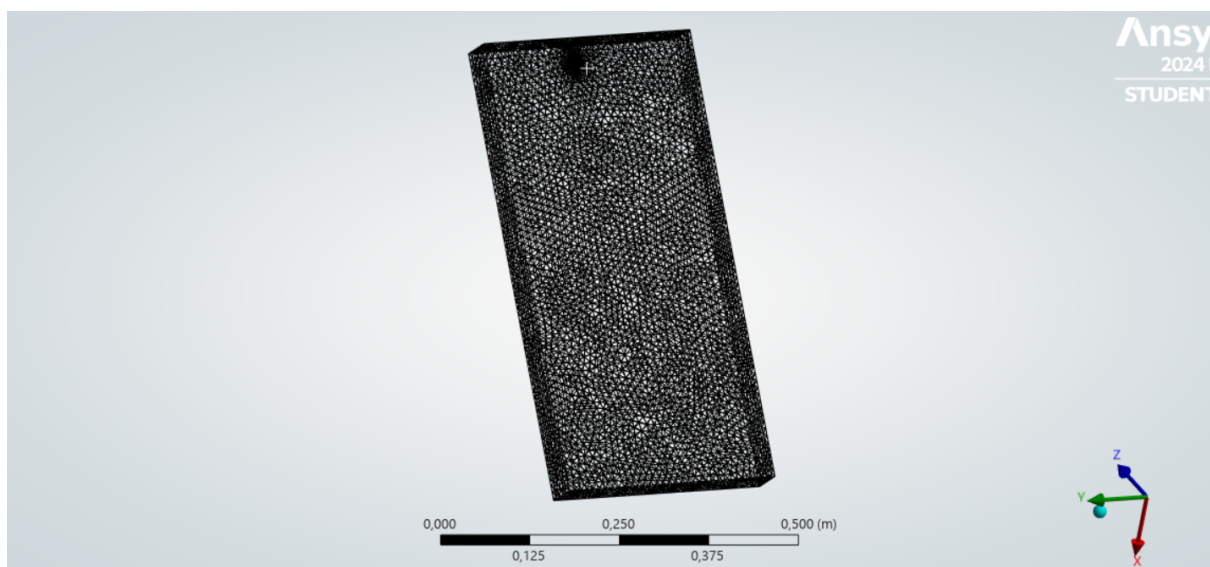
- tamanho máximo para elementos em áreas menos críticas (*max size*) de 5 mm;
- tamanho médio dos elementos (*Element Size*) de 1 mm;
- taxa de crescimento da malha (*Growth Rate*) de 1,2;
- refinamento da superfície inferior (painel) de 1, 2 ou 3 camadas.
- O elemento finito utilizado foi o tetraédrico linear.

Figura 11 – Malha gerada na geometria 1.



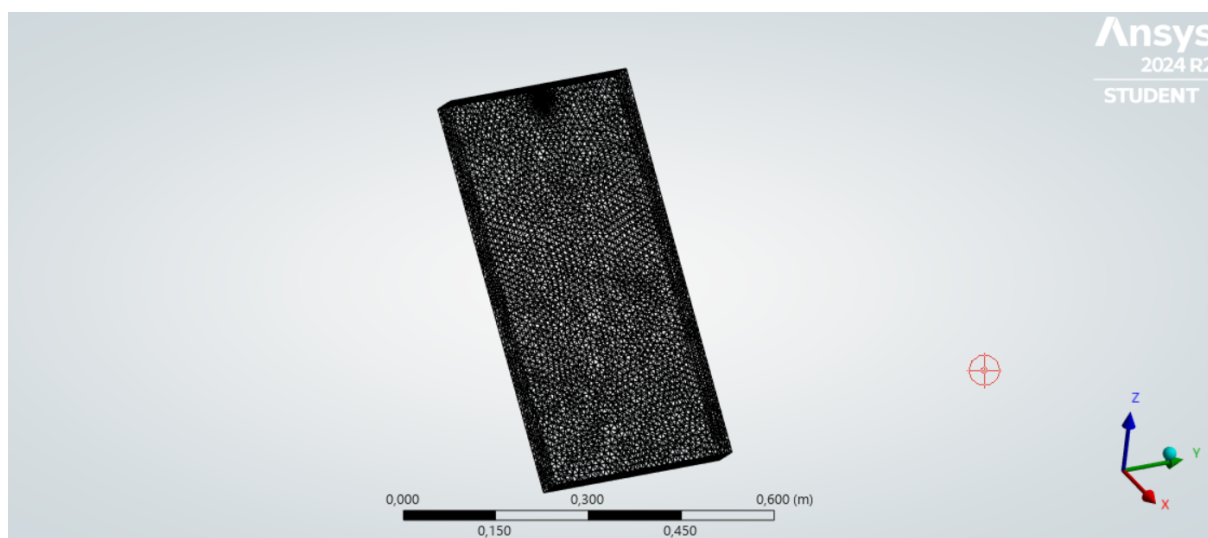
Fonte: Autor

Figura 12 – Malha gerada na geometria 2.



Fonte: Autor

Figura 13 – Malha gerada na geometria 3.



Fonte: Autor

Esses valores foram escolhidos de forma a equilibrar o nível de detalhamento necessário nas áreas críticas da simulação (como a região próxima ao jato de água e à superfície do módulo) com a capacidade de processamento disponível. A malha refinada foi aplicada nas regiões de interação do jato de água com a parede do módulo fotovoltaico, enquanto as áreas menos críticas receberam uma malha menos densa.

No módulo de *Mesh*, ainda foram selecionadas as regiões (entrada, saída e parede) para melhor orientação na parametrização do modelo.

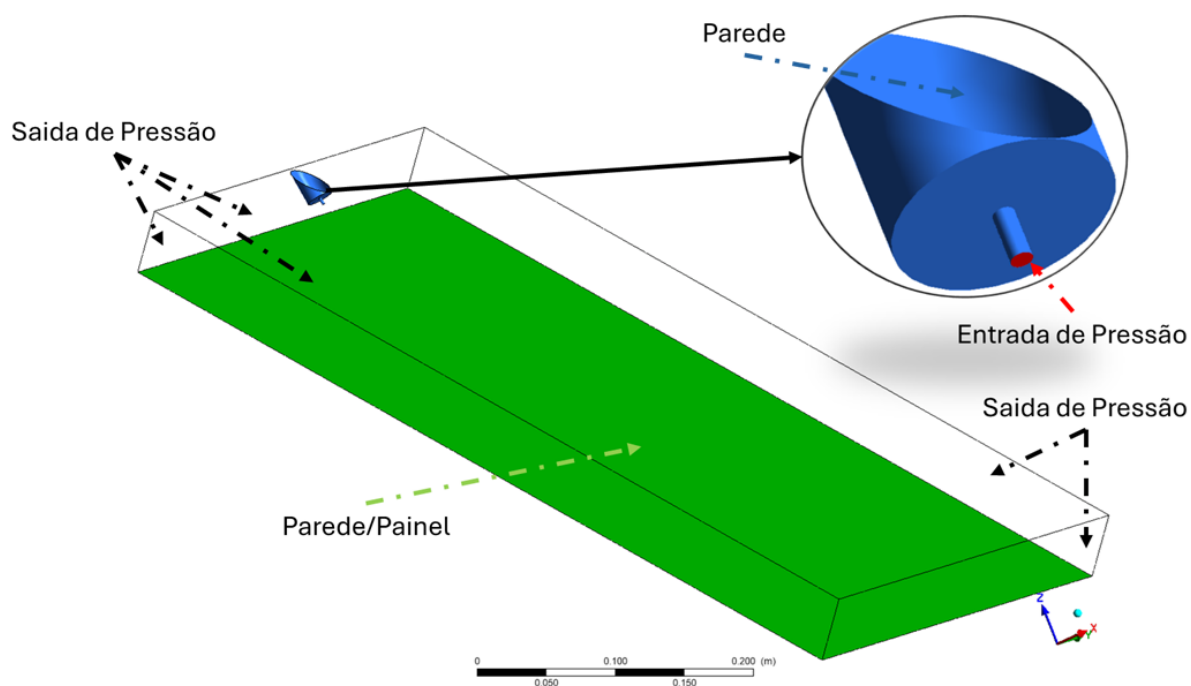
3.2.4 Parametrização do modelo

No módulo de *Setup* do *Fluent*, foi definida a simulação de um fluxo multifásico (água e ar) utilizando o modelo Euleriano, com o método de turbulência configurado para o modelo SST (*Shear Stress Transport*). Esse modelo foi escolhido devido à sua capacidade de prever com precisão a separação de fluxo e os gradientes de tensão de cisalhamento, características fundamentais no estudo da limpeza de superfícies.

Em seguida, foram definidas as seguintes condições de contorno (ver Figura 14):

- entrada (*Pressure Inlet*) - Condição de entrada de água pelo bico injetor com pressão e ângulo configurados de acordo com os parâmetros definidos para cada simulação;
- saídas (*Pressure Outlet*) - Condição de saída de água com pressão atmosférica;
- paredes (*Wall*) - Representação da superfície do painel fotovoltaico e superfície do bocal, consideradas como uma superfícies fixas e rugosas.

Figura 14 – Condições de contorno adotadas.



Fonte: Autor

Para cada inclinação do bocal (90° , 135° e 145°), foram simulados cinco casos com diferentes valores de pressão: 7, 14, 21, 28 e 35 bar. A análise focou nos picos e distribuição (ao longo de uma linha posicionada no painel) da tensão de cisalhamento para cada valor de pressão.

3.2.5 Avaliação dos resultados

Após a obtenção dos resultados, o módulo *Results* foi utilizado para visualizar o comportamento do escoamento e avaliar variáveis de interesse, como a pressão exercida sobre a superfície do painel e o padrão de distribuição do jato de água. As simulações foram analisadas para identificar o efeito das diferentes configurações de ângulo e pressão, correlacionando-as com capacidade de remoção de sujeira.

