

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
ARREFECIDOS POR SUPERFÍCIES ESTENDIDAS

por

Pedro Henrique Franco Fratucci

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Fratucci, Pedro Henrique

Avaliação da potência elétrica gerada em módulos fotovoltaicos arrefecidos por superfícies estendidas / Pedro Henrique Fratucci. -- 2019.

23 f.

Orientador: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Potência em módulos fotovoltaicos. 2. Temperatura em módulos fotovoltaicos. 3. Arrefecimento por superfícies estendidas. 4. Simulação computacional. I. Jenisch Rodrigues, Leticia, orient. II. Título.

Pedro Henrique Franco Fratucci

AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
ARREFECIDOS POR SUPERFÍCIES ESTENDIDAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof^a. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha orientadora, Professora Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, pela disponibilidade e atenção desde o primeiro encontro e principalmente pelo apoio em momentos que percalços surgiram, sempre me direcionando e incentivando à solucioná-los.

Agradeço à minha mãe, Ozana, e ao meu pai, Waldir, por me escutarem e apoiarem psicologicamente sempre quando algo não resultava em uma forma esperada, tanto durante a elaboração deste trabalho quanto ao longo da vida.

A todos meus amigos, que, indiretamente, tornam meus dias mais iluminados e assim ajudando a deixar de lado a apreensão gerada na elaboração deste trabalho. E principalmente ao Alohan, Ana Luiza, Gabriela e Pedro que não hesitaram em ajudar tecnicamente durante esta jornada quando mais precisei de ajuda.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA EM MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS ARREFECIDOS POR SUPERFÍCIES ESTENDIDAS

Pedro Henrique Franco Fratucci

pedrofratucci8@hotmail.com

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo a análise da variação da potência elétrica gerada e da temperatura média de módulos solares fotovoltaicos arrefecidos por superfícies estendidas, instalados em vãos de prédios com fachada dupla. Essa análise é feita a partir da simulação (ANSYS Fluent) de um modelo, variando-se sua geometria – mantendo-se o custo de projeto - e alterando-se também o valor de irradiância incidente. A finalidade dessas alterações é variar a temperatura de operação do módulo e, conseqüentemente, variar a potência elétrica gerada. Ao longo deste trabalho são propostos diversos casos e cenários de operação. Em um primeiro momento, varia-se a geometria das aletas, a partir de um sistema original, e, posteriormente, o valor da irradiância incidente sobre o módulo FV. Com isso busca-se determinar a configuração que resulta na maior potência gerada pela conversão de energia solar em energia elétrica. Para o caso que apresenta a maior potência elétrica gerada, tem-se o valor equivalente a 121,41% superior ao caso original (modelo). Entretanto, esse ganho de potência é referente apenas ao aumento da irradiância incidente sobre o módulo, sendo 1,40% o melhor ganho de potência para os casos com apenas a alteração das geometrias das aletas. Dessa forma, o cuidado no projeto e instalação de módulos fotovoltaicos em edifícios mostra-se fundamental para o sistema, a fim de aumentar a irradiância incidente e, conseqüentemente, a potência elétrica gerada.*

Palavras-chave: *Potência de módulos fotovoltaicos, temperatura de módulos fotovoltaicos, arrefecimento por superfícies estendidas, simulação computacional em ANSYS Fluent*

Abstract. *This present paper has the purpose to analyze the variation of electric power and the average temperature of photovoltaic solar modules cooled by extended surfaces, installed in double-façade building spans. This will be achieved through a computational simulation (using ANSYS Fluent) of the prototype, modifying its geometry – maintaining the project costs – and also changing the incident irradiance value. The aim of these amendments is to vary the operation temperature of the module and, as a consequence, vary the generated power. Throughout this paper miscellaneous arrangements and scenarios of operation are proposed. At first moment, vaying the geometry of the fin, from the original arrangement, and subsequently varying the irradiance value incident over the module PV. It pursues to determinate the configuration that results in the greatest power generated by converting solar energy into electrical energy. For the case that presents the greatest electric power generated, the value is 121,41% higher than the original instance. However, this power improvement refers only to the increase of the irradiance incident on the module, being 1,40% the best gain for cases with alteration of the fin geometry. Therefore, the attention at the project and installation of photovoltaic modules in buildings becomes fundamental to the system, in order to increase the incident irradiance and, consequently, the electric power generated.*

Keywords: *Photovoltaic module power, photovoltaic module temperature, cooling by extended surfaces, computational simulation in ANSYS Fluent*

1. INTRODUÇÃO

O final do século XX presenciou o crescimento da consciência da sociedade em relação à degradação do meio ambiente decorrente do processo de desenvolvimento. O aprofundamento da crise ambiental, juntamente com a reflexão sistemática sobre a influência da sociedade neste processo, conduziu a um novo conceito - o de desenvolvimento sustentável (BELLEN, 2004). Com esse conceito em vista, a necessidade da busca por fontes de “energia limpa” e renovável obteve maior interesse e incentivo. Dentre os principais interesses têm-se a procura pela redução de custo e redução do impacto ambiental, a partir, por exemplo, da utilização da energia de biomassa, solar e eólica.

Com relação à energia solar, destaca-se a utilização de painéis solares fotovoltaicos para a captação de energia. De acordo com Brito e Silva (2006), um painel solar é constituído por um conjunto de módulos fotovoltaicos, que por sua vez, são compostos pelo arranjo de diversas células fotovoltaicas em série. A conversão da radiação solar térmica em energia elétrica se dá a partir do efeito fotovoltaico. A característica mais importante dos módulos FV é a eficiência na conversão de energia. Ou seja, a razão entre a quantidade de energia solar que é transformada em energia elétrica e a quantidade de energia solar total incidente (POPOVICI *et al.*, 2015). A irradiância incidente sobre o módulo varia conforme a latitude e condições climáticas do local. Não obstante, a orientação e a inclinação do módulo FV são essenciais para os projetos de sistemas fotovoltaicos (VANEK *et al.*, 2012).

Borkar *et al.* (2014) simularam e avaliaram experimentalmente a implementação de chapas de cobre, acrílico e silicone sobre a face posterior de um módulo FV, as quais atuavam como dissipadores de calor. A partir desse trabalho, os autores verificaram que a redução da temperatura média do módulo levava ao aumento da eficiência do mesmo, conforme esperado. Vanek *et al.* (2012) demonstraram que o aumento da temperatura média dos módulos causa um pequeno aumento na corrente entre as células FV, porém uma considerável redução na tensão e, conseqüentemente, a redução da potência elétrica gerada.

Segundo Popovici *et al.* (2015), é possível reduzir a temperatura média de operação de um módulo FV com a utilização de superfícies estendidas – aletas - na face posterior do mesmo. Neste caso, os autores analisaram a relação da variação da eficiência do módulo FV, relativa à variação do ângulo de base das aletas.

Elesbão (2017) simulou casos de módulos FV arrefecidos por superfícies estendidas, os quais seriam instalados entre o vão de prédios com fachada dupla. Nesse trabalho, foi analisada a variação da eficiência, relativa à alteração da quantidade e altura média das aletas. Foi avaliado, também, o custo e o benefício entre os casos simulados que, a partir de certa quantidade de volume de material de aletas utilizada, o acréscimo na potência elétrica gerada era cada vez menor, reduzindo o custo-benefício gerado pela utilização de superfícies estendidas.

Assim, o presente trabalho vem dar continuidade ao trabalho realizado por Elesbão (2017), visando avaliar a relação da variação da potência elétrica e da temperatura média de operação para diferentes geometrias de aletas, altura do vão entre as fachadas e valor de irradiância incidente. Sob mesmas condições climáticas, e quantidade de material de aletas, foram simuladas diferentes geometrias de superfícies estendidas. Assumiu-se que o módulo FV instalado sobre vãos de prédios com fachada dupla, onde o ar circula arrefecendo o mesmo e, conseqüentemente, reduzindo sua temperatura média de operação. As simulações foram realizadas nos softwares SOLIDWORKS (versão estudante) e ANSYS (versão 19).

2. CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo, apresenta-se os aspectos gerais de operação de um módulo fotovoltaico, desde o fenômeno que rege seu princípio de funcionamento até os fatores que influenciam sua eficiência.

2.1. O Efeito fotovoltaico

De acordo com Brito e Silva (2006), o efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmund Becquerel, o qual produziu uma corrente elétrica ao expor à luz dois eletrodos de prata imersos em um eletrólito. Este fenômeno permite que os fótons, advindos do Sol, ao entrarem em contato com certos materiais, induzam corrente elétrica nos mesmos.

Uma célula fotovoltaica simples consiste basicamente em um diodo de grande área e um substrato de material semicondutor onde é criado um campo elétrico interno. Quando a radiação atinge um átomo do semicondutor, esse libera um elétron que pode ser conduzido pelo campo elétrico, contribuindo, assim, para a corrente produzida pela célula FV. Segundo Twidell *et al.* (2006), células FV geram em média 0,5 V de tensão, com densidades de corrente elétrica de 400 A/m² para condições de céu limpo, com temperatura de operação do módulo de 25 °C e irradiância de 1000 W/m². Sendo esta condição nomeada de Condição Padrão de Teste (STC – *Standard Test Condition*).

2.2 Módulos fotovoltaicos

A potência máxima de uma única célula fotovoltaica não excede 2 W, o que é insuficiente para a maioria das aplicações. Por este motivo, as células são agrupadas em série, formando módulos FV (CASTRO, 2002). Tipicamente um módulo pode ser constituído por cerca de 33 a 36 células ligadas em série, devido à necessidade de carregar baterias de 12 V. Segundo Vanek *et al.* (2012) módulos com 36 células são capazes de gerar 140 Wp, havendo também modelos com 72 células que alcançam até 325 Wp. Sendo assim, é necessário um arranjo de diversos módulos - constituindo um painel solar FV - para tornar seu emprego viável nos casos que requerem alta demanda de energia.

