

# Estudo da influência de carenagens na eficiência de painéis fotovoltaicos: Uma abordagem energética e fluidodinâmica

**Thiago Lustosa Lima Dórea**

[thiagolustosa.ld@gmail.com](mailto:thiagolustosa.ld@gmail.com)

Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

**Alex Álisson Bandeira Santos**

[alex.santos@fieb.org.br](mailto:alex.santos@fieb.org.br)

Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

**Turan Dias Oliveira**

[turan.oliveira@fieb.org.br](mailto:turan.oliveira@fieb.org.br)

Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

**João Pedro Brito de Andrade**

[joao.andrade@fieb.org.br](mailto:joao.andrade@fieb.org.br)

Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

## Resumo:

O planeta Terra recebe todos os anos cerca de 170 petawatt de radiação solar, enquanto 30% dessa energia são refletidas de volta ao espaço o restante é absorvido pela Terra. Tal fator dá à energia solar o maior potencial de geração elétrica dentre todos os outros, porém pelo fato da tecnologia dos painéis solares ser recente, há ainda um baixo rendimento destes sistemas (13 - 15%). O Brasil, em especial, nas regiões dos estados do nordeste brasileiro possui vastas áreas para a sua implantação. Todavia, normalmente em regiões de elevada temperatura a eficiência dos equipamentos fotovoltaicos (painéis) diminui devido ao seu baixo resfriamento. Quanto melhor o resfriamento melhor a eficiência de geração fotovoltaica. Baseado nisso, a proposição do trabalho foi realizar simulações computacionais com CFD (dinâmica dos fluidos computacional) para testar estruturas de carenagem associados aos painéis fotovoltaicos disponíveis em mercado. Tais estruturas podem permitir uma maior vazão do ar atmosférico, visando o aumento da sua velocidade, promovendo um maior resfriamento, e conseqüentemente ampliando a eficiência dos painéis fotovoltaicos. Com isso, permitem-se algumas possibilidades de aplicação desse conceito em unidades de geração por energia solar. Com base nas velocidades de saída apresentadas nas simulações em CFD, foram feitas análises termodinâmicas utilizando a plataforma EES (Engineering Equation Solver), identificando os efeitos energéticos oriundos da instalação das carenagens propostas sobre a eficiência dos painéis.

**Palavras-chave:** Carenagem, CFD, Eficiência, Painéis fotovoltaicos.

## Abstract:

The Earth receives every year about 170 petawatts of solar radiation, while 30% of that energy is reflected into space the rest is absorbed by Earth. This factor gives solar energy the greatest potential of electric generation among all others, but

because the technology of the solar panels is recent, there is still a low performance of these systems (13 - 15%). Brazil, particularly, in the regions of northeastern has vast areas for its implementation. However, typically in high temperature regions, the efficiency of photovoltaic equipment (panels) decreases due to its low cooling. The better the cooling the better the efficiency of photovoltaic generation. Based on this, the purpose of the work was to carry out computational simulations with CFD (Computational Fluid Dynamics) to test fairing structures associated with commercially available photovoltaic panels. Such structures may allow a higher flow rate of atmospheric air, aiming to increase its velocity with the goal of greater cooling and consequently an efficiency increase of photovoltaic panels. With this, some possibilities of application of this concept are allowed in units of generation by solar energy. Based on the output velocities presented in the CFD simulations, thermodynamic analyzes were performed using the EES (Engineering Equation Solver) platform, identifying the energetic effects of the installation of the proposed fairings on the efficiency of the panels.

**Keywords:** CFD, Efficiency, Fairing, Photovoltaic panels.

---

## 1 Introdução

O Brasil é um país de elevada extensão territorial e tem a maior parte de seu território localizado na região intertropical do planeta, possuindo, desta forma, um grande potencial para o aproveitamento de energia solar durante todo o ano. A região nordeste do país, em especial, apresenta os maiores índices de incidência solar anuais médios (5,9kWh/m<sup>2</sup>) e que apresenta menor variabilidade interanual (variando de 5,7 à 6,1 kWh/m<sup>2</sup>), representando, deste modo, a região com maior disponibilidade energética do país. Todavia a tecnologia atual só permite um aproveitamento de 13 à 15% da energia solar incidente em um dispositivo de geração fotovoltaica comercial.