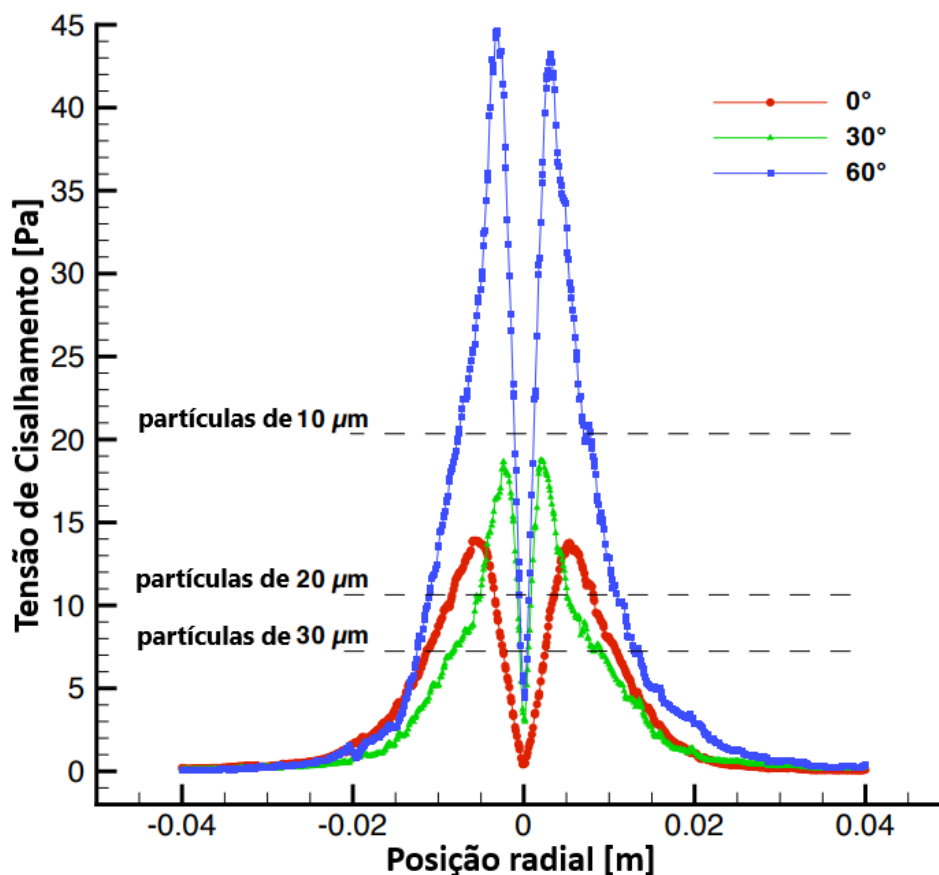
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A tensão de cisalhamento desempenha um papel determinante na remoção de partículas de superfícies sob a ação de jatos turbulentos. Estudos indicam que a remoção ocorre devido à aplicação dessa tensão à superfície, sendo essa força considerada o principal fator que contrasta a adesão das partículas (YOUNG; HARGATHER; SETTLES, 2013). No entanto, essa relação não é linear, ou seja, um aumento na tensão de cisalhamento nem sempre resulta em uma remoção proporcional de partículas. A eficiência da remoção depende, portanto, da distribuição da tensão sobre a superfície e da existência de um limiar crítico abaixo do qual a remoção é insignificante (YOUNG; HARGATHER; SETTLES, 2013).

Com base nos estudos de Young *et al.* (2013), o presente trabalho procura os melhores resultados de tensão de cisalhamento para remoção das partículas de $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ e $30\mu\text{m}$.

A remoção de partículas em superfícies sujeitas a tensões de cisalhamento está diretamente relacionada à distribuição dessas tensões e à existência de limiares críticos abaixo dos quais a remoção é insignificante. Conforme os estudos de Vachon *et al.* (2010), a relação entre tensão de cisalhamento e remoção de partículas não apresenta um comportamento linear, e a eficiência da remoção depende da distribuição da tensão e da superação de um valor mínimo crítico.

Figura 15 – Tensões de cisalhamento são observadas na superfície, com uma pressão de operação de 10 kPa.



Fonte: (VACHON, 2010)

A análise dos dados apresentados na Figura 15 (VACHON, 2010) evidencia que o aumento da tensão de cisalhamento não implica, necessariamente, uma remoção proporcional de partículas. Cada tamanho de partícula apresenta um limiar crítico de tensão, abaixo do qual a remoção não ocorre. Segundo Vachon et al. (2010), partículas de 10 µm necessitam de uma tensão mínima de aproximadamente 20 Pa para iniciar o movimento, enquanto partículas de 20 µm e 30 µm requerem cerca de 12 Pa e 7 Pa, respectivamente.

A eficiência da remoção das partículas depende da maneira como a tensão de cisalhamento é distribuída sobre a superfície e da superação dos limiares críticos estabelecidos para cada tamanho de partícula. Conforme indicado na Figura 15, a tensão de cisalhamento é menos intensa no centro e aumenta em direção às bordas (VACHON, 2010). Esse comportamento implica que a remoção de partículas é menos eficiente na região central, onde a tensão atinge valores próximos de 0 Pa, enquanto nas extremidades, onde a tensão é alta, a remoção é expandida.

Além disso, o estudo de Vachon et al. (2010) indica que a inclinação da superfície também influencia significativamente a distribuição da tensão. No gráfico,

observa-se que ângulos maiores, como 60° , resultam em maiores tensões de cisalhamento, o que favorece a remoção das partículas. Por outro lado, em menores inclinações (0° e 30°), a tensão é reduzida, tornando a remoção menos eficiente.

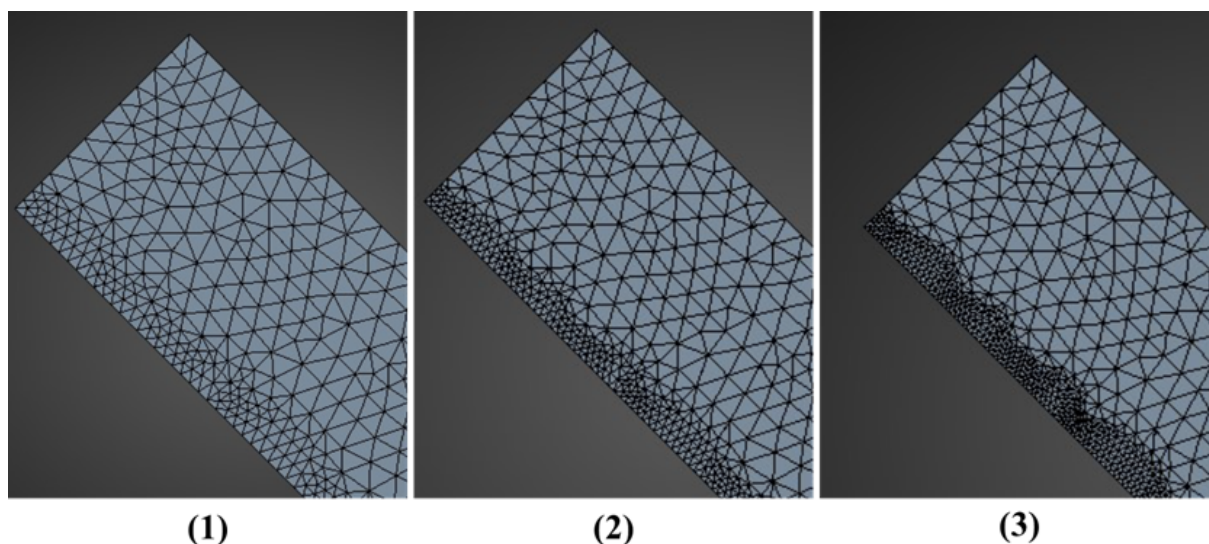
Essas tensões críticas foram determinadas considerando o comportamento de rolamento inicial das partículas, sendo o ponto crucial para sua subsequente remoção. O autor destaca que a tensão crítica é um parâmetro-chave ao projetar fluxos otimizados de remoção de partículas por meio de vórtices induzidos.(VACHON, 2010)

4.1 Avaliação da Malha

A escolha adequada da malha é um fator para garantir a precisão e eficiência das simulações numéricas. Para verificar a independência da malha nos resultados, foram geradas três malhas diferentes para a geometria 2 (bocal com inclinação de 135°), com refinamentos progressivos próximos ao painel. O objetivo desta análise é avaliar a influência do refinamento da malha nos resultados de tensão de cisalhamento, considerando a posição normalizada e o valor do pico da tensão de cisalhamento.

As simulações foram realizadas para um caso com pressão de 5 bar e as demais condições de contorno apresentadas anteriormente. A Figura 16 ilustra a distribuição dos elementos em cada uma das malhas analisadas.

Figura 16 – Malhas simuladas para geometria 2 com uma (1), duas (2) e três (3) camadas de refinamento junto ao painel.



Fonte: Autor

A Tabela 1 apresenta as principais características das malhas utilizadas, incluindo o número de nós e elementos; também a posição normalizada e o valor do pico da tensão de cisalhamento resultante.

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos com diferentes malhas.

Malha	Nós	Elementos	Posição Normalizada	Valor Máximo [Pa]
1	223.913	1.173.368	0,112098	30,7145
2	461.730	2.446.610	0,112113	30,8307
3	1.059.138	5.798.228	0,112115	30,8311

Fonte: Autor

Os resultados indicam que as diferenças entre as três malhas são pequenas tanto em termos da posição normalizada quanto do valor máximo da tensão de cisalhamento. A maior diferença entre os valores de tensão é de apenas 0,12% entre a malha 1 e a malha 3, sugerindo que os resultados estão praticamente independentes do refinamento da malha.

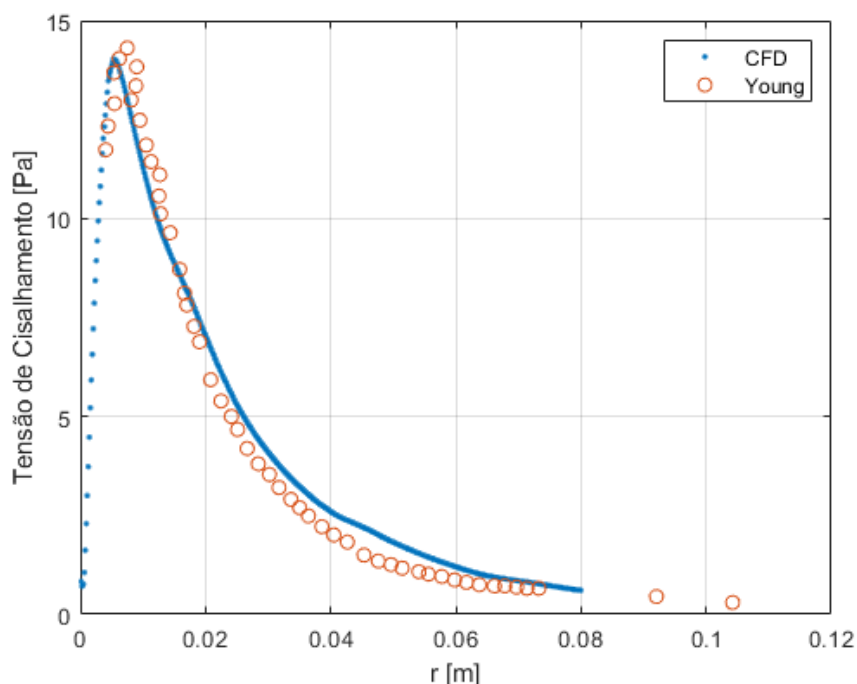
A análise comparativa das malhas demonstrou que o refinamento da malha não impacta significativamente nos resultados finais da simulação para o caso estudado. Com isso, a malha 1 foi utilizada para a execução das simulações do presente trabalho, uma vez que proporciona resultados confiáveis com menor custo computacional. Esta escolha permite a reprodução das análises utilizando licenças limitadas de software, garantindo acessibilidade para futuras pesquisas.