A relativa baixa eficiência de conversão fotovoltaica das células solares é, por vezes, apresentada como uma das razões para a não implementação desse tipo de fonte de energia. Assim, existe uma constante procura por novos materiais para módulos FV que proporcionem o aumento da eficiência de conversão de energia (CASTRO, 2002). Porém, o levantamento da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) publicado em junho de 2019, mostra que o Brasil ultrapassou a marca histórica de 1 gigawatt de potência instalada em geração de energia distribuída. Em apenas dois anos, o número de instalações de sistemas fotovoltaicos, SFV, teve um aumento de mais de 560%, saltando de 7,4 mil unidades para 49 mil unidades.

2.3 Aplicação de superfícies estendidas em sistemas térmicos

Em qualquer aparelho, cujo funcionamento seja prejudicado pelo superaquecimento, uma solução prática, e muitas vezes de baixo custo, consiste na utilização de superfícies estendidas. Como exemplos de projetos que se utilizam de superfícies aletadas temos: microprocessadores, motores de geladeiras, e motores de motocicletas (BORGES *et al.*, 2016).

Na condição ideal, a condutividade térmica do material da aleta deveria ser infinita, de forma que toda a superfície da aleta estivesse na temperatura de sua base. Porém, isso é fisicamente impossível. Por isso, para minimizar a variação da temperatura ao longo de sua superfície, deve ser utilizado um material com condutividade térmica elevada como, por exemplo, o alumínio.

2.4 Variação da eficiência de módulos fotovoltaicos

A eficiência de conversão de energia solar radiante em energia elétrica de um módulo FV é influenciada por diversos fatores. Por exemplo, valor da irradiância incidente, material do semicondutor, número de células FV e temperatura de operação do módulo. De acordo com Vanek *et al.* (2012) a variação da temperatura de operação do módulo FV é um dos fatores mais importantes. O aumento da temperatura média dos módulos causa um pequeno aumento na corrente elétrica, entre as células. Por outro lado, gera uma considerável redução na tensão e, conseqüentemente, uma redução da potência elétrica gerada. Esses comportamentos estão exemplificados nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Ainda de acordo com Vanek *et al.* (2012), a principal alternativa para aumentar a eficiência do módulo FV é reduzir a temperatura de operação do módulo, Figura 3.

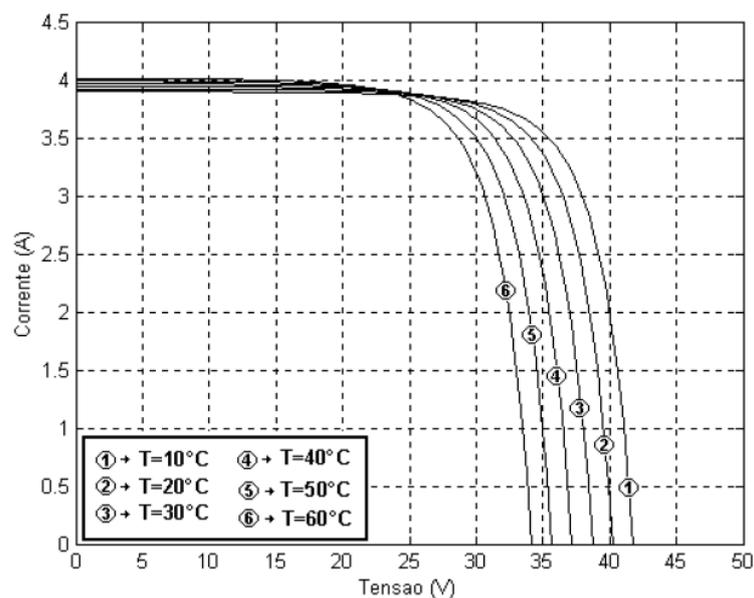


Figura 1 – Curvas características do módulo FV, variação com a temperatura. Corrente x Tensão. (de Alcântara, 2010).

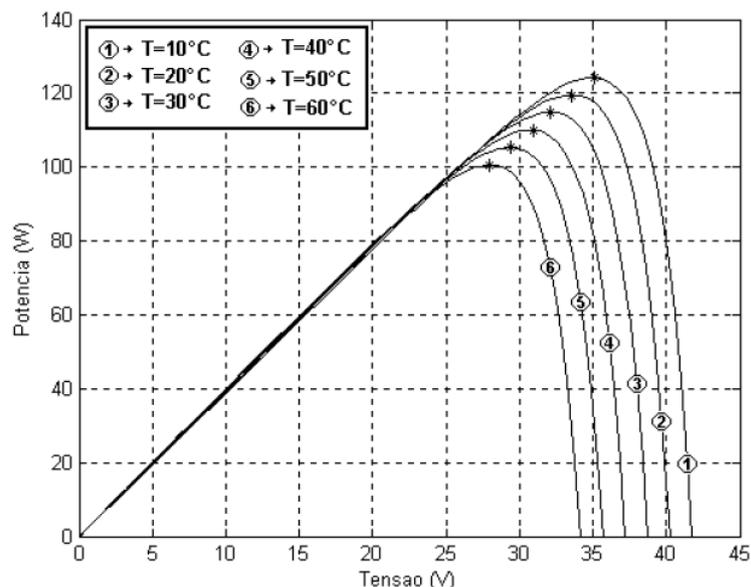


Figura 2 – Curvas características do módulo FV, variação com a temperatura. Potência x Tensão. Os símbolos (*) nas curvas indicam os pontos de máxima potência. (de Alcântara, 2010).

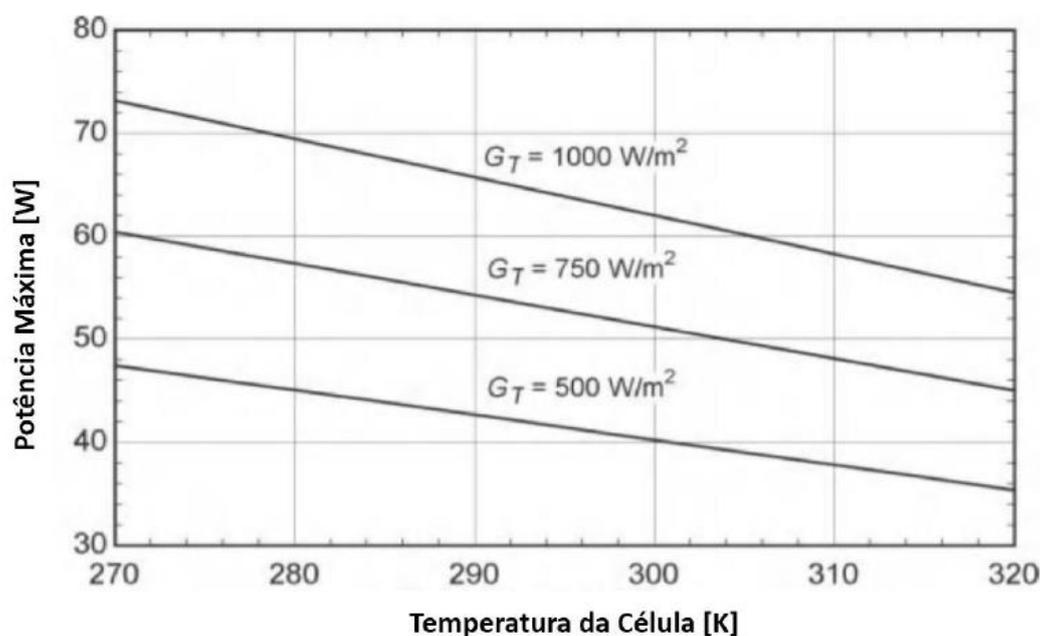


Figura 3 – Variação da potência máxima gerada em função da temperatura média das células FV para diferentes valores de irradiância incidente. (Duffie e Beckman, 2013).

Logo, o presente trabalho, tem como foco avaliar a variação da potência elétrica gerada, e da temperatura média, de um módulo FV arrefecido por superfícies estendidas. A partir de um modelo, originalmente sugerido por Elesbão (2017), foi realizada a alteração da geometria das aletas, mantendo sua quantidade de material – volume – e custo de projeto. O cálculo para custo de projeto, neste caso, leva em consideração apenas o volume de material, excluindo-se o custo de manufatura. Também foram avaliadas as variações da potência e temperatura média de operação para o aumento da irradiância. Ao mesmo tempo em que o aumento da magnitude da irradiância representa uma maior concentração de fótons incidentes sobre o módulo - aumentando assim a potência gerada -, o mesmo também aumenta a sua temperatura de operação, contribuindo para a redução da potência.

3. METODOLOGIA

3.1 O sistema estudado e suas propriedades

O sistema hipotético original encontra-se instalado no vão entre fachadas, de um edifício com fachada dupla. Esta configuração é comum em construções mais sofisticadas, cujo objetivo é a redução do ruído externo e da irradiação solar direta incidente (ELESBÃO, 2017). O modelo original, Figura 4, é constituído pelo módulo FV, com dimensões de 500 mm x 250 mm x 1 mm, por uma chapa de alumínio, de 500 mm x 250 mm x 2 mm, e por dezesseis aletas de alumínio, de 500 mm x 2 mm x 70 mm. As aletas são fixadas sobre a chapa e posicionadas equidistantes entre si. A circulação do ar é forçada, com o ar entrando pela base do vão do edifício e saindo na sua parte superior. Desta forma, cria-se o chamado efeito chaminé. Para a simulação do modelo original, foi considerado que o módulo estava instalado em um vão com extensão de 100 mm.