Os painéis fotovoltaicos possuem um comportamento que varia conforme sua temperatura de operação, o acréscimo de temperatura no módulo fotovoltaico é acompanhado de uma queda na sua eficiência de geração de energia elétrica. Apesar do elevado índice de radiação solar ser favorável para a geração de energia nestes dispositivos, sua elevada intensidade provoca também um aumento de temperatura das células que o compõem. Desta forma o desenvolvimento de técnicas de resfriamento para estes dispositivos foi alvo de grandes estudos e pesquisas nos últimos anos.

Teo et al. Avaliaram a influência da mudança da taxa de fluxo de ar sob a eficiência dos painéis fotovoltaicos, onde a elevação da taxa resultou em resultados satisfatórios no aumento da eficiência de conversão de energia. Mojumder et al. Realizaram uma análise sob a temperatura

e a eficiência térmica e elétrica de um módulo fotovoltaico presente em um painel híbrido (térmico-fotovoltaico), onde foram realizados experimentos sob condições de diferentes radiações solares e de taxas de fluxo, com a variação de parâmetros sendo realizada de maneira independente e com o uso de exaustores para a variação da velocidade de ar atmosférico. Tonui et al. Concluíram que com a ventilação forçada há uma maior troca de calor por convecção que na ventilação natural, o sistema forçado promove um sistema com menor grau térmico e, conseqüentemente uma maior geração de energia elétrica. Elsafi et al. Estudaram o efeito de diferentes formas de aletas como triangular retangular e parabólica no arrefecimento dos painéis. Pottler e Naphon. Realizaram um estudo sobre o desempenho e geração de entropia de um aquecedor de ar solar de dupla passagem, onde mostraram que a eficiência térmica do módulo fotovoltaico aumenta com o aumento da taxa de fluxo e o coeficiente de transferência de calor aumenta com o aumento do número de Reynolds. Luis et al. Avaliaram, através de simulação numérica com aplicação de ferramentas CFD (Computation Fluid Dynamics), a influência da troca convectiva em painéis fotovoltaicos em regime de convecção natural sob diferentes temperaturas ambientes e condições de irradiação solar. Abe e Ohya Avaliaram através de ferramentas CFD, a influência da aplicação de uma carenagem de característica difusora para a aplicação a turbinas eólicas, onde obteve-se o aumento da velocidade do vento sob os rotores.

Tendo em vista a importância e a relevância de aplicação de técnicas que melhorem o arrefecimento de painéis fotovoltaicos e o trabalho desenvolvido por Abe e Ohya, o presente artigo teve, portanto, como objetivo o estudo e análise da influência energética da carenagem desenvolvida por Abe e Ohya aplicada aos painéis fotovoltaicos com aplicação de variações de abertura angulares. O trabalho foi desenvolvido através da utilização de técnica de simulação fluidodinâmica computacional CFD e da utilização de software de auxílio de cálculo EES (Engineering Equation Solver).

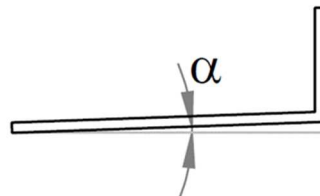
Neste trabalho estão inclusos a metodologia aplicada para a simulação computacional e para a análise da eficiência, bem como as equações termodinâmicas utilizadas no estudo e os resultados obtidos.