4.2 Validação do Modelo

Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos por meio de simulações numéricas, a validação do modelo foi realizada comparando os valores de tensão de cisalhamento obtidos na simulação com os dados experimentais reportados por Young *et al.* (2013). Essa comparação permite avaliar a precisão da modelagem e identificar possíveis discrepâncias que possam impactar a análise dos fenômenos envolvidos. Para tanto, utilizou-se a mesma metodologia descrita na Seção 3.3. A saber:

- modelagem da geometria - utilizou-se o *software* SolidWorks para criar uma geometria que representasse o *setup* do experimento. Um paralelepípedo (160 mm X 160 mm X 170 mm) foi criado para representar a região de desenvolvimento do jato e a superfície plana de incidência. O bocal foi representado por um cilindro (3,75 mm de diâmetro e 95 mm de comprimento) posicionado no centro da superfície superior do paralelepípedo;
- condições de contorno - tal como nas demais simulações, foram utilizadas as condições entrada de pressão, saída de pressão e parede;
- parametrização do modelo - tal como nas demais simulações, foram utilizados o modelo Euleriano e o modelo SST.

Figura 17 – Validação do Modelo.



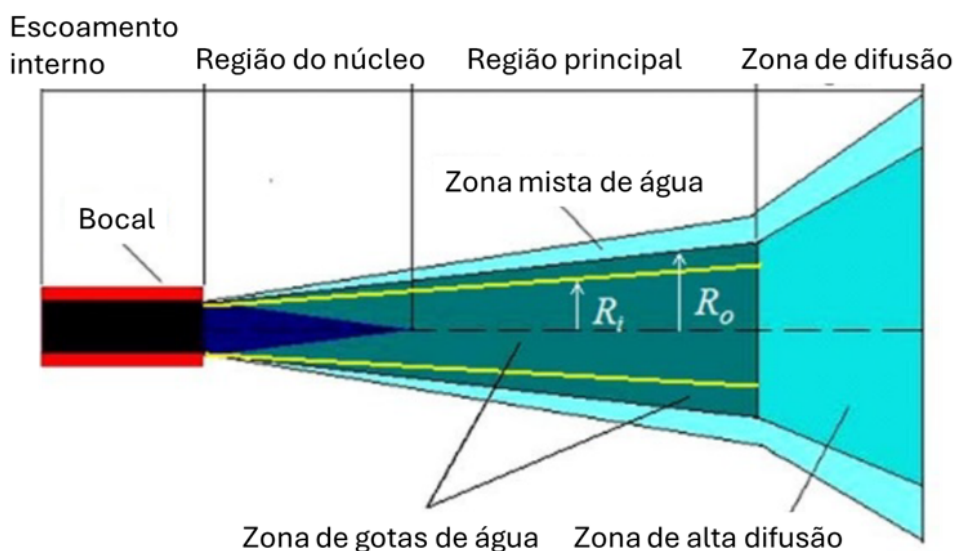
Fonte: Autor

Na Figura 17, pode-se observar tanto os valores obtidos no experimento de Young *et al.* (2013) quanto aqueles obtidos como resultado da simulação.

A análise dos resultados indica que o modelo numérico captura de maneira satisfatória a distribuição do escoamento e a dissipação da tensão de cisalhamento ao longo da superfície impactada. O pico de tensão observado na simulação corresponde com o registrado experimentalmente, evidenciando que os principais mecanismos de interação entre o jato e a superfície foram corretamente modelados.

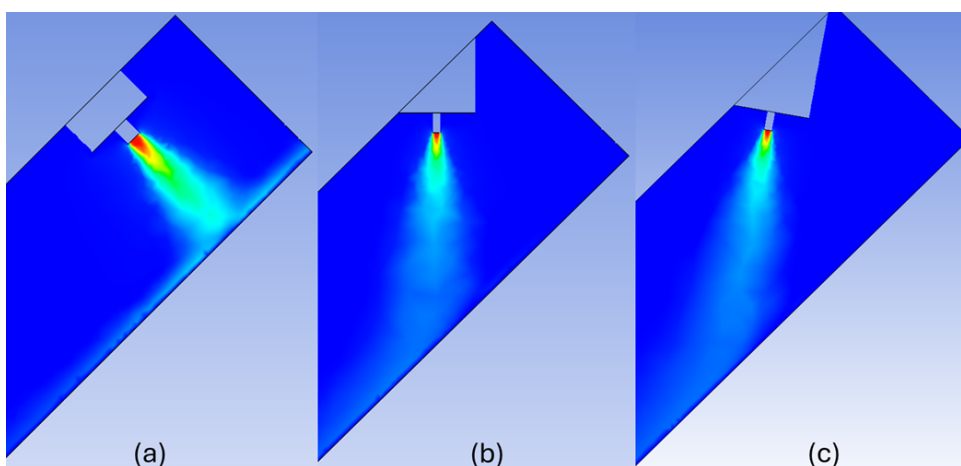
4.3 Avaliação do jato de água

Na literatura técnica já está bem estabelecido os conhecimentos sobre o comportamento e características de escoamentos/jatos de água obtidos com bocais de baixa e alta pressão. Sabe-se que o escoamento pode ser separado em três regiões (ver Figura 18): a região do núcleo caracterizada por altos valores de velocidade e concentração de gotas; a região principal, caracterizada por uma zona com alta concentração de gotas e por uma zona mista (água-ar); e, por fim, a zona de difusão que apresenta baixa concentração de gotas e perda de velocidade.

Figura 18 – Características de jatos de água.

Fonte: Adaptado de (GUHA; BARRON; BALACHANDAR, 2011).

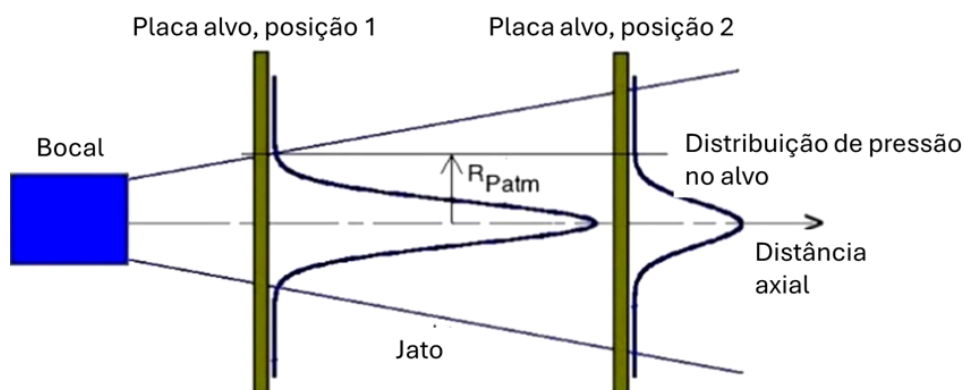
Na Figura 19, pode-se observar o perfil de distribuição de velocidade dos jatos obtidos nas simulações com diferentes inclinações do bocal. Nota-se, claramente, a presença das regiões e comportamentos descritos anteriormente. Como esperado, a região de difusão é maior para os bocais com inclinações de 135° e 145°; isto acontece, pois a distância efetiva entre o bocal e o painel é maior.

Figura 19 – Jatos formados.

Fonte: Autor

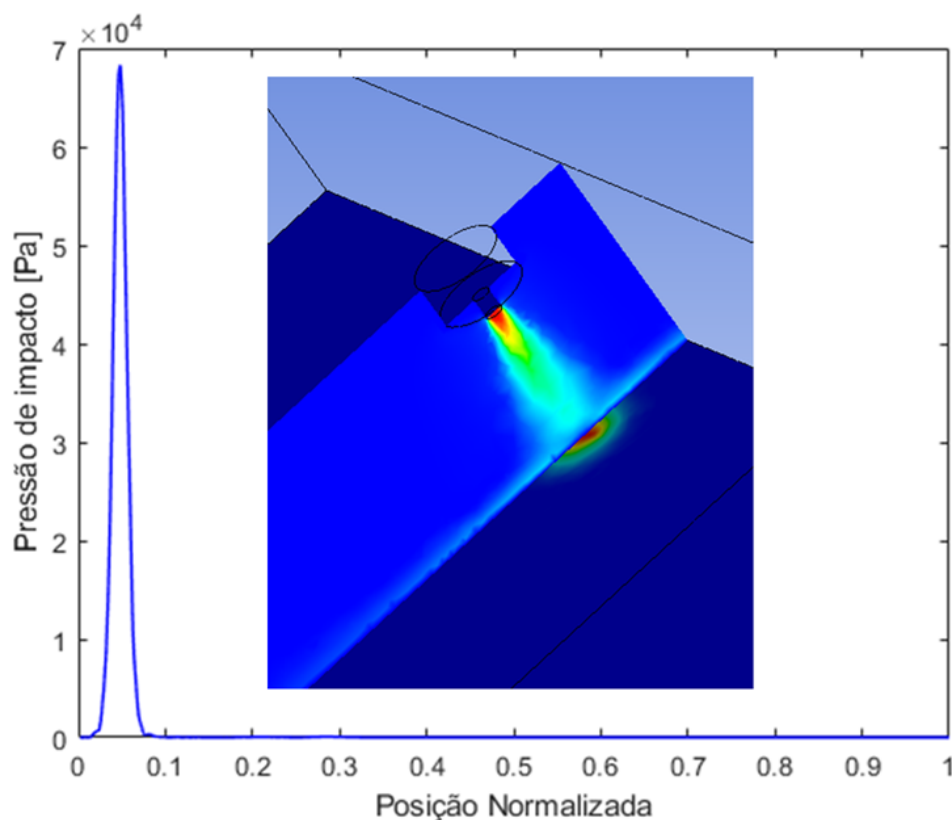
Outro ponto importante a ser observado é a distribuição da pressão normal na superfície plana onde incide o jato. Na Figura 20, observa-se o perfil de distribuição teórico, caracterizado por uma curva normal. O valor do pico depende da distância entre a saída do bocal e a superfície de incidência. A Figura 21 representa o resultado obtido na simulação; nota-se as mesmas características descritas na literatura.

Figura 20 – Perfil de distribuição da pressão normal na região de impacto.



Fonte: Adaptado de (MENG *et al.*, 1996).

Figura 21 – Perfil de distribuição da pressão normal à superfície de incidência.