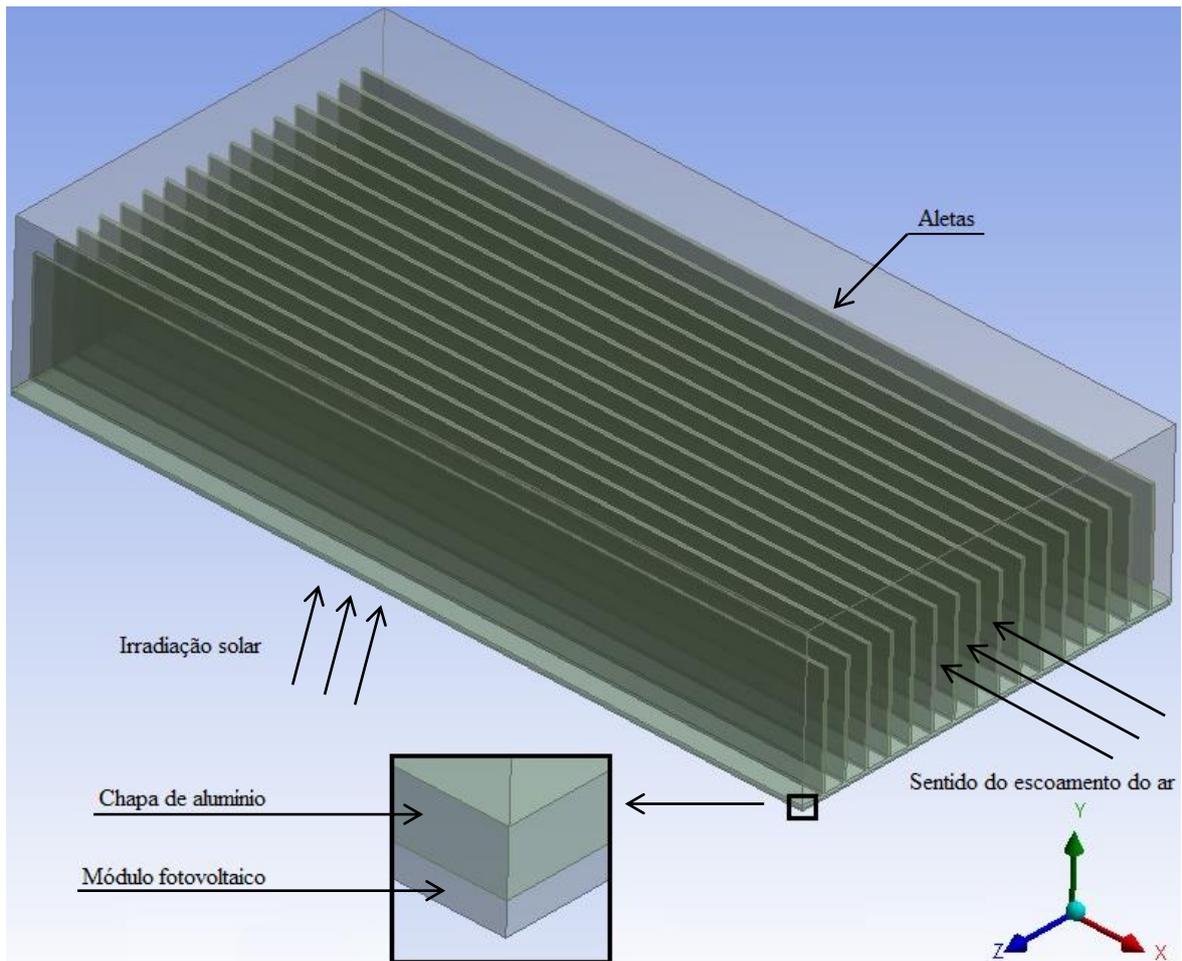


Figura 4 – Componentes do sistema do modelo original arrefecido por superfícies estendidas.

Com o propósito de aumentar a transferência de calor entre o módulo FV e o ar que escoa sobre as superfícies estendidas, foram propostas seis novas geometrias de aletas, mantendo-se o mesmo volume de material das aletas originais, conforme mostram as Figuras 5a e 5b.

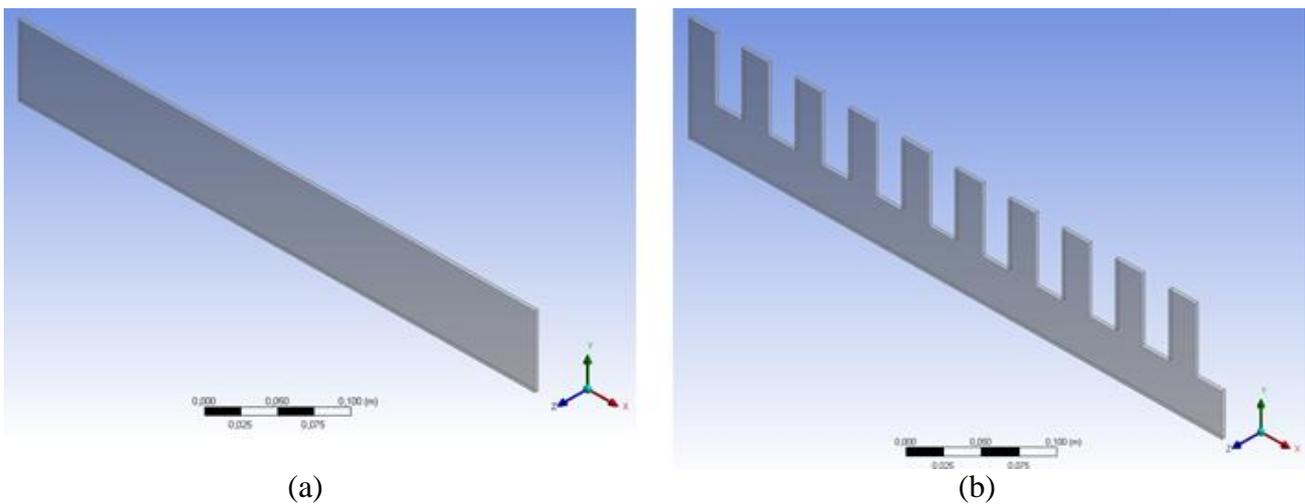


Figura 5 – (a) Aleta utilizada no caso original. Volume de $70 \times 10^3 \text{ mm}^3$; (b) Aleta utilizada no caso 4. Volume de $70 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

Os módulos fotovoltaicos, conforme Borkar *et al.* (2014), são produzidos geralmente com mais de duas camadas de materiais semicondutores. De acordo com Popovici *et al.* (2015), os principais materiais utilizados na confecção de módulos FV de silício, atualmente, são os seguintes: Vidro, cobertura antirreflexiva, células fotovoltaicas, etil vinil acetato (EVA) e fluoreto de polivinila (PVF). Seguindo a mesma simplificação adotada por Elesbão (2017) e por Popovici *et al.* (2015), foi considerado que o módulo FV é composto por apenas uma camada de material (células fotovoltaicas de silício). Conforme Popovic *et al.* (2015), essas células possuem as seguintes propriedades: massa específica de 2.300 kg/m^3 , condutividade térmica de 148 W/m K e calor específico de 677 J/kg K .

As Figuras 6 e 7 apresentam as dimensões dos componentes do sistema, sendo denominadas da seguinte forma: extensão do vão entre as fachadas, H ; espessura da aleta e da chapa, e ; espessura do módulo FV, p ; altura máxima das aletas, h ; altura do recorte interno das aletas, i . A Figura 7 apresenta as dimensões que foram alteradas nas aletas - h e i - a fim de proporcionar a diferença geométrica do sistema entre os casos propostos. Todas as novas geometrias foram projetadas com dez “dentes”, com largura e espaçamento de 25 mm entre si.

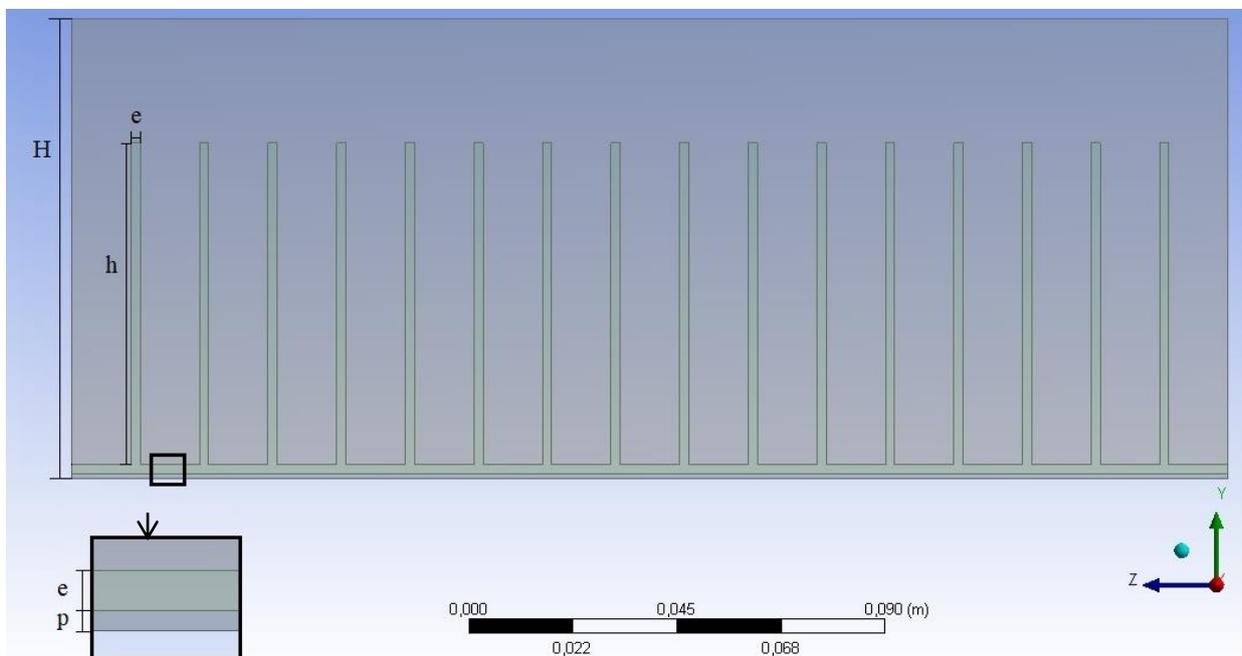


Figura 6 – Modelo original e dimensões geométricas pertinentes do sistema.