## **2 Metodologia**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados o software de CAD 3D SolidWorks para a modelagem da carenagem a ser estudada. Para a análise do comportamento de fluido no sistema utilizou-se o software de simulação fluidodinâmica (CFD) ANSYS CFX, onde as

velocidades encontradas na análise dos resultados das simulações foram exportadas para o programa de auxílio de cálculo Engineering Equation Solver (EES), e onde através da associação de equações termodinâmicas relacionadas à convecção natural, convecção forçada, irradiação solar e reflexibilidade analisaram-se os impactos de diferentes condições aplicadas ao painel fotovoltaico, principalmente no campo de sua eficiência de geração de energia elétrica. Foi desenvolvida uma carenagem difusora com base no trabalho de Abe e Ohya para a realização de simulações. A carenagem está representada na figura 1 abaixo onde foi realizado um estudo com variações no ângulo  $\alpha$ , avaliando para 2°, 4°, 8° e 12°, as dimensões utilizadas para a construção da carenagem foram com base no trabalho de Abe e Ohya.

**Figura 1 - Carenagem Estudada**



Fonte: Próprio autor

## 2.1 Análise Fluidodinâmica

O software ANSYS CFX foi utilizado para através do método dos volumes finitos, resolver as equações de continuidade e de Navier Stokes, descritas nas Eqs. (1)-(4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) &= \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{M_x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) &= \\ &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{M_y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) &= \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{M_z} \end{aligned} \quad (4)$$

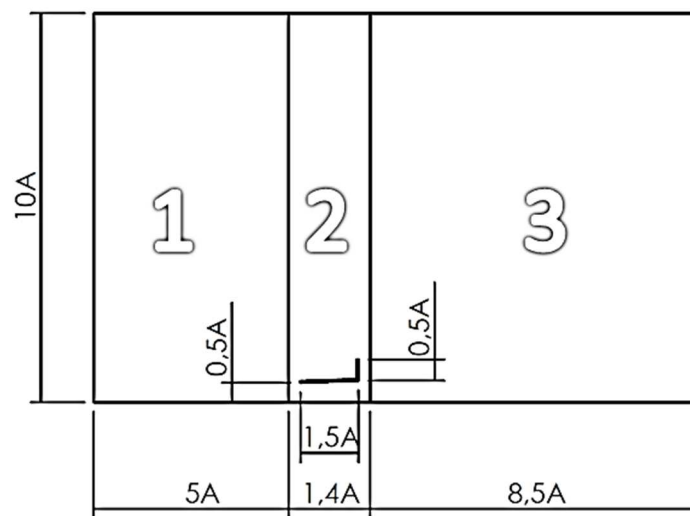
Onde  $p$  é pressão,  $t$  é tempo;  $x$ ,  $y$  e  $z$  são, respectivamente, as três direções cartesianas;  $u$ ,  $v$  e  $w$  são, respectivamente, as velocidades nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $\vec{u}$  é o vetor tridimensional de velocidade;  $\mu$  é a viscosidade do fluido;  $S_{Mx}$ ,  $S_{My}$  e  $S_{Mz}$  são os termos fontes de momento nas direções descritas em subscrito.

Para a análise de fluxo turbulento do sistema adotou-se o modelo k- $\epsilon$  proposto e detalhado por Jones e Launder, de forma que tal modelo oferece boas previsões para campos de fluxo extensos e que apresenta maior proximidade com dados experimentais.

### 2.1.1 Domínio

O ambiente estudado foi elaborado com 3 regiões distintas e está representado na figura 2, onde 1 representa a região de entrada de fluido, 2 a região que engloba a carenagem e 3 a região de saída. As dimensões adotadas para a construção do ambiente estão demonstradas na mesma imagem, onde A representa a abertura do difusor estudado e possui valor de 200 mm.