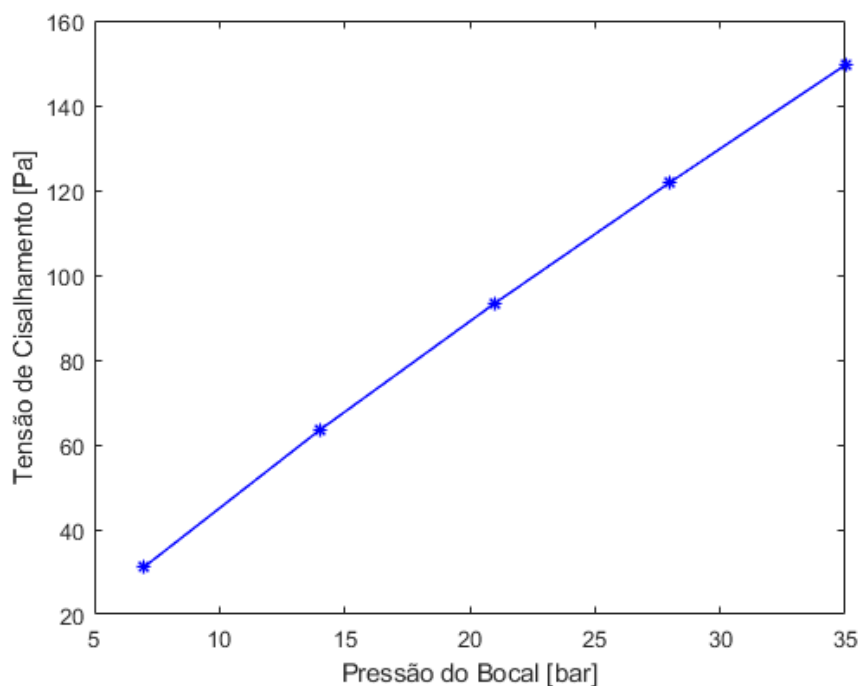
Fonte: Autor.

4.4 Avaliação da Pressão de Operação e Inclinação do Bocal

Para cada geometria, conforme as Figura 6, 7 e 8, foram simulados cinco valores diferentes de pressão no bocal (*inlet*). A análise focou nos picos e distribuição da tensão de cisalhamento.

A Figura 22 resume os resultados obtidos para as simulações com a geometria 2 (inclinação de 135°).

Figura 22 – Resultados dos picos de tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 2.

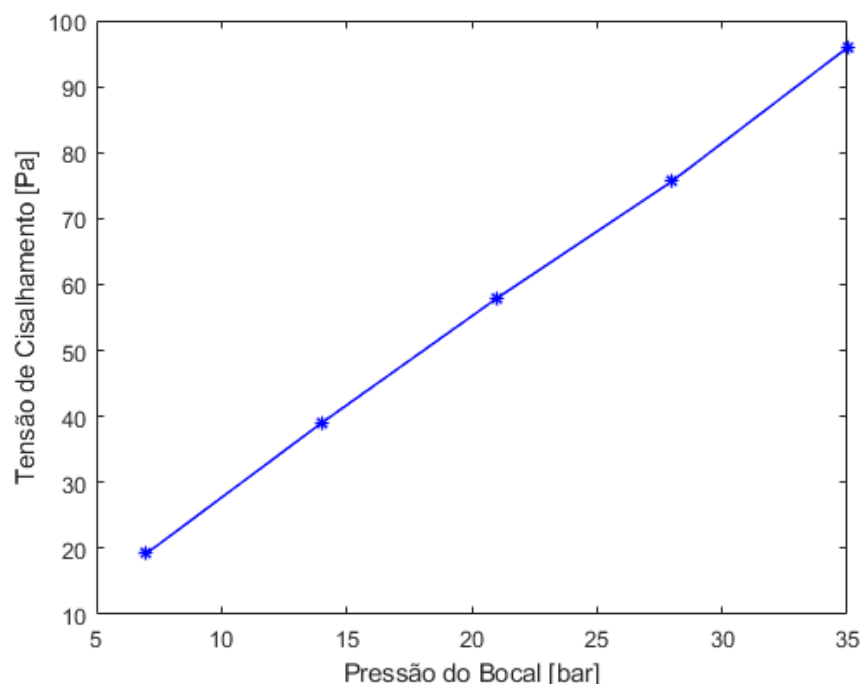


Fonte: Autor.

Observa-se que, conforme a pressão de operação aumenta, o pico da tensão de cisalhamento cresce (quase que linearmente), indicando uma relação direta entre a pressão aplicada e a força de arrasto na superfície do módulo. Além disso, a aplicação de uma pressão de 35 bar resultou em uma tensão de cisalhamento máxima de aproximadamente 150 Pa.

Segundo *Vachon et al.* (2010), para retirada das partículas de 10 μm , é necessária uma tensão de cisalhamento mínima de 20 Pa. Ou seja, teoricamente, é possível remover essas partículas, aplicando a pressão de 7 bar no bocal com 135° de inclinação.

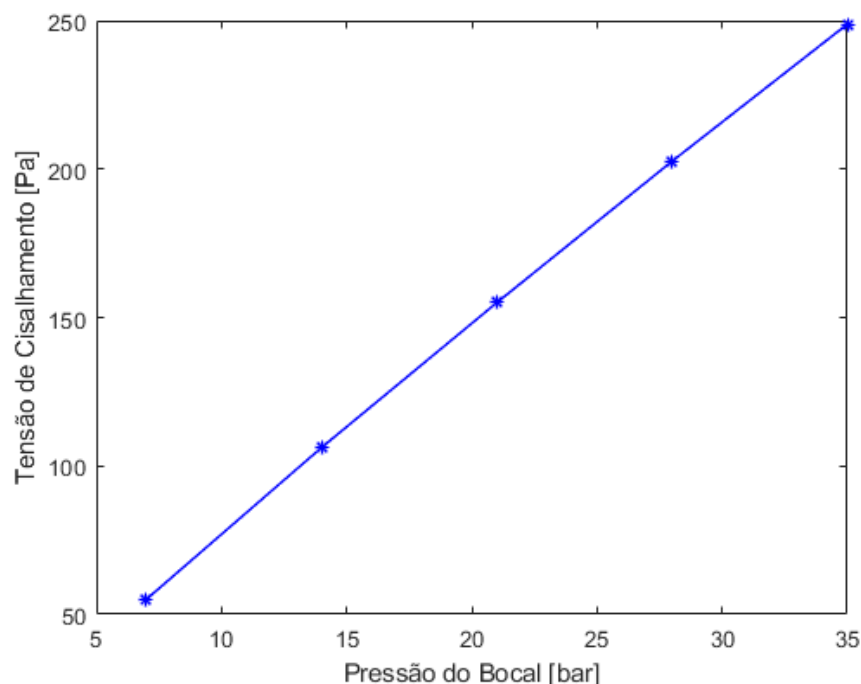
Para a geometria 3 (inclinação de 145°), foram observados valores menores de tensão de cisalhamento máximo atingido para cada pressão de operação, ver Figura 23.

Figura 23 – Resultados dos picos de tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 3.

Fonte: Autor.

Na condição de maior pressão operacional aplicada ao sistema, correspondente a 35 bar, a tensão de cisalhamento atingiu um valor máximo de aproximadamente 97 Pa. Com essa inclinação do bocal, seria necessário uma pressão acima de 7 bar para efetiva remoção de partículas de 10 μm .

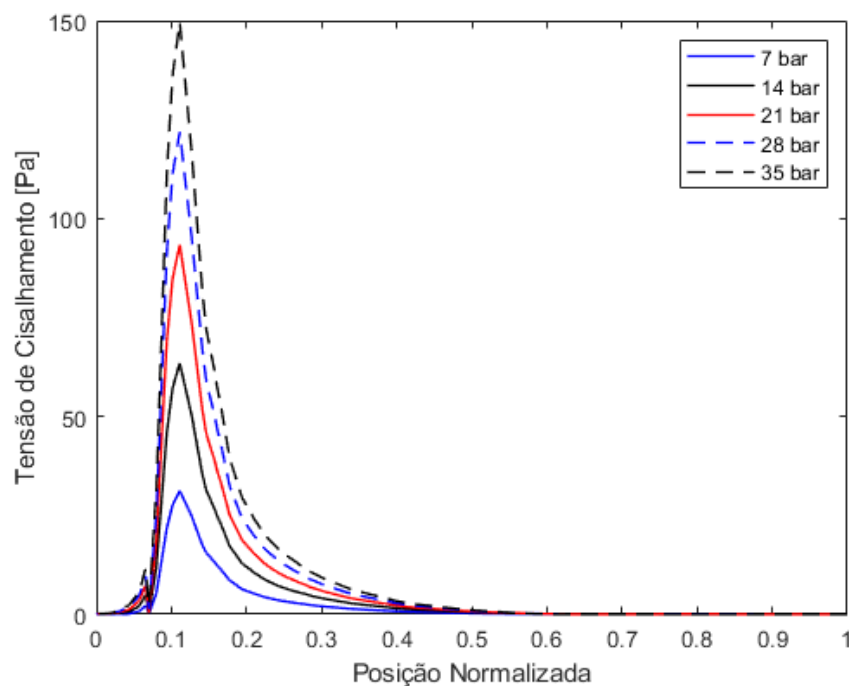
Para a geometria 1 (inclinação de 90°), os valores de tensão de cisalhamento foram superiores aos observados nas geometrias 2 e 3, alcançando um valor máximo de 250 Pa para uma pressão de operação de 35 bar. Iniciando com uma pressão de 7 bar, onde a tensão de cisalhamento apresentou valores próximos de 50 Pa, percebe-se que o aumento da pressão resulta em uma intensificação significativa do esforço tangencial, indicando uma relação direta entre a pressão aplicada e a eficiência da remoção de partículas.

Figura 24 – Resultados dos picos de tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1.

Fonte: Autor.

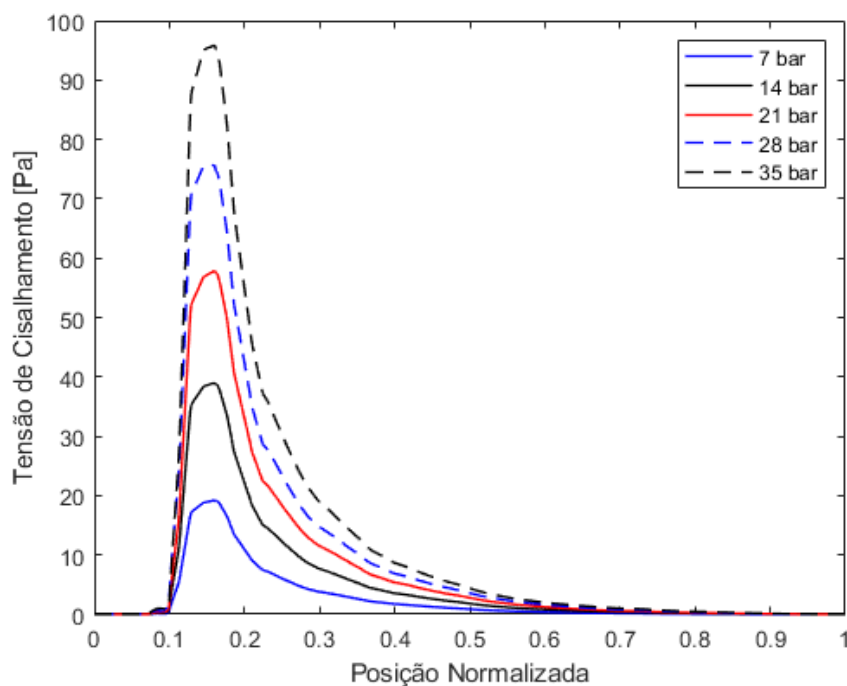
Como já observado, a inclinação do bocal é uma variável determinante na distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície impactada. Pequenas variações no ângulo de incidência do fluxo podem modificar significativamente os padrões de escoamento, afetando diretamente a eficiência da remoção de partículas e a intensidade da tensão cisalhante.