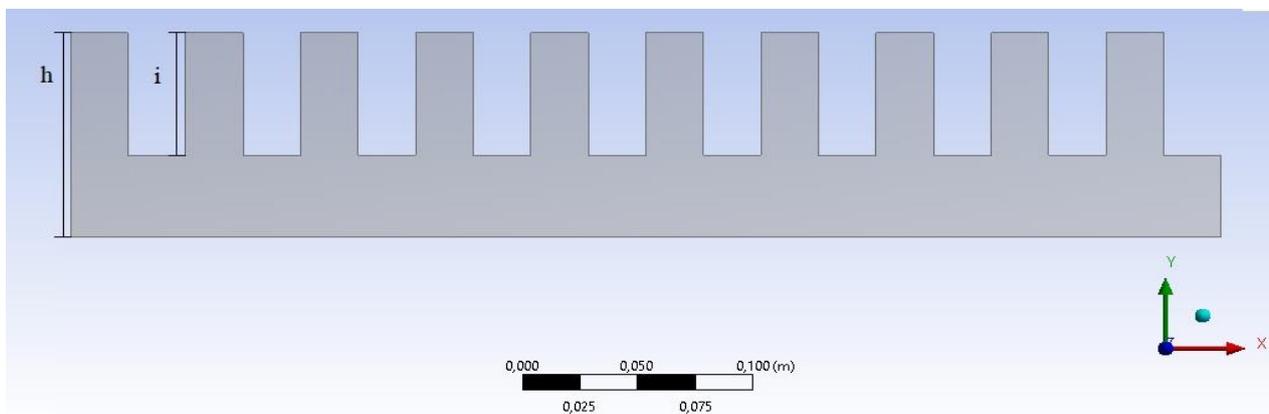


Figura 7 – Aleta utilizada no caso 4 e suas dimensões.

Os parâmetros dimensionais projetados para cada caso são apresentados na Tabela 1. Como pode ser visto, as dimensões do módulo e da chapa permaneceram constantes para todos os casos. Foram alteradas apenas a extensão do vão, entre o módulo FV e o prédio, H , altura máxima das aletas, h , e altura do recorte interno das aletas, i .

Tabela 1 – Parâmetros dimensionais de cada caso simulado.

	H [mm]	e [mm]	p [mm]	h [mm]	i [mm]
Caso original	100	2	1	70	0
Caso 1	200	2	1	70	0
Caso 2	200	2	1	80	20
Caso 3	200	2	1	90	40
Caso 4	200	2	1	100	60
Caso 5	200	2	1	110	80
Caso 6	200	2	1	120	100
Caso 7	200	2	1	130	120

Logo acima da atmosfera terrestre, a radiação solar média que chega à Terra é de, aproximadamente, 1367 W/m^2 , valor conhecido como Constante Solar (TWIDELL *et al.*, 2006). Porém, segundo Vanek *et al.* (2012), devido à absorção, à refração, ao espalhamento na atmosfera, fatores climáticos e latitude, esse valor médio é reduzido para, aproximadamente, 342 W/m^2 . Assim, para todos os casos apresentados na Tabela 1, a irradiância incidente, $H_{t,\beta}$, sobre a face frontal do módulo foi considerada 400 W/m^2 .

Posteriormente, para a análise da influência da irradiância sobre o sistema, foi mantido o modelo físico do caso original – casos 8, 9, 10, 11 e 12 - e alterado apenas o valor da irradiância, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Variação da irradiância incidente entre cada caso simulado.

	$H_{t,\beta}$ [W/m^2]
Caso original	400
Caso 8	500
Caso 9	600
Caso 10	700
Caso 11	800
Caso 12	900

As demais condições climáticas sobre o sistema original e para os diversos casos estudados foram mantidas as mesmas utilizadas por Elesbão (2017), as quais são propostas originalmente no trabalho realizado por Popovici *et al.* (2015).

A face posterior do sistema, onde posicionam-se as aletas, foi submetida a um escoamento de ar com velocidade de $1,5 \text{ m/s}$ e temperatura de $34,85 \text{ }^\circ\text{C}$. Valores constantes para toda a face de entrada no volume de controle. As propriedades do ar foram consideradas para o ar padrão a 1 atm . O alumínio, material que compõe tanto a chapa quanto as aletas fixadas sobre ela, segundo a documentação do software ANSYS, tem massa específica de 2.719 kg/m^3 , condutividade térmica de $202,4 \text{ W/mK}$ e calor específico de 871 J/kgK . As superfícies dos “corpos” do módulo FV, chapa de

alumínio e volume de controle do ar que estão em contato com a parede do prédio foram consideradas adiabáticas.

3.2 Abordagem computacional

Primeiramente, cada caso foi modelado com a auxílio do software SOLIDWORKS (versão estudante). Em seguida, todos os casos foram importados para o software ANSYS (versão 19), onde foram executadas simulações preliminares do comportamento do sistema, até que atingissem o regime permanente. Para esta análise, foi atribuída uma malha de aproximadamente 900.000 elementos, de forma a encontrar um valor preliminar da temperatura média de operação do módulo FV de cada caso. As simulações foram realizadas com o auxílio do Fluent, ferramenta pertencente ao software ANSYS. O qual tem o propósito de modelar, numericamente, a dinâmica de fluídos e também a transferência de calor entre corpos.

Como o número de Reynolds é de cerca de 46.875, quando o módulo FV foi simulado sem as superfícies estendidas, demonstrado por Elesbão (2017), o escoamento do ar de 1,5 m/s foi considerado turbulento ao longo de todo volume de controle. Assim, para a simulação do escoamento, o modelo utilizado foi o *kappa-epsilon* ($k-\epsilon$), com o método de “grupo de renormalização”, RNG. Pois, segundo a documentação do manual do ANSYS, este método é recomendado para escoamentos turbulentos no interior de canais fechados. *Kappa-epsilon* é o modelo mais utilizado em dinâmica de fluido computacional (CFD) para a simulação de escoamentos turbulentos. O mesmo é um modelo de duas equações de transporte que calculam o comportamento da turbulência de um sistema, focando nos mecanismos que afetam as variáveis de transporte k , energia cinética turbulenta, e ϵ , dissipação da energia cinética turbulenta. Para a utilização deste modelo, o Fluent torna necessário o fornecimento do valor da intensidade de turbulência, I , a qual é dependente do número de Reynolds, Re , e, segundo Popovici *et al.* (2015), pode ser calculada pela Equação 1.

$$I = 0,16Re^{-0,125} \quad (1)$$

Para a realização das simulações, utilizou-se da opção de precisão dupla, através do modo SIMPLE. O método de precisão dupla é um ponto flutuante no formato numérico digital, que, em computadores modernos, ocupa 64 bits na memória da máquina, diferente da precisão simples, que ocupa 32 bits. Assim, levando em conta que quanto mais bits disponíveis maior é a precisão do número, justifica-se a escolha realizada, a fim de uma maior exatidão nos resultados. Como critérios de convergência, a fim de alcançar resultados confiáveis, adotou-se 10^{-6} como valor do desvio padrão para os termos referentes à continuidade, energia, velocidade, k e ϵ , entre as sucessivas iterações das simulações.

3.2.1 Análise da independência de malha

Posteriormente, após a realização das simulações preliminares, foi realizada a análise de independência da malha. Foram simulados diversos níveis de discretização da malha para o caso 4, com a finalidade de encontrar um valor para o número de elementos de volume de controle, a partir do qual o seu refinamento resultasse em uma alteração sucessivamente menor no valor da temperatura média de operação do módulo. Demonstrando, desta forma, que os resultados encontrados nas simulações são confiáveis.

Conforme proposto por Lorenzini *et al.* (2016), a comparação entre as temperaturas médias encontradas entre as sucessivas simulações, ou seja, o desvio relativo entre elas, foi o critério escolhido para a definição do número de elementos de volume de controle que está satisfatório. Para

este trabalho, o valor escolhido de desvio relativo para que ocorra a convergência deve ser menor do que 10^{-6} , calculado pela Equação 2.

$$D_r = \left| \frac{T_{C+1} - T_C}{T_C} \right| < 10^{-6} \quad (2)$$

Na qual o desvio relativo é representado por D_r , a temperatura média resultante da simulação por T_C , em °C, e a temperatura média resultante da sucessiva simulação por T_{C+1} , em °C. Depois de encontrado o valor adequado ao critério de convergência, todos os casos foram simulados novamente para a mesma quantidade de elementos de malha correspondente à temperatura média T_C .