**Figura 2 – Ambiente e dimensões**

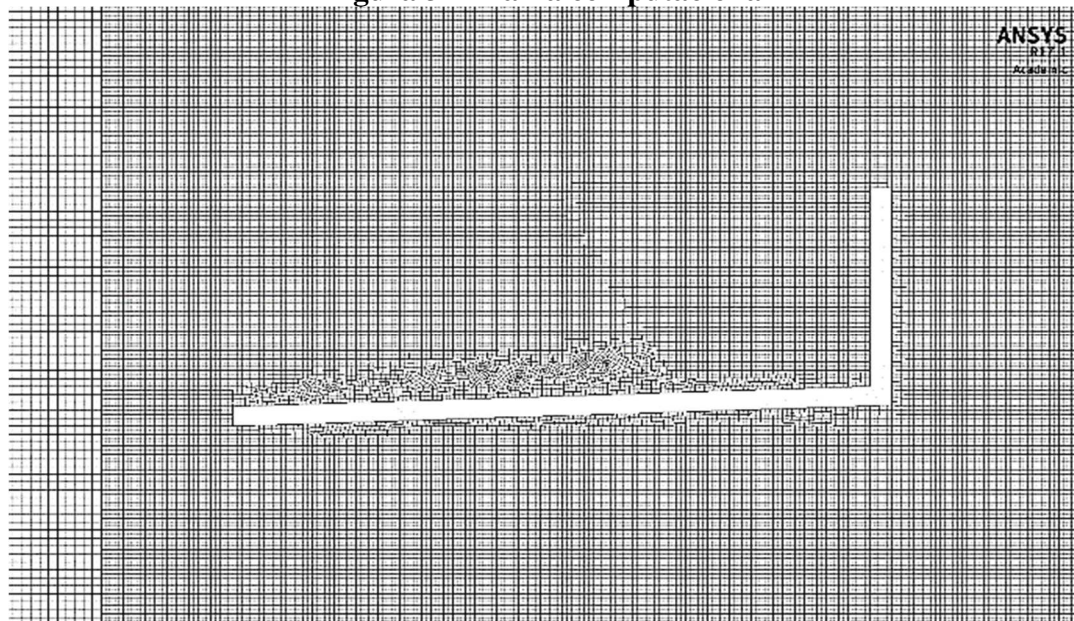


Fonte: Próprio autor

### 2.1.2 Malha Computacional

Para o emprego do método numérico foram geradas malhas computacionais para os as quatro angulações de difusores estudadas. Todas as malhas foram desenvolvidas de forma semelhante e a figura 3 exibe a malha desenvolvida para ângulo de 2°. A malha gerada foi elaborada com elementos de predominância quadrilátera, de forma que na região 1 é constituída por elementos de aresta 4mm e as demais elementos de aresta 2mm. O número de elementos em cada geometria estudada está demonstrado na tabela 1.

**Figura 3 – Malha computacional**



Fonte: Próprio autor

**Tabela 1 – Números de elementos de cada geometria**

Geometria	Nº de elementos
2°	1.184.238
4°	1.184.970
8°	1.185.250
12°	1.184.552

Fonte: Próprio autor

### 2.1.3 Condições de Contorno

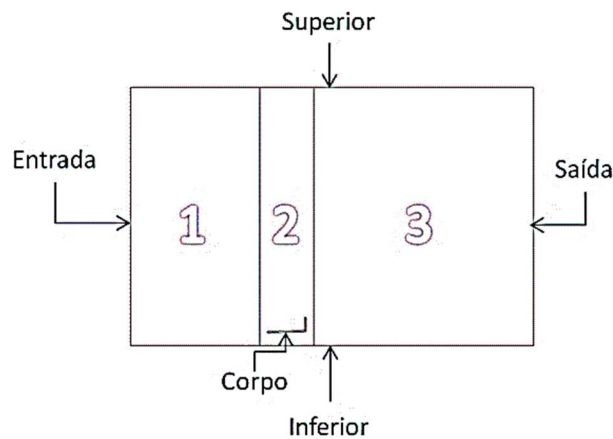
Os parâmetros adotados para a realização da simulação estão apresentados na tabela 2, e suas respectivas regiões na figura 4.