Segundo Anglani *et al.* (2018), a configuração angular do bocal influencia a formação de estruturas de vórtice e a dissipação da energia do escoamento, impactando o transporte e a remoção de partículas aderidas. O autor destaca que o ângulo de incidência afeta diretamente o desenvolvimento da camada limite, a distribuição da tensão de cisalhamento e a força de arraste exercida sobre partículas depositadas em superfícies, especialmente em aplicações de limpeza de refletores solares térmicos.

Figura 25 – Resultados da distribuição da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 2.

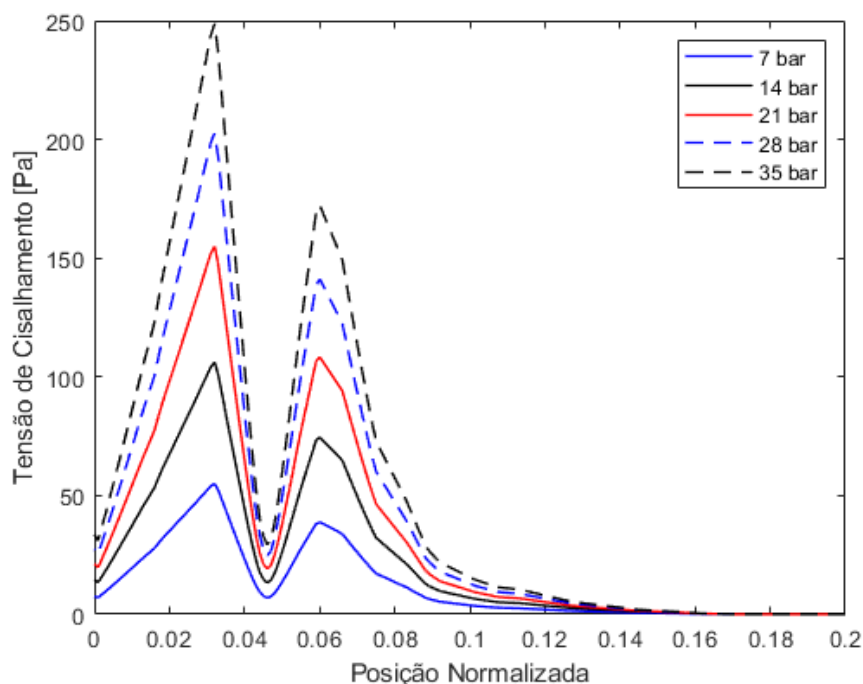
Fonte: Autor.

Conforme a distribuição da tensão de cisalhamento para a geometria 2 (Figura 25), observam-se dois picos de tensão de cisalhamento: um menor em torno da posição 0,07 e outro mais acentuado logo após a posição 0,11.

Figura 26 – Resultados da distribuição da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 3.

Fonte: Autor.

Conforme o gráfico apresentado para a geometria 3 (Figura 26), observa-se um pico de tensão de cisalhamento entre as posições de 0,1 e 0,2; nota-se, também, um achatamento da curva com mais valores próximos à tensão máxima.

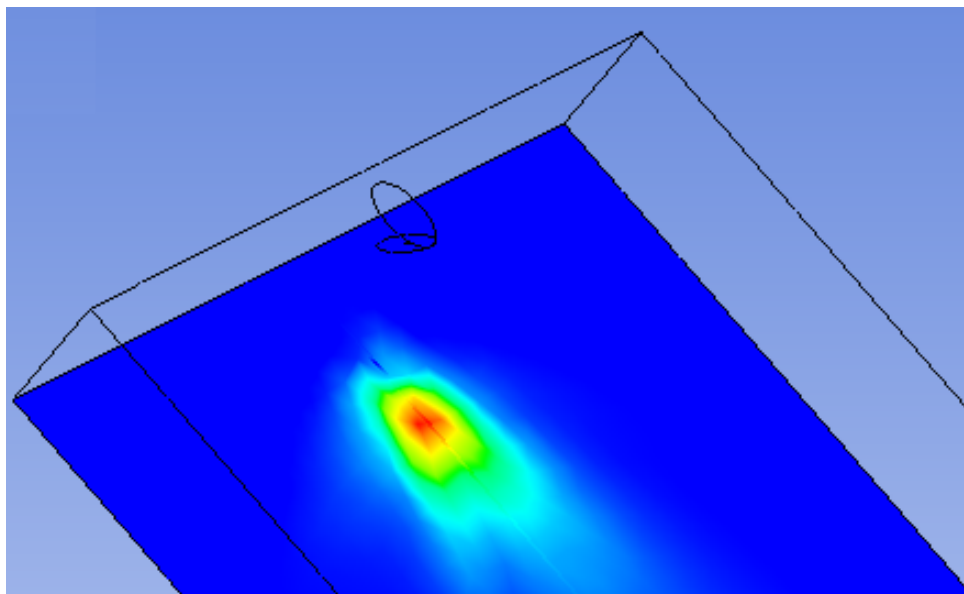
Figura 27 – Resultados da distribuição da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1.

Fonte: Autor.

Conforme o gráfico apresentado para a geometria 1 (Figura 27), observam-se dois picos de tensão de cisalhamento: um menor em torno da posição 0,04 e outro mais acentuado logo após a posição 0,06. Este comportamento indica que a tensão de cisalhamento foi focada onde o painel está recebendo o jato de água pressurizada.

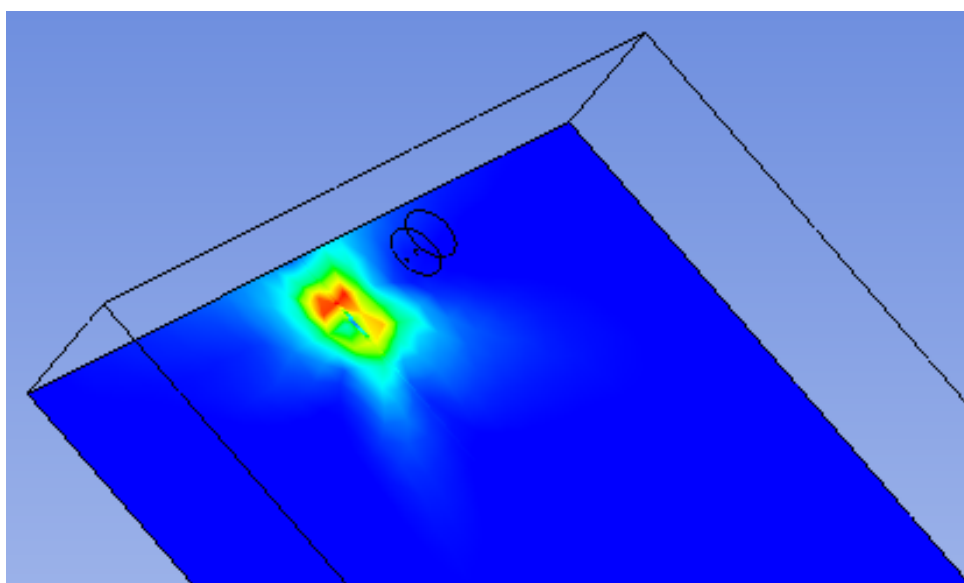
Para a melhor visualização da distribuição da tensão de cisalhamento na superfície do painel, foram geradas as Figura 28-31. Dessa forma, pode-se observar a influência da inclinação na distribuição espacial da tensão de cisalhamento na região de incidência.

Figura 28 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 2 com 21 bar.



Fonte: Autor.

Figura 29 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1 com 21 bar.

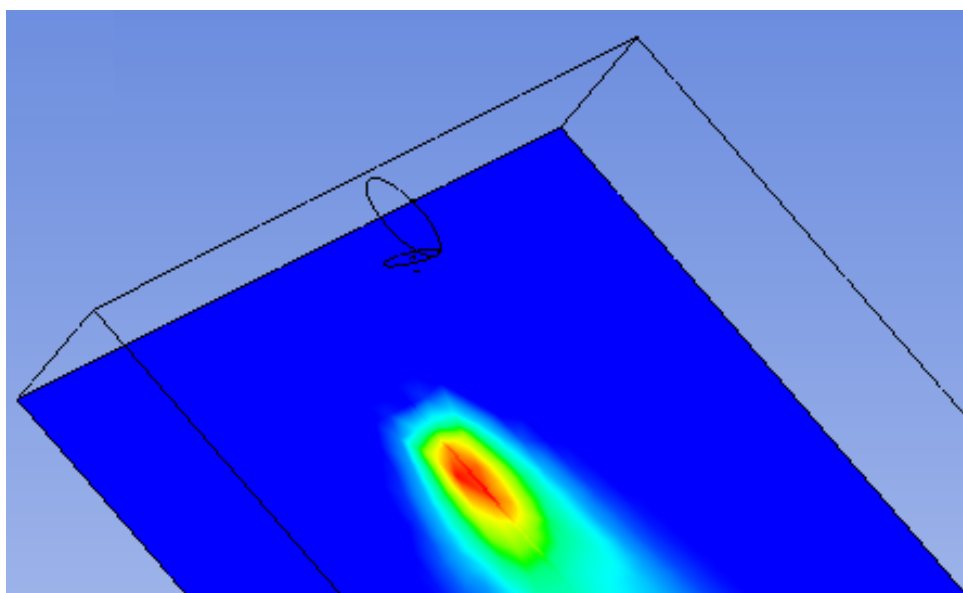


Fonte: Autor.