Segundo Maliska (2013), as propriedades da malha são definidas pelo número, forma e tamanho dos elementos. Outro ponto que o autor salienta, está no fato da necessidade dos triângulos aproximarem-se ao máximo de triângulos equiláteros, para que as funções de interpolação sejam bem representadas (ELESBÃO, 2017). Ainda de acordo com Maliska (2013), é de grande importância o cuidado ao tratar a disposição e geometria dos volumes de controle próximos às condições de contorno do sistema, pois isso tem influência direta na qualidade do resultado obtido. Desta forma, os volumes de controle próximos à interface entre o conjunto dissipador - formado pela chapa e aletas - e o domínio do ar receberam atenção especial, visto que as geometrias dos mesmos variam de corpo para corpo. A Figura 8 apresenta uma vista 3D em corte do caso 4 com aproximadamente 1.300.000 volumes de controle.

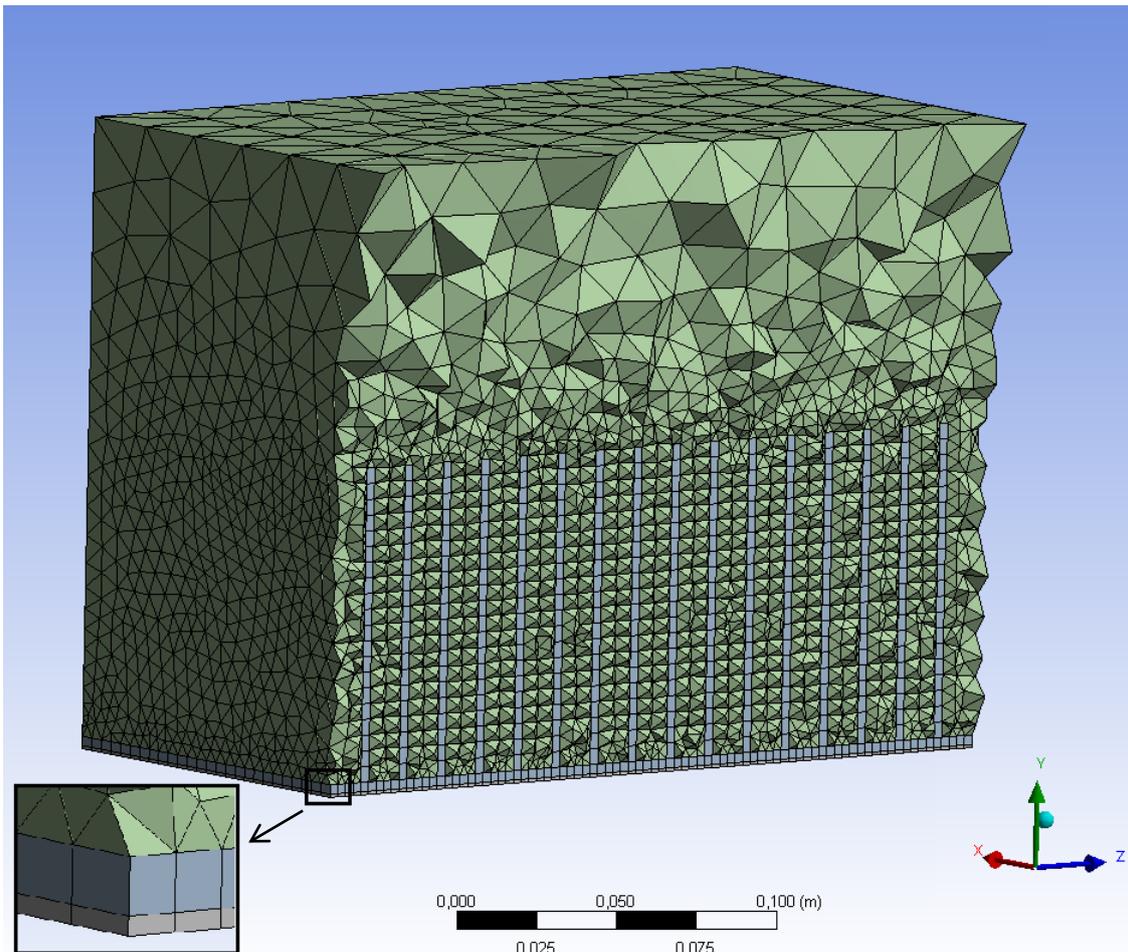


Figura 8 – Vista 3D em corte do caso 4 ($h = 100$ mm, $i = 60$ mm) com aproximadamente 1.300.000 volumes de controle.

É importante ressaltar que, mesmo com as geometrias dos três “corpos” (módulo FV, conjunto dissipador e domínio do ar) serem formadas todas por ângulos retos, utilizou-se elementos prismáticos apenas no módulo e no dissipador, e tetraédricos no domínio do ar, conforme mostra o detalhe na Figura 8. Essa configuração para a composição da malha do domínio ar foi adotada devido à necessidade de elementos refinados próximos às interfaces com o conjunto dissipador e elementos mais grosseiros conforme se distanciavam das mesmas. Assim, a utilização de elementos prismáticos no domínio do ar se tornou inviável, pois suas geometrias alteravam-se a fim de manter o padrão de contato entre os vértices, perdendo sua ortogonalidade e, conseqüentemente, reduzindo a qualidade da malha.

3.3 Cálculo da potência e eficiência dos módulos fotovoltaicos

Como referência para os cálculos de potência e eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica dos módulos FV, utilizou-se o protótipo comercial JKM310P-72 do fabricante Jinko Solar, igualmente proposto por Elesbão (2017). De acordo com as informações no site do fabricante o modelo tem as seguintes características: Eficiência de conversão de energia de 15,98% para a condição STC e redução proporcional da eficiência em 0,41% a cada 1 °C acima da temperatura média de operação padrão (25 °C).

Primeiramente, antes do cálculo da eficiência, é necessário conhecer o valor da potência elétrica gerada pelo módulo FV. Segundo Zilles *et al.* (2012), uma maneira de calcular a potência gerada por um módulo FV, em Wp, é dada pela Equação 3:

$$P_{MP} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - Y_{MP} (T_C - T_{C,ref})] \quad (3)$$

Onde: P_{MP} representa a potência gerada, em Wp; P_{FV}^0 , a potência gerada para a condição STC, em Wp; $H_{t,\beta}$, a irradiância incidente, em W/m²; H_{ref} , a irradiância incidente para a condição STC, em W/m²; Y_{MP} , a variação da eficiência a cada 1 °C do modelo; T_C , a temperatura média de operação do módulo, em °C; $T_{C,ref}$, a temperatura média de operação do módulo para a condição STC, em °C.

Após conhecido o valor da potência elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico, ainda segundo Zilles *et al.* (2012), é possível calcular a eficiência do módulo FV pela Equação 4. Onde: η representa a eficiência; P_{MP} , a potência elétrica gerada, em Wp; A_{rea} , a área da superfície que recebe irradiância, em m².

$$\eta = \frac{P_{MP}}{1000A_{rea}} \quad (4)$$

4. RESULTADOS

4.1 Influência da extensão do vão

Inicialmente foi realizada a simulação do caso original e do caso 1, alterando apenas a extensão do vão, H , a fim de analisar a influência do aumento da altura do vão na troca de calor entre o ar e o sistema. O Apêndice A apresenta a variação da massa específica do ar após a simulação do caso original. Não obstante, o Apêndice B apresenta a variação da massa específica do ar após a simulação do caso 1. Observa-se que apenas o aumento do volume de ar que escoou sobre a face posterior do módulo não interfere na transferência de calor, pois a troca se faz apenas entre as camadas de ar próximas às superfícies da chapa e das aletas. Assim, para os casos 2, 3, 4, 5, 6 e 7, que possuem alteração da altura máxima das aletas (superiores a 100 mm) devido às novas geometrias propostas, se fez necessário um aumento da extensão do vão, H . Porém todas as

diferenças encontradas nos resultados simulados dos mesmos, relativos ao caso original, serão oriundos apenas da alteração da geometria de suas aletas.

4.2 Campo de temperaturas no módulo fotovoltaico

O campo de temperaturas do módulo fotovoltaico apresenta, para todos os casos, um comportamento característico de escoamento sobre uma superfície plana, conforme exemplificado na Figura 9. Para fins de simplificação, visto que a diferença de temperatura entre o ponto mais quente e o ponto mais frio do módulo não atinge grandes valores, o valor da temperatura assumida (T_C) para o cálculo da potência gerada pelo sistema será dado pelo valor médio da sua temperatura de operação.