**Tabela 2 – Parâmetros Utilizados**

Região	Parâmetro
<i>Entrada</i>	<i>Velocidade constante de 1m/s</i>
<i>Saída</i>	<i>Pressão Atmosférica</i>
<i>Superior</i>	<i>Parede sem condição de não deslizamento</i>
<i>Inferior</i>	<i>Simetria</i>
<i>Corpo</i>	<i>Parede com condição de não deslizamento</i>

Fonte: Próprio autor

**Figure 4 – Localização das regiões de contorno**



Fonte: Próprio autor

## 2.2 Análise Termodinâmica

Para a realização da simulação da eficiência energética do estudo em questão, foi necessária a realização de um balanço de energia no qual foram levadas em consideração as perdas energéticas que estariam presentes no experimento prático. As perdas energéticas em questão são divididas em dois principais tipos perdas por convecção e por radiação. Todos os cálculos de potências utilizadas na simulação tiveram como base os estudos de Incropera et al. A equação do balanço energético é representada na Eq. 5.

$$P_{sol} - P_{ceu} - P_{chao} - P_{arsup} - P_{arinf} - P_{eletrica} = 0 \quad (5)$$

em que:

$P_{sol}$  representa a potência da incidência do sol sobre o painel;

$P_{ceu}$  representa a perda por radiação da parte superior do painel para a atmosfera;

$P_{chao}$  representa a perda por radiação da parte inferior do painel para a terra;

$P_{arsup}$  representa a perda convectiva da parte superior do painel podendo ser forçada e/ou natural.

$P_{arinf}$  representa a perda convectiva da parte inferior do painel podendo ser forçada e/ou natural.

Para melhor entendimento de todas as potências utilizadas no balanço energético serão destrinchadas.

A potência da incidência do sol,  $P_{sol}$ , sobre o painel está representada na Eq. 6.

$$P_{sol} = I * A \quad (6)$$

em que:

I: Irradiação ( $W/m^2$ );

A: Área superficial do painel solar ( $m^2$ ).

A incógnita  $P_{ceu}$  está representada pela Eq. 7.

$$P_{ceu} = E1 * \sigma * A * (T_{sup}^4 - T_{ceu}^4) \quad (7)$$

em que:

E1: Poder emissivo da área superior do painel ( $W/m^2$ );

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $W/(m^2 * K^4)$ );

$T_{sup}$ : Temperatura da parte superior do painel (K);

$T_{ceu}$ : Temperatura da atmosfera (K).

A incógnita  $P_{chao}$  está representada pela Eq. 8.

$$P_{chao} = E2 * \sigma * A * (T_{inf}^4 - T_{chao}^4) \quad (8)$$

em que:

E2: Poder emissivo da área inferior do painel ( $W/m^2$ );

$T_{inf}$ : Temperatura da parte inferior do painel (K);

$T_{chao}$ : Temperatura da terra (K).

A incógnita  $P_{arsup}$  está representada pela Eq. 9.

$$P_{arsup} = (h1 + hfor1) * A * (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \quad (9)$$

em que:

$h1$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção natural da área superior ( $W/(m^2 * K)$ );

$hfor1$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção forçada da área superior ( $W/(m^2 * K)$ );

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente (K).

A incógnita  $P_{arinf}$  está representada pela Eq. 10.

$$P_{arinf} = (h2 + hfor2) * A * (T_{inf}^4 - T_{amb}^4) \quad (10)$$



em que:

$h_2$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção natural da área superior ( $W/(m^2 \cdot K)$ );

$h_{for2}$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção forçada da área superior ( $W/(m^2 \cdot K)$ );

A incógnita  $Parinf$  está representada pela Eq. 11.

$$Peletrica = eff * I * A \quad (11)$$

em que:

$eff$ : Eficiência do painel solar

A eficiência real do painel é calculada em função de sua temperatura e da eficiência máxima, sua modelagem é apresentada na Eq. 12.

$$eff = effmax - effmax * 0,005 * (Tsup - Teffmax) \quad (12)$$

em que:

$eff$ : Eficiência do painel solar;

$effmax$ : Eficiência máxima do painel solar;

$Teffmax$ : Temperatura do painel referente à eficiência máxima (K);