Um exemplo do comportamento descrito pode ser observado na Figura 28. Na geometria 2, onde o bocal está inclinado em um ângulo de 135° graus, a distribuição da tensão de cisalhamento apresenta características distintas das verificadas na Figura 29. Na geometria 1, onde o bocal possui um ângulo de 90° , os picos de tensão de cisalhamento atingem valores superiores aos registrados na geometria 2. Entretanto, nota-se que, nesse caso, a tensão se concentra predominantemente na região inicial do

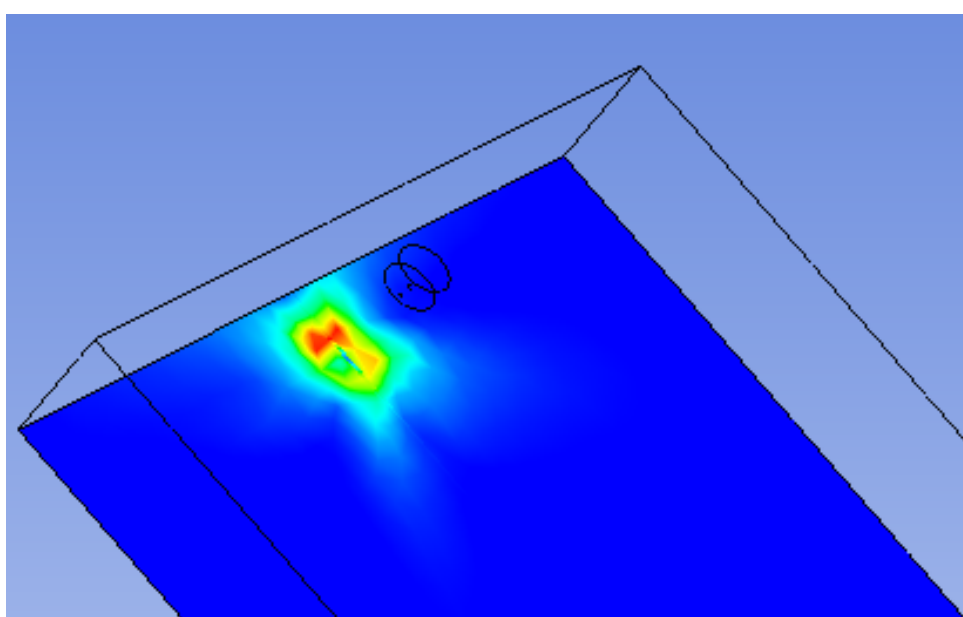
painel, próximo ao ponto de impacto do jato, sem promover um arraste eficiente ao longo da superfície. Em contraste, na geometria 2, a inclinação do bocal favorece um melhor direcionamento do escoamento, resultando em uma distribuição mais eficiente da tensão de cisalhamento ao longo do painel, o que contribui para um maior deslocamento das partículas aderidas.

Figura 30 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 3 com 35 bar.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Resultados do impacto da tensão de cisalhamento - simulação para a geometria 1 com 35 bar.



Fonte: Autor.

Outro exemplo relevante pode ser observado nas simulações para uma pressão de operação de 35 bar nas geometrias 3 e 1, representadas, respectivamente, nas Figuras 30 e 31. A análise dos resultados indica que, na geometria 3, a distribuição da tensão de cisalhamento ocorre de forma mais prolongada ao longo da superfície do painel, favorecendo um maior arraste das partículas aderidas. Em contraste, na geometria 1, a tensão de cisalhamento se concentra predominantemente na região inicial do painel, próximo ao ponto de impacto do jato, sem se propagar de maneira significativa ao longo da superfície.

Os gráficos apresentados nesta seção indicam que a inclinação do bocal influencia diretamente a magnitude e a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da superfície. Observa-se que, para inclinações mais acentuadas, a máxima tensão de cisalhamento ocorre em regiões mais afastadas do centro, resultando na formação de uma região (e não um pico) de alta pressão. Esse comportamento é atribuído à mudança na direção do vetor de impacto do jato, que altera a forma como a energia do fluxo se dissipa na superfície.

Dessa forma, a escolha da geometria ideal depende do objetivo desejado. Caso se busque alcançar a melhor pressão possível, a geometria 2 se mostra a mais adequada, pois atinge picos de pressão mais elevados, favorecendo a remoção localizada de partículas. Por outro lado, se o foco for a distribuição mais homogênea da tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, uma maior eficiência na remoção de partículas ao longo de todo o módulo, a geometria 3 é a mais indicada, uma vez que proporciona uma melhor propagação da tensão pela superfície. Em contraste, a geometria 1 se torna inviável para a remoção eficiente, pois concentra a tensão de cisalhamento apenas na região inicial do impacto do jato, sem uma adequada distribuição ao longo do módulo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste trabalho destacam a importância da remoção da sujeira acumulada sobre os módulos fotovoltaicos para otimizar a eficiência energética dos sistemas solares. As simulações numéricas demonstraram que diferentes configurações de pressão e inclinação dos bocais influenciam significativamente a distribuição da tensão de cisalhamento, afetando diretamente a eficiência da remoção de partículas aderidas.

Dentre as geometrias testadas, a Geometria 3, com inclinação do bocal em 145° , apresentou os melhores resultados em termos de eficiência na remoção de partículas, apesar de gerar picos de tensão de cisalhamento menores que a Geometria 1, com inclinação de 90° . O diferencial desta configuração está no arraste prolongado das partículas ao longo da superfície do painel, garantindo uma remoção mais eficiente e homogênea. A distribuição da tensão de cisalhamento na Geometria 3 se mostrou mais ampla, cobrindo uma área maior e promovendo um deslocamento mais efetivo das impurezas sobre o módulo fotovoltaico.

Os resultados das simulações reforçam a viabilidade do uso de jatos de água pressurizados como uma solução eficiente para a limpeza automatizada de módulos fotovoltaicos. A análise comparativa entre as diferentes geometrias evidenciou que a influência direta na inclinação do bocal na eficiência do processo, afetando a dispersão das partículas sobre a superfície do painel. O uso de um ângulo de 145° permitiu uma melhor distribuição da tensão de cisalhamento, maximizando o efeito de arraste e resultando em uma limpeza mais eficaz sem a necessidade de aplicar pressões excessivamente elevadas.

5.1 Proposta de um Sistema de Limpeza Automatizado

Diante da necessidade de manter os painéis fotovoltaicos limpos para garantir a máxima eficiência na conversão da radiação solar em energia elétrica, sugere-se, para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um Sistema de Limpeza Automatizado baseado na aplicação de jatos de água otimizados, conforme discutido nos estudos de Anglani et al. (2015). Essa abordagem poderia envolver a instalação de bocais acoplados diretamente nos módulos fotovoltaicos, permitindo a remoção contínua ou programada da sujeira sem a necessidade de intervenção manual.

O sistema proposto contaria com bocais hidráulicos estrategicamente posicionados sobre a superfície dos painéis solares, responsáveis por expelir jatos de água sob pressão controlada. Parâmetros críticos, como ângulo de impacto e pressão do fluido, seriam ajustados com base em simulações de CFD, nas quais a tensão de cisalhamento – principal parâmetro para remoção de partículas – seria avaliada para

diferentes inclinações e pressões de saída dos bocais.

Além disso, a automação do sistema poderia ser integrada ao monitoramento da usina, permitindo que o responsável pela Operação e Manutenção ativasse o mecanismo de limpeza quando detectasse perda de eficiência nos gráficos de potência ativa. Assim, o jato de água seria liberado conforme necessário, removendo a sujeira acumulada sem exigir o desligamento do sistema de geração.

A implementação desse sistema contribuiria para a otimização da manutenção dos sistemas fotovoltaicos, aumentando a eficiência energética e reduzindo custos operacionais.

Uma outra sugestão para trabalhos futuros é a aplicação dos valores e parâmetros otimizados nas simulações presentes neste trabalho a um painel inteiro, conforme as especificações do *datasheet* do módulo fotovoltaico utilizado. Essa abordagem permitirá validar a eficácia da solução em um ambiente mais próximo ao real, considerando a interação entre múltiplos jatos de limpeza e a uniformidade da remoção de sujeira ao longo de toda a superfície do painel. Esse estudo possibilitaria um dimensionamento mais preciso da quantidade de água necessária, do tempo ideal de limpeza e da frequência de acionamento do sistema.

Por fim, futuros estudos podem aprofundar a interação entre a pressão do jato e diferentes tipos de sujeira, como poeira fina, resíduos orgânicos e detritos de poluição industrial, considerando variações climáticas e ambientais. Isso ajudaria a definir parâmetros mais específicos para diferentes contextos de aplicação, garantindo a adaptação do sistema de limpeza a diferentes regiões e condições meteorológicas.

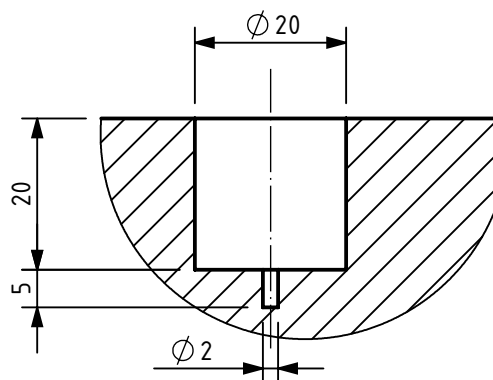
Dessa forma, este trabalho abre caminho para novas investigações no campo da manutenção de módulos fotovoltaicos, visando à criação de soluções automatizadas, eficientes e economicamente viáveis para o setor de energia solar.

REFERÊNCIAS

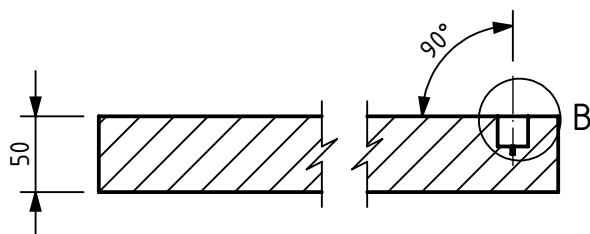
- ABSOLAR. *Potencial Solar Brasileiro*. 2024. Acesso em: 10 de dez. 2024. Disponível em: <https://absolar.org.br>. 16
- ANGLANI, N. Cfd modelling of cleaning systems in solar panels. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2015. 19, 20
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. 16
- ENERGYSHOP. *Capítulo 1: Fundamentos da Energia Solar*. 2023. Acesso em: 20 nov. 2024. Disponível em: <https://blog.energyshop.com.br/capitulo-1-fundamentos-da-energia-solar>. 16
- GUHA, A.; BARRON, R. A.; BALACHANDAR, R. An experimental and numerical study of water jet cleaning process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 211, p. 610–2618, 2011. 39
- HUDEMNI, M. G. *et al.* A comparative study of dust cleaning methods for the solar pv panels. *Advanced Journal of Graduate Research*, v. 1, n. 1, p. 24–29, 2017. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.21467/ajgr.1.1.24-29>. 20
- IFSUL. *Fundamentos de energias solar fotovoltaica*. 2023. Acesso em: 23 nov. 2024. Disponível em: https://moodle.passofundo.ifsul.edu.br/pluginfile.php/110770/mod_resource/content/0/FUNDAMENTOS%20DE%20ENERGIAS%20SOLAR%20FOTOVOLTAICA%20-%20V.pdf. 16
- MENG, P. *et al.* Cleaning with high-pressure directed waterjets. *Proceedings of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, p. 1131–1138, 1996. 40
- OLORUNFEMI, B.; OGBOLUMANI, O.; NWULU, N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: A systematic review on smart systems. *Sustainability*, v. 14, n. 17, p. 10920, 2022. 12, 17, 20
- USP. *Apostila sobre energia solar*. 2023. Acesso em: 20 nov. 2024. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. 16
- VACHON, N. M. *A Bound Vortex Surface Impingement Method for Adhered Dust Particle Removal*. Dissertação (Master's Thesis) — University of Vermont, 2010. Disponível em: <https://scholarworks.uvm.edu/graddis/233>. 35, 36
- YOUNG, R. M.; HARGATHER, M. J.; SETTLES, G. S. Shear stress and particle removal measurements of a round turbulent air jet impinging normally upon a planar wall. *Journal of Aerosol Science*, Elsevier, v. 62, p. 15–25, 2013. 34