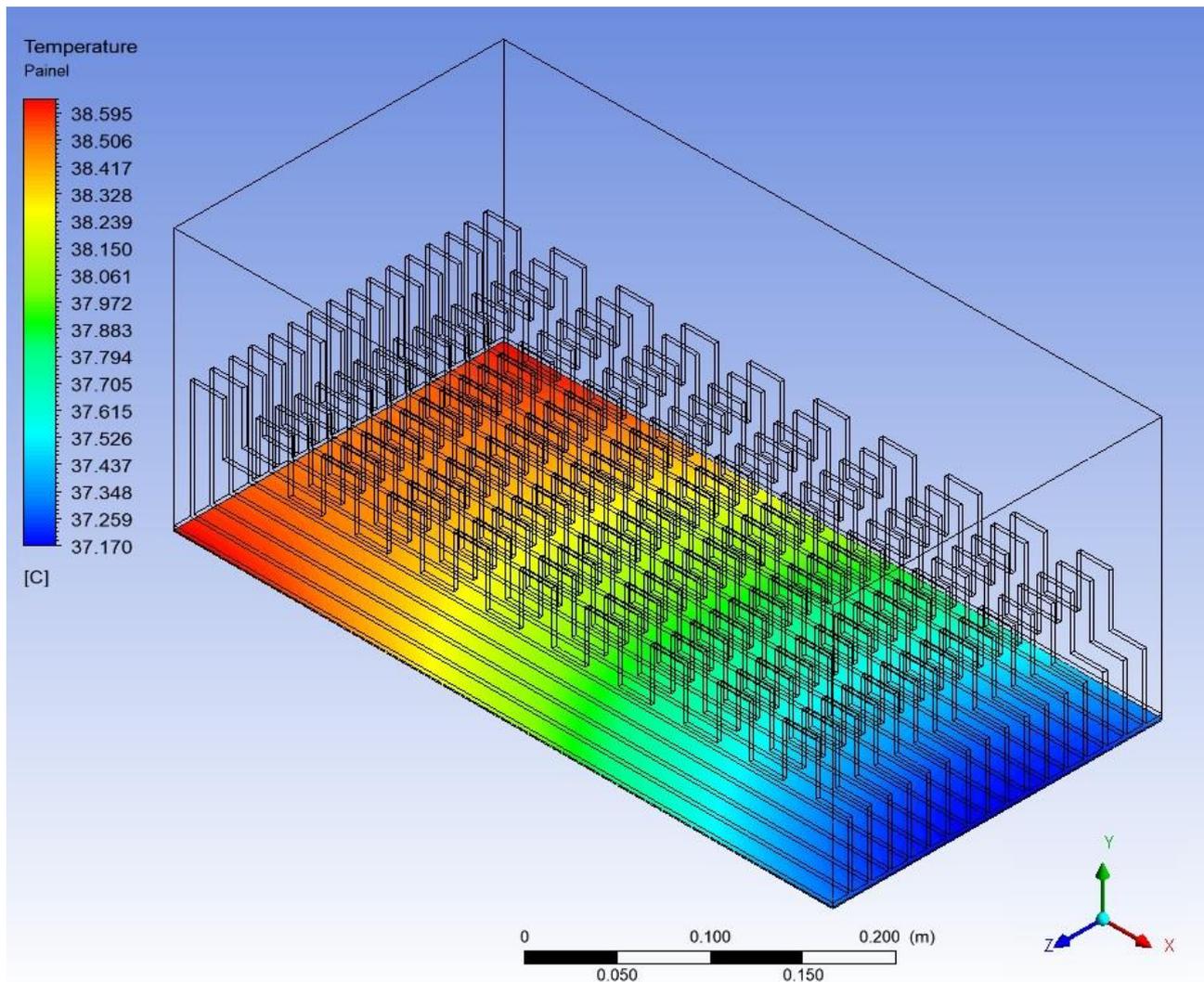


Figura 9 – Distribuição das temperaturas no módulo fotovoltaico para o caso 3.

4.3 Simulações preliminares

Após a simulação preliminar de todos os casos apresentados anteriormente na Tabela 1, para aproximadamente 900.000 volumes de controle, foram obtidas as seguintes temperaturas médias de operação T_C para cada caso, e calculada a variação da mesma, relativa à temperatura do caso original, ΔT_C . Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores das temperaturas médias de operação, T_C , e sua variação relativa ao caso original, ΔT_C , para as simulações preliminares dos casos com alteração de geometria das aletas.

	T_C [°C]	ΔT_C [%]
Caso Original	38,83	-
Caso 1	38,83	0,00
Caso 2	38,40	-1,11
Caso 3	37,95	-2,27
Caso 4	37,07	-4,53
Caso 5	36,11	-7,00
Caso 6	35,81	-7,77
Caso 7	35,63	-8,24

4.4 Análise da independência de malha

Com a finalidade de melhorar a qualidade das simulações e certificar a confiabilidade dos resultados obtidos, foi realizado o refinamento da malha. Esta otimização foi feita aplicando sucessivas malhas mais refinadas para o caso 4 até ser alcançado um valor de convergência menor que 10^{-6} para o desvio relativo, D_r . Os números de elementos de malha aplicados - juntamente com T_C e D_r resultantes para cada simulação - encontram-se no Apêndice C.

A representação gráfica da variação de T_C em função do aumento do número de volumes de controle, para o caso 4, é apresentada na Figura 10.

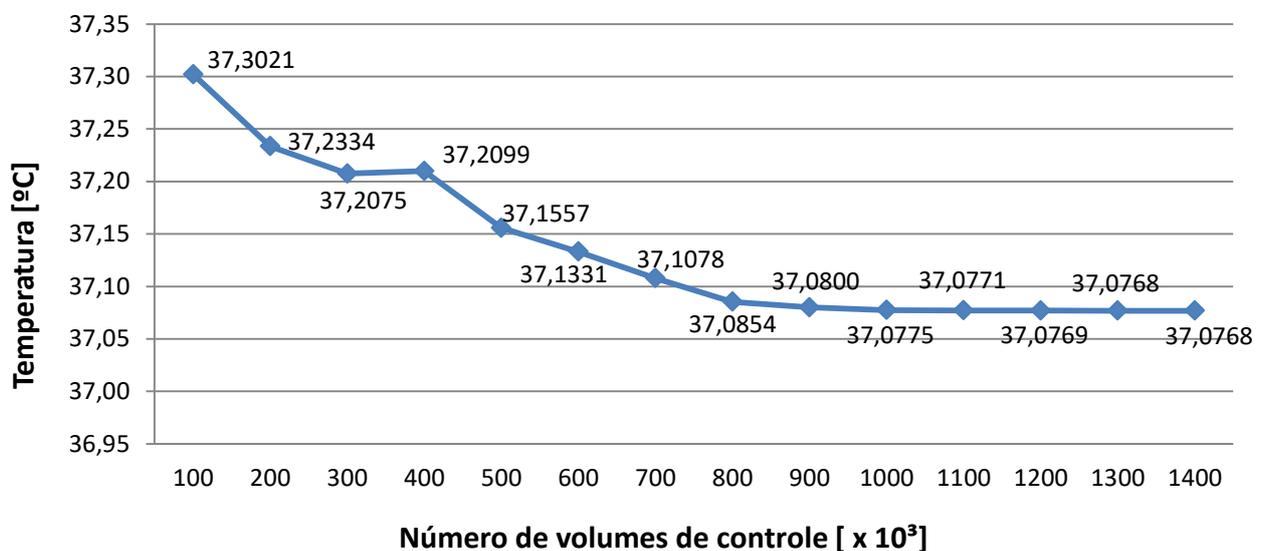


Figura 10 – Variação da temperatura média do módulo, T_C , em função do número de volumes de controle para o caso 4.

De acordo com o critério de convergência estabelecido, 1.300.000 acaba sendo o número de volumes de controle satisfatório para uma análise mais sofisticada dos casos estudados. A malha refinada demonstra uma variação para o valor da temperatura inferior a 0,01%, relativo à temperatura preliminar para o caso 4. Desta forma, evidenciou-se que a malha preliminar aplicada, com 900.000 volumes de controle, já seria satisfatória para a obtenção de resultados confiáveis.

Após encontrada a quantidade de elementos de volume de controle que satisfazem o critério de convergência para o caso 4, foram refeitas as simulações de todos os outros casos com o mesmo

refinamento da malha – 1.300.000 volumes de controle. A obtenção da temperatura T_C e a variação da mesma, relativa à temperatura do caso original, ΔT_C , são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de T_C e ΔT_C para cada caso com alteração de geometria das aletas e com aproximadamente 1.300.000 volumes de controle.

	T_C [°C]	ΔT_C [%]
Caso Original	38,83	-
Caso 1	38,83	0,00
Caso 2	38,39	-1,13
Caso 3	37,94	-2,29
Caso 4	37,06	-4,56
Caso 5	36,11	-7,00
Caso 6	35,81	-7,77
Caso 7	35,62	-8,27

Com base na Tabela 4 e no Apêndice D, notou-se uma redução da temperatura de operação do módulo conforme o aumento da altura máxima das aletas. Esta relação aparentemente tende a convergir para um determinado valor de temperatura. Deste modo, a partir de certo ponto, com o progressivo aumento da altura máxima das aletas não haverá redução significativa na temperatura de operação do módulo FV. Porém são necessários estudos mais criteriosos sobre esta relação.

Como pode ser visto na Tabela 4, com o aumento da altura máxima das aletas, foi atingida uma redução da temperatura média do módulo FV de até 8,27%.

4.5 Potência elétrica gerada

4.5.1 Casos com alteração da geometria das aletas

Encontradas as temperaturas médias de operação para cada caso, foram, então, calculadas a potência e eficiência dos módulos. A Tabela 5 apresenta a temperatura média de operação T_C para cada caso, bem como sua respectiva potência gerada, P_{MP} , eficiência na conversão de energia, η , e variação da potência relativa ao caso original, ΔP_{MP} .

Tabela 5 – Valores da temperatura, potência e eficiência do módulo para os casos simulados após o refinamento de malha.

	T_C [°C]	P_{MP} [Wp]	η [%]	ΔP_{MP} [%]
Caso Original	38,83	7,5464	6,04	-
Caso 1	38,83	7,5464	6,04	0,00
Caso 2	38,39	7,5608	6,05	0,19
Caso 3	37,94	7,5756	6,06	0,39
Caso 4	37,06	7,6044	6,08	0,77
Caso 5	36,11	7,6356	6,11	1,18
Caso 6	35,81	7,6454	6,12	1,31
Caso 7	35,62	7,6517	6,12	1,40
STC*	25,00	20,0000	15,98	

*Condição Padrão de Operação: 25 °C, 1000 W/m².

Com relação ao aumento da potência, conforme a Tabela 5 houve um acréscimo de até 1,40% na geração de energia elétrica do módulo FV. Este aumento é significativo, pois foi alcançado apenas pela alteração da geometria das aletas, sem custo adicional de projeto.

4.5.2 Casos com alteração do valor da irradiância

Para a avaliação da influência da irradiância sobre a geração de energia elétrica do módulo FV original foram simuladas variações do seu valor de incidência sobre o sistema, conforme a Tabela 2 (apresentada na seção 3.1). Os valores assumidos de irradiância $H_{t,\beta}$, bem como suas respectivas temperatura média do módulo, T_C , variação da temperatura, ΔT_C , potência gerada, P_{MP} , eficiência na conversão de energia, η , e variação da potência relativa ao caso original, ΔP_{MP} , podem ser vistas na Tabela 6.

Conforme a Tabela 6, a irradiância foi aumentada 100 W/m² entre cada caso até alcançar a intensidade de 900 W/m². Observou-se um aumento de até 121,41% na potência elétrica gerada e de até 9,46% na temperatura média de operação, relativo ao caso original.

Com relação ao aumento do valor da irradiância incidente, seria esperado um valor ótimo intermediário de irradiância sobre o módulo que resultaria na maior geração de potência elétrica, no entanto não foi o comportamento encontrado.

Tabela 6 – Variação da irradiância e seus respectivos valores de temperatura, potência e eficiência calculados.

	$H_{t,\beta}$ [W/m ²]	T_C [°C]	ΔT_C [%]	P_{MP} [Wp]	η [%]	ΔP_{MP} [%]
Caso original	400	38,83	-	7,55	6,04	-
Caso 8	500	39,57	2,08	9,40	7,5	24,60
Caso 9	600	40,29	3,76	11,25	9,00	49,05
Caso 10	700	41,03	5,67	13,08	10,46	73,33
Caso 11	800	41,75	7,52	14,90	11,92	97,46
Caso 12	900	42,50	9,46	16,71	13,37	121,41
STC*	1000	25,00		20	15,98	

*Condição Padrão de Operação: 25 °C, 1000 W/m².

De acordo com o Apêndice E, foi possível analisar que esse aumento linear do valor da irradiância incidente gera um aumento do valor da potência elétrica gerada, para certos valores. Dessa forma, foi possível analisar que o aumento do valor da irradiância sobre o módulo, gerando maior energia solar radiante disponível – assim aumentando sua potência - tem um maior “peso” do que a sua influência no superaquecimento do módulo – reduzindo a potência.

Com os resultados apresentados na Tabela 6 e Apêndice E, notou-se uma necessidade de projeto e instalação de módulos FV adequados. Tendo em vista que a definição e orientação dos módulos FV em edificações são fundamentais para uma maior irradiância média incidente no sistema e, conseqüentemente, maior energia elétrica gerada.

5. CONCLUSÃO

5.1 Discussão

O estudo proposto teve como objetivo analisar a variação da potência elétrica gerada por um módulo FV arrefecido por superfícies estendidas, através da otimização da geometria do sistema e variação da magnitude da irradiância incidente. A partir da análise dos resultados é possível constatar que esse objetivo foi alcançado.

Ao longo deste trabalho, foi evidenciado que apenas o aumento da extensão do vão entre as fachadas de edifícios que possuem a instalação de módulos fotovoltaicos arrefecidos por superfícies estendidas não influencia a variação da troca de calor. Consequentemente, não causa variação na temperatura de operação dos módulos e alteração na potência elétrica gerada.

Em contrapartida, com a otimização da geometria das aletas que compõem o módulo FV, obteve-se até 8,27% de redução da temperatura média de operação, proporcionando um acréscimo de 1,40% de da potência elétrica gerada.

Com relação à influência da irradiância, apesar da sua peculiar característica de favorecer simultaneamente o aumento e a redução da geração de potência elétrica, foi possível verificar que o aumento de seu valor implica em um aumento de potência elétrica. Assim, deve-se ter um cuidado no projeto e instalação de módulos FV em edifícios, considerando que o posicionamento dos mesmos, com relação ao Sol, deve ser o melhor possível, a fim de se obter uma maior magnitude de irradiação solar sobre o sistema.

Comparando os maiores valores de potências geradas, pela otimização da geometria das aletas e pelo aumento da irradiância incidente, observou-se que houve um aumento maior causado pelo aumento da irradiância. Mas, mesmo com ganhos de potência relativamente baixos gerados pela otimização da geometria das aletas, esses se fizeram pertinentes, devido ao fato de que não houve acréscimo no custo de projeto. Desta forma, caso esse conceito de otimização seja aplicado industrialmente, com produção em larga escala de módulos FV ou de sistemas que utilizem configurações similares, sua influência, no que tange o aumento de potência dos produtos, será significativa.

5.2 Trabalhos futuros

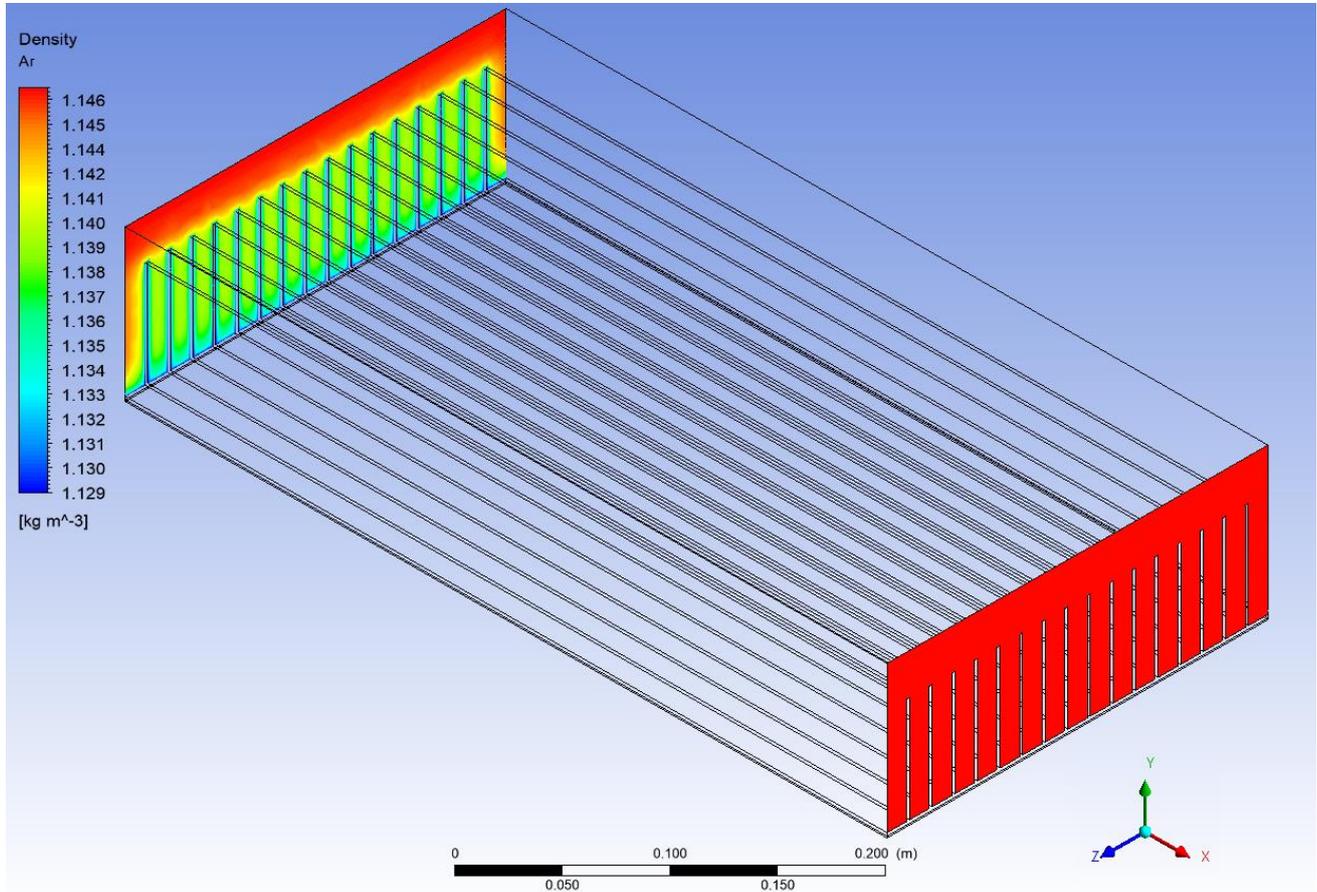
Um maior número de simulações é necessário para a definição da relação entre a geometria das aletas e variação da temperatura média de operação do módulo FV. Outras formas de avaliar o problema envolveriam calcular o custo e o benefício em longo prazo para os casos estudados. Não somente com relação aos ganhos em potência elétrica, mas também levando em conta a alteração da vida útil dos módulos, causada pela variação da sua temperatura média de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