APÊNDICES

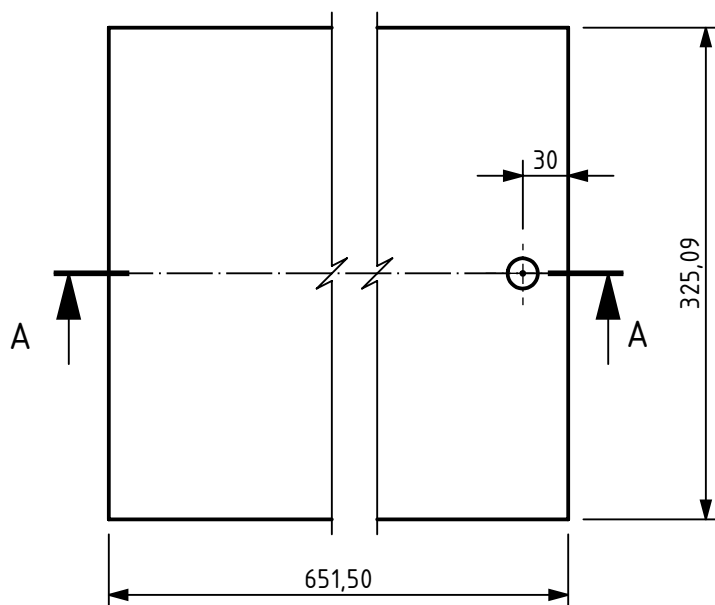
APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS



DETALHE B (1 : 1)



CORTE A-A



Título:

Modelo de simulação

Observação:

Bocal 90°

Projetista:

Rafaela

Desenhista:

Rafaela

Responsável técnico:

Nome resp. técnico

Verificação:

Prof Francisco

Aprovação:

Prof Francisco

Revisão:

00

Escala:

1:5

Folha:

1/3

Emissão inicial:

01/01/2000

Tipo de documento:

Tipo

Autor:

Rafaela

Identificação

Turma+Nº

Revisão:

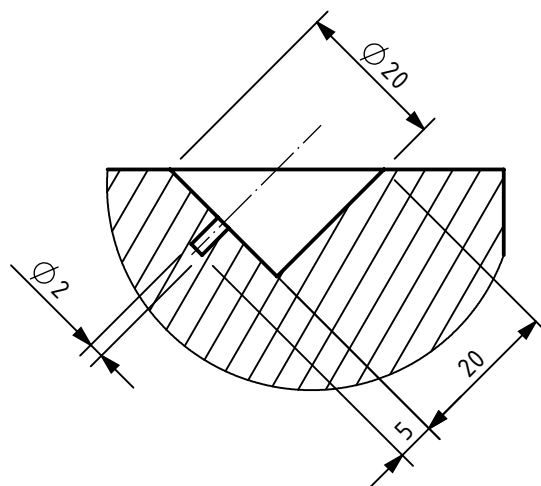
00

Escala:

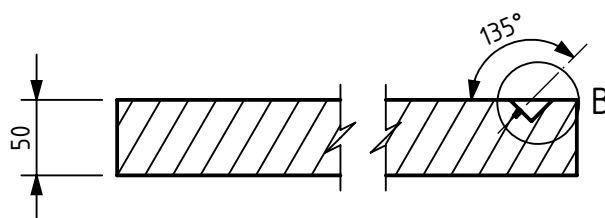
1:5

Folha:

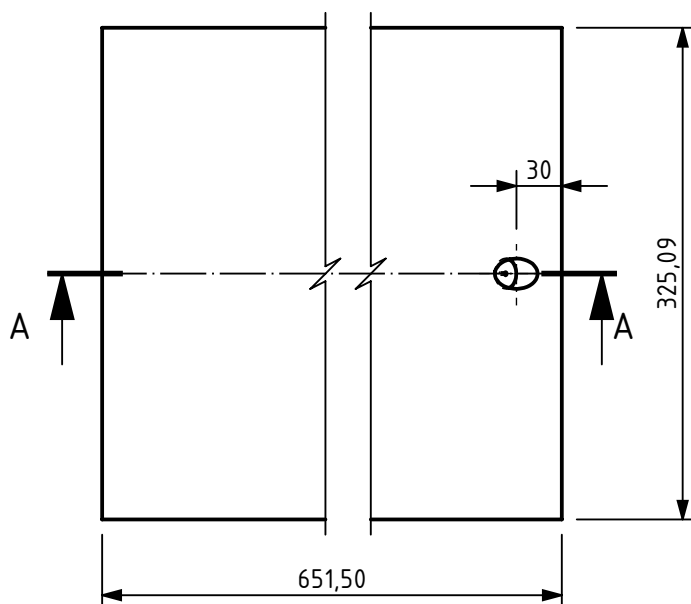
1/3



DETALHE B (1 : 1)



CORTE A-A



Título:

Modelo de simulação

Observação:

Bocal 135°

Projetista:

Rafaela

Desenhista:

Rafaela

Responsável técnico:

Nome resp. técnico

Verificação:

Prof Francisco

Aprovação:

Prof Francisco

Habilitação

Nº do Registro

Emissão inicial:

01/01/2000

Tipo de documento:

Tipo

Autor:

Rafaela

Identificação

Turma+Nº

Revisão:

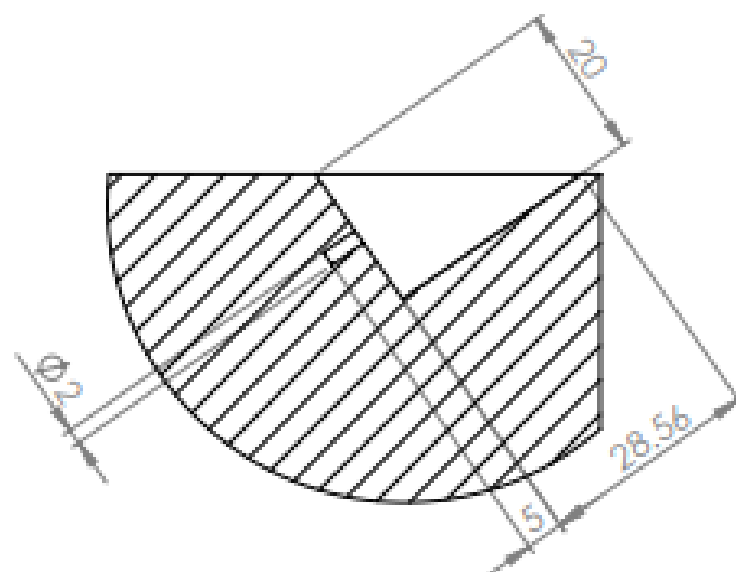
00

Escala:

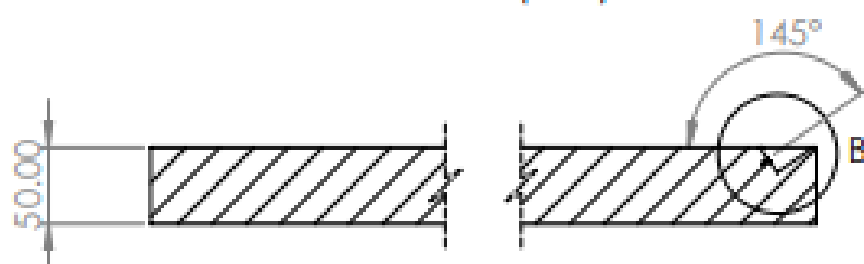
1:5

Folha:

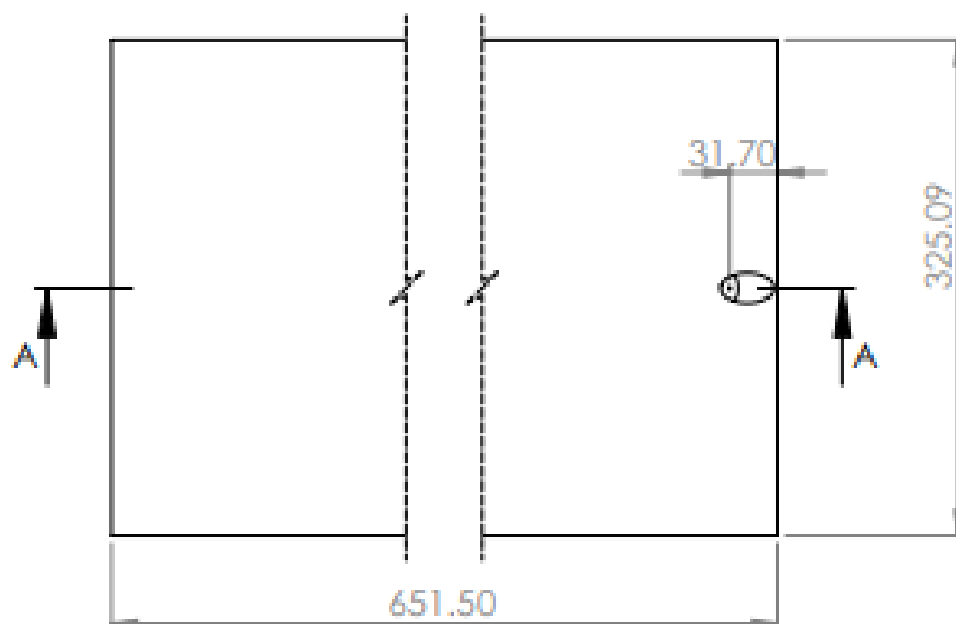
2/3



DETALHE B (1 : 1)



CORTE A-A



Título:

Modelo de simulação

Observação:

Bocal 145°

Projeta:

Rafaela

Desenha:

Rafaela

Responsável Técnico:

Nome resp. técnico

Verificação:

Prof Francisco

Aprovação:

Prof Francisco

Habilitação

Nº de Registro

Emissão inicial:

01/01/2000

Tipo de documento:

Tipo

Assin:

Rafaela

Identificação

Turma+Nº

Revisão:

00

Escala:

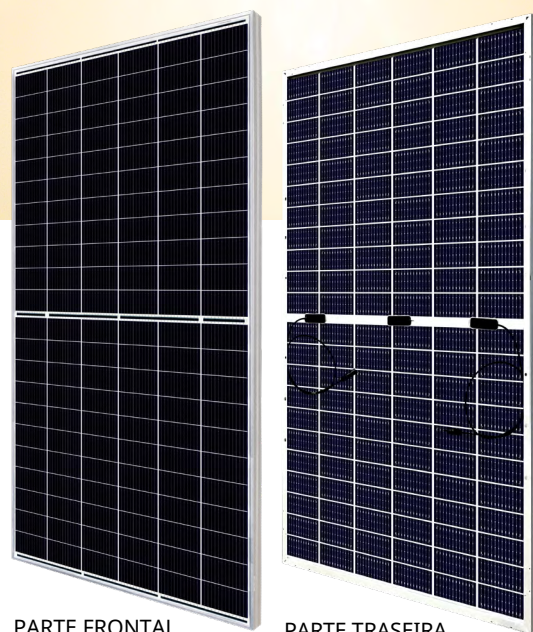
1:5

Folha:

1/3

ANEXOS

ANEXO A – *Datasheet* DO MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZADO



PARTE FRONTAL

PARTE TRASEIRA

BiHiKu7

BIFACIAL MONO PERC

640 W ~ 670 W

CS7N-640 | 645 | 650 | 655 | 660 | 665 | 670MB-AG

MAIS PODER



Potência do módulo até 670 W
Eficiência do módulo até 21,6%



LCOE até 8,9% menor
Custo do sistema até 4,6% menor



Tecnologia de mitigação LID / LeTID abrangente,
degradação até 50% menor



Compatível com rastreadores convencionais,
produto econômico para usinas de energia elétrica



Melhor tolerância de sombreamento

MAIS CONFIÁVEL



Temperatura de ponto quente 40 °C
mais baixa, reduz bastante a taxa
de falha do módulo



Minimiza impactos de microfissuras



Carga de neve pesada até 5400
Pa, carga de vento até 2400 Pa*



Garantia de Fabricação*



Garantia de Desempenho de Energia Linear*

Degradação de energia no 1º ano não superior a 2%

Degradação de energia anual subsequente não superior a 0,45%

*De acordo com a Declaração de Garantia Limitada da Canadian Solar aplicável.

CERTIFICADOS DE SISTEMA DE GESTÃO*

ISO 9001:2015 / Sistema de gestão da qualidade
ISO 14001:2015 / Normas para sistema de gestão ambiental
ISO 45001: 2018 / Normas internacionais de saúde e segurança ocupacional

CERTIFICADOS DE PRODUTO*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO / MCS / UKCA
CEC listado (EUA Califórnia) / FSEC (EUA Flórida)
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716 / IEC 60068-2-68
Take-e-way



* Os certificados específicos aplicáveis a diferentes tipos de módulos e mercados variam e, portanto, nem todas as certificações listadas aqui serão aplicadas simultaneamente aos produtos que você solicitar ou usar. Entre em contato com o representante de vendas local da Canadian Solar para confirmar os certificados específicos disponíveis para o seu produto e aplicáveis nas regiões em que os produtos serão usados.

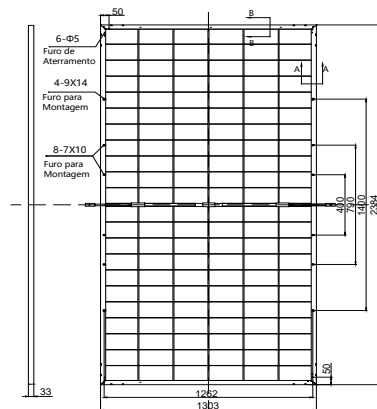
A **CSI Solar Co., Ltd.** está empenhada em fornecer módulos solares fotovoltaicos de alta qualidade, energia solar e soluções de armazenamento de bateria para os clientes. A empresa foi reconhecida como a fornecedora de módulos nº 1 em qualidade e relação desempenho/preço na Pesquisa de percepção do cliente do módulo IHS. Nos últimos 20 anos, entregou com sucesso mais de 70 GW de módulos solares de qualidade premium em todo o mundo.

* Para informações detalhadas, consulte o Manual de Instalação.

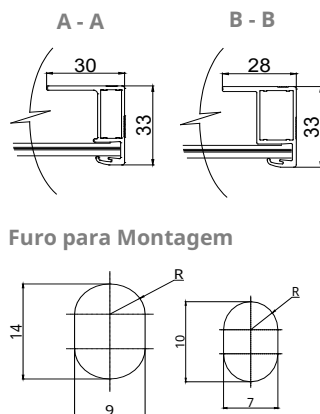
CSI Solar Co., Ltd.

199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com

Vista traseira



Seção transversal da estrutura



		Nominal máx. Potência (Pmax)	Tensão Operacional (Vmp)	Corrente Operacional (Imp)	Tensão de Circuito Aberto (Voc)	Corrente de Circuito Curto (Isc)	Eficiência do módulo
CS7N-640MB-AG		640 W	37,5 V	17,07 A	44,6 V	18,31 A	20,6%
Ganho Bifacial**	5%	672 W	37,5 V	17,92 A	44,6 V	19,23 A	21,6%
	10%	704 W	37,5 V	18,78 A	44,6 V	20,14 A	22,7%
	20%	768 W	37,5 V	20,48 A	44,6 V	21,97 A	24,7%
CS7N-645MB-AG		645 W	37,7 V	17,11 A	44,8 V	18,35 A	20,8%
Ganho Bifacial**	5%	677 W	37,7 V	17,97 A	44,8 V	19,27 A	21,8%
	10%	710 W	37,7 V	18,84 A	44,8 V	20,19 A	22,9%
	20%	774 W	37,7 V	20,53 A	44,8 V	22,02 A	24,9%
CS7N-650MB-AG		650 W	37,9 V	17,16 A	45,0 V	18,39 A	20,9%
Ganho Bifacial**	5%	683 W	37,9 V	18,03 A	45,0 V	19,31 A	22,0%
	10%	715 W	37,9 V	18,88 A	45,0 V	20,23 A	23,0%
	20%	780 W	37,9 V	20,59 A	45,0 V	22,07 A	25,1%
CS7N-655MB-AG		655 W	38,1 V	17,20 A	45,2 V	18,43 A	21,1%
Ganho Bifacial**	5%	688 W	38,1 V	18,06 A	45,2 V	19,35 A	22,1%
	10%	721 W	38,1 V	18,93 A	45,2 V	20,27 A	23,2%
	20%	786 W	38,1 V	20,64 A	45,2 V	22,12 A	25,3%
CS7N-660MB-AG		660 W	38,3 V	17,24 A	45,4 V	18,47 A	21,2%
Ganho Bifacial**	5%	693 W	38,3 V	18,10 A	45,4 V	19,39 A	22,3%
	10%	726 W	38,3 V	18,96 A	45,4 V	20,32 A	23,4%
	20%	792 W	38,3 V	20,69 A	45,4 V	22,16 A	25,5%
CS7N-665MB-AG		665 W	38,5 V	17,28 A	45,6 V	18,51 A	21,4%
Ganho Bifacial**	5%	698 W	38,5 V	18,14 A	45,6 V	19,44 A	22,5%
	10%	732 W	38,5 V	19,02 A	45,6 V	20,36 A	23,6%
	20%	798 W	38,5 V	20,74 A	45,6 V	22,21 A	25,7%
CS7N-670MB-AG		670 W	38,7 V	17,32 A	45,8 V	18,55 A	21,6%
Ganho Bifacial**	5%	704 W	38,7 V	18,20 A	45,8 V	19,48 A	22,7%
	10%	737 W	38,7 V	19,05 A	45,8 V	20,41 A	23,7%
	20%	804 W	38,7 V	20,78 A	45,8 V	22,26 A	25,9%

**** Ganho Bifacial:** O ganho adicional do lado traseiro em comparação com a potência do lado frontal na condição de teste padrão. Depende da montagem (estrutura, altura, ângulo de inclinação etc.) e albedo do solo.

Temperatura Operacional	-40°C a +85°C
Tensão máx. do sistema	1500 V (IEC/UL) ou 1000 V (IEC/UL)
Desempenho de Incêndio do Módulo	TIPO 29 (UL 61730) ou CLASSE C (IEC61730)
Classificação máx. do fusível em série	35 A
Classificação do aplicativo	Classe A
Tolerância de energia	0 ~ + 10 W
Poder Bifacialidade*	70 %

* * As especificações e os principais recursos contidos nesta folha de dados podem diferir ligeiramente de nossos produtos reais devido à inovação contínua e aprimoramento do produto. A CSI Solar Co., Ltd. reserva-se o direito de fazer os ajustes necessários às informações aqui descritas a qualquer momento sem aviso prévio.

Informamos que os módulos fotovoltaicos devem ser manuseados e instalados por pessoas qualificadas com habilidades profissionais e recomendamos a leitura atenta das instruções de segurança e instalação antes de usar nossos módulos fotovoltaicos.

	Nominal máx. Potência (Pmax)	Tensão Operacional (Vmp)	Corrente Operacional (Imp)	Tensão de Circuito Aberto (Voc)	Corrente de Circuito Curto (Isc)
CS7N-640MB-AG	480 W	35,2 V	13,64 A	42,2 V	14,77 A
CS7N-645MB-AG	484 W	35,3 V	13,72 A	42,3 V	14,80 A
CS7N-650MB-AG	487 W	35,5 V	13,74 A	42,5 V	14,83 A
CS7N-655MB-AG	491 W	35,7 V	13,76 A	42,7 V	14,86 A
CS7N-660MB-AG	495 W	35,9 V	13,79 A	42,9 V	14,89 A
CS7N-665MB-AG	499 W	36,1 V	13,83 A	43,1 V	14,93 A
CS7N-670MB-AG	502 W	36,3 V	13,85 A	43,3 V	14,96 A

* Sob temperatura nominal de operação do módulo (NMOT), irradiância de 800 W/m², espectro AM 1.5, temperatura ambiente 20°C, velocidade do vento 1 m/s.

Especificação	Dados
Tipo de célula	Monocristalina
Arranjo de célula	132 [2 x (11 x 6)]
Dimensões	2384 x 1303 x 33 mm (93,9 x 51,3 x 1,30 pol.)
Peso	37,8 kg (83,3 lbs.)
Vidro Frontal	Vidro reforçado termicamente de 2,0 mm com revestimento antirreflexo
Vidro Traseiro	Vidro reforçado com calor de 2,0 mm
Estrutura	Liga de alumínio anodizado
Caixa de derivação	IP68, 3 diodos de desvio
Cabo	4,0 mm ² (IEC), 10 AWG (UL)
Comprimento do cabo (incluindo conector)	460 mm (18,1 pol) (+) / 340 mm (13,4 pol) (-) ou comprimento personalizado*
Conector	T6 ou MC4-EVO2 ou MC4-EVO2A
Por palete	33 peças
Por Contêiner (40' QG)	594 peças ou 462 peças (somente para os EUA)

* Para obter informações detalhadas, entre em contato com os representantes técnicos e de vendas locais da Canadian Solar.

Especificação	Dados
Coeficiente de temperatura (Pmax)	-0.34 % / °C
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0.26 % / °C
Coeficiente de temperatura (Isc)	0.05 % / °C
Temperatura nominal de operação do módulo	41 ± 3°C

SEÇÃO DO PARCEIRO