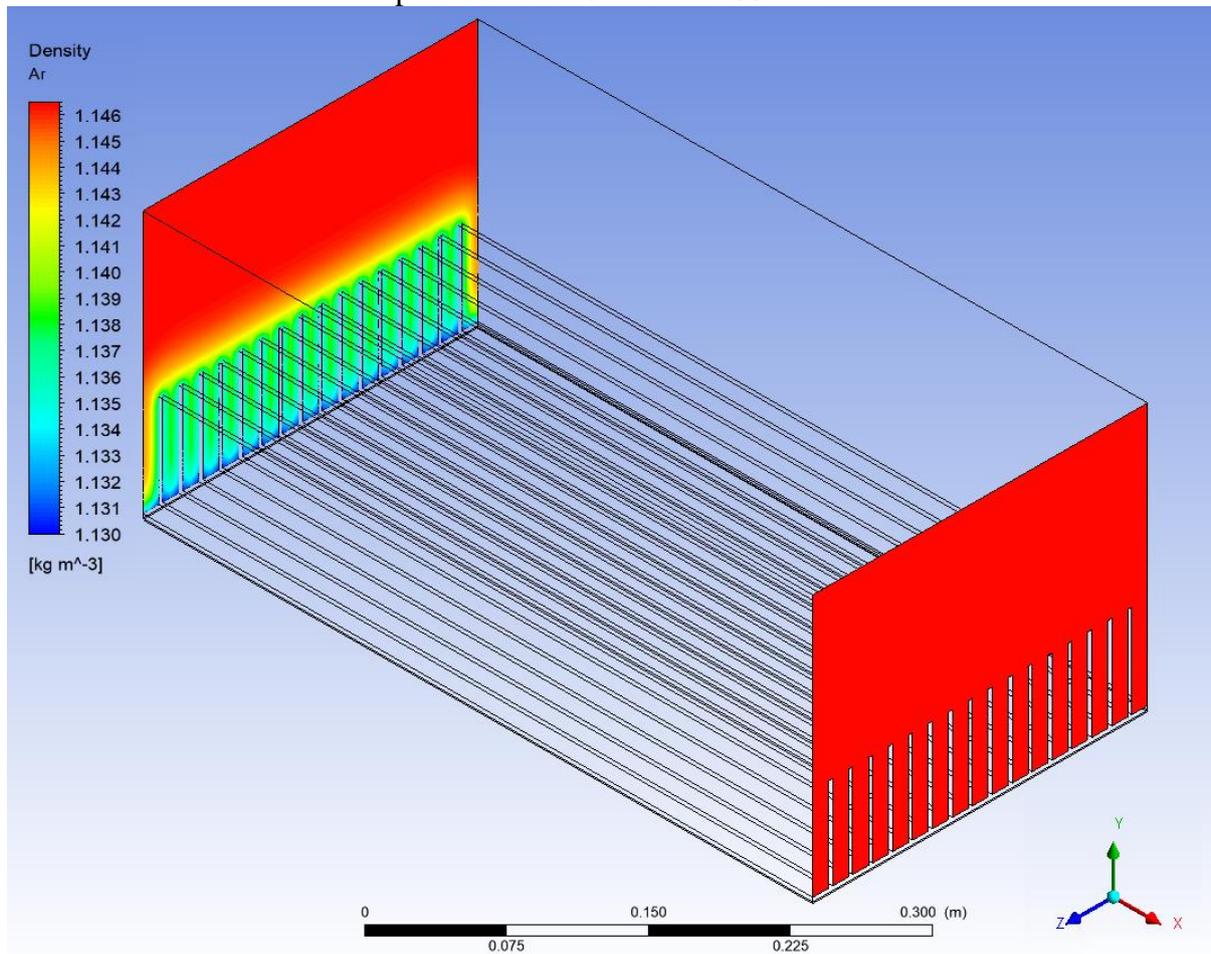
- Aneel “**Brasil ultrapassa marca de 1 GW em geração distribuída**”
https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877 acesso em 20/11/2019
- ANSYS “**Fluent Documentation**”.
- Bellen, H.M.V. “**Desenvolvimento Sustentável: Uma Descrição das Principais Ferramentas de Avaliação**”, Ambiente & Sociedade, 2004
- Borges, V., Zabadal J.R., Ribeiro, V.G. “**Um estudo sobre a distribuição de temperatura no projeto de superfícies aletadas no plano**”, XI Semana de extensão, Pesquisa e Pós-Graduação, 2015
- Borkar, D.S., Prayagi, S.V., Gotmare, J. “**Performance Evaluation of Photovoltaic Solar Panel Using Thermoelectric Cooling**”, 2014
- Brito e Silva, M.C., J.A. “**Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em eletricidade**”
 Artigo publicado na revista O instalador, Lisboa, 2006
- De Alcântara, S.M.F. “**Desempenho de um painel fotovoltaico de baixa tensão, acoplado ao protótipo de um conversor DC/DC topologia *Booster***”, Natal, 2010
- Castro, R.M.G. “**Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à energia fotovoltaica**”, Lisboa, 2002
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. “**Solar Engineering of Thermal Processes**”. Wiley, 4th Edition, 2013
- Elesbão, R.V.F. “**Análise da eficiência de painéis solares fotovoltaicos arrefecidos através de superfícies estendidas via CFD**”. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- Jinko Solar “**JKM310P-72 cells model product datasheet**”
https://www.jinkoSolar.com/product_detail_227.html?lan=pt. Acesso em 01/11/2019.
- Jornal Exame “**Energia solar tem aumento de 560% em pouco mais de dois anos no Brasil**”
<https://exame.abril.com.br/negocios/jp/energia-solar-tem-aumento-de-560-em-pouco-mais-de-dois-anos-no-brasil/>. Acesso em 02/11/2019
- Lorenzini, G., Machado, B.S., ISoldi, L.A., dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O. “**Constructal Design of Rectangular Fin Intruded Into Mixed Convective Lid-Driven Cavity Flows**” 2016
- Maliska, C.R. , “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**”, LTC, Rio de Janeiro. 2ª Edição, 2013
- Popovici, C.G., Hudisteanu, S.V., Mateescu, T.D., Chereches, N.C., “**Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks**” Bucharest, Romania, 2015.
- Twidell, J.W., Weir, A.D.; “**Renewable Energy Resources**”. Taylor, 2nd Edition, 2006
- Vanek, F.M., Albright, L.D., Angenent, L.T.; “**Energy Systems Engineering**”. McGrawHill, 2nd Edition 2012.
- Zilles, R., Macêdo, W.N., Galhardo, M.A.B., Oliveira, S.H.F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1ª Ed. São Paulo. Ed. Oficina de Textos. 2012

APÊNDICE

APÊNDICE A - Distribuição da massa específica do ar na entrada e saída do volume de controle para o caso original. Onde $H = 100$ mm.



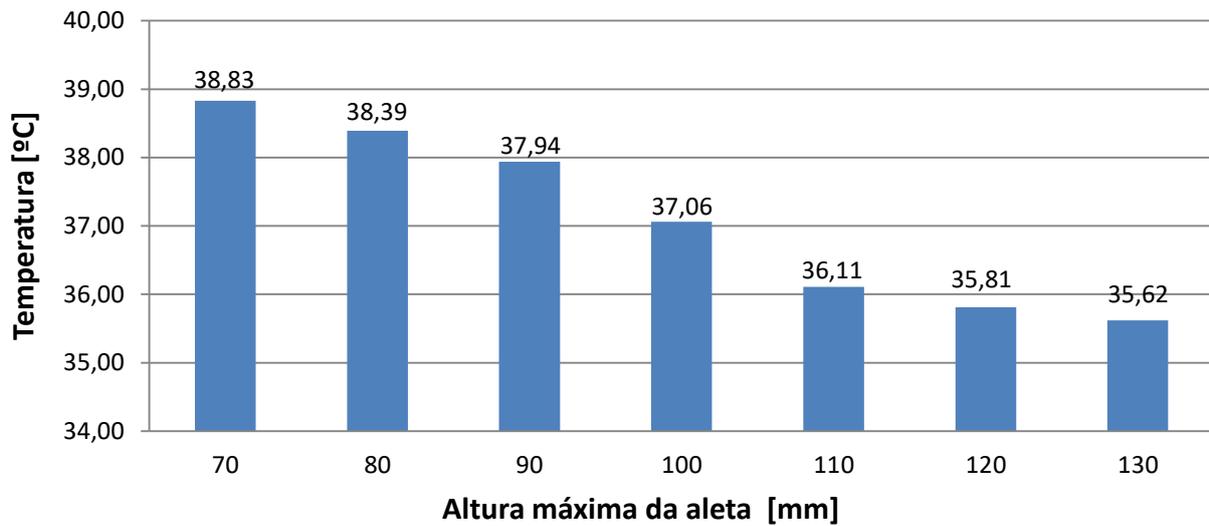
APÊNDICE B - Distribuição da massa específica do ar na entrada e saída do volume de controle para o caso 1. Onde $H = 200$ mm.



APÊNDICE C – Progressão de T_c e D_r com o aumento do número volumes de controle para o caso 4.

Números de volume de controle [$\times 10^3$]	T_c [°C]	D_r
100	37,30210	1,84E-03
200	37,23340	6,96E-04
300	37,20750	6,45E-05
400	37,20990	1,46E-03
500	37,15570	6,08E-04
600	37,13310	6,81E-04
700	37,10780	6,04E-04
800	37,08540	1,46E-04
900	37,08000	6,74E-05
1000	37,07750	1,05E-05
1100	37,07711	4,85E-06
1200	37,07693	2,16E-06
1300	37,07685	2,70E-07
1400	37,07684	-

APÊNDICE D – Variação da temperatura de operação do módulo em função da variação da altura máxima da aleta (h).



APÊNDICE E – Potência elétrica gerada pelo módulo FV original e sua temperatura média de operação em função do aumento da irradiância incidente.