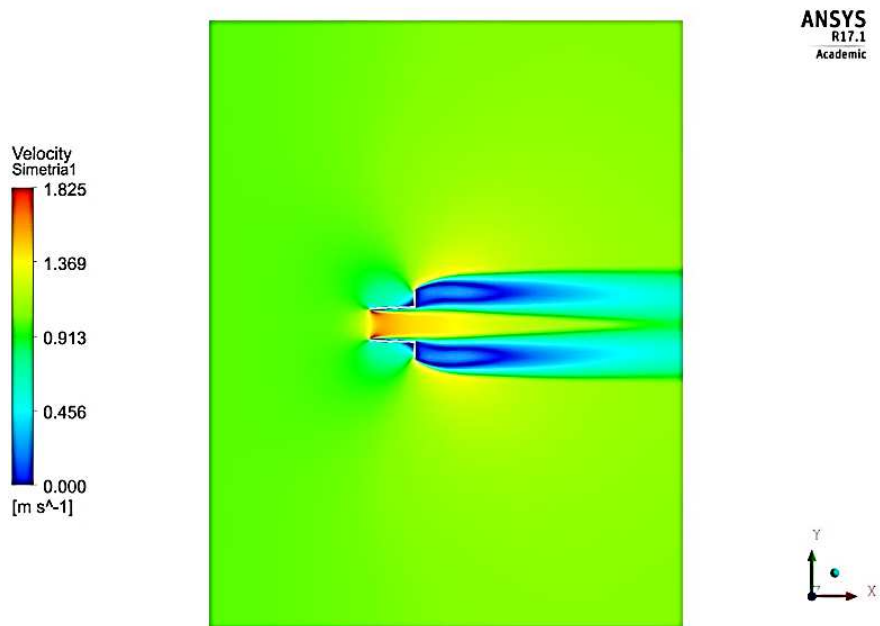
$Tsup$ : Temperatura da superfície do painel (K).

## 3 Resultados

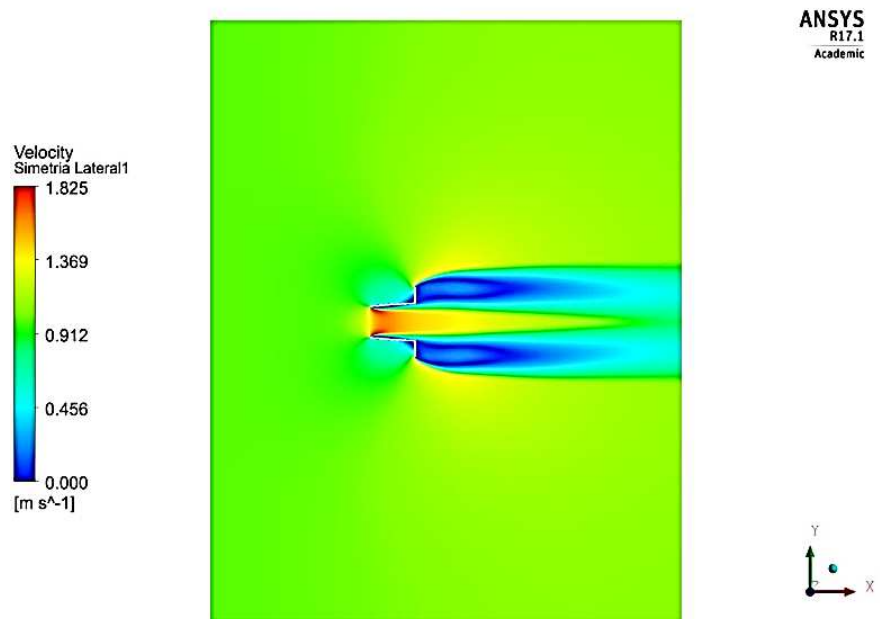
### 3.1 Análise Fluidodinâmica

A realização das simulações nas quatro geometrias permitiu a criação e análise dos perfis de velocidades que estão apresentados nas figuras 5 a 8. Uma análise da linha central do ambiente completo obteve-se a construção do gráfico apresentado na figura 9, permitindo a análise comparativa da velocidade de escoamento nos quatro casos estudados.

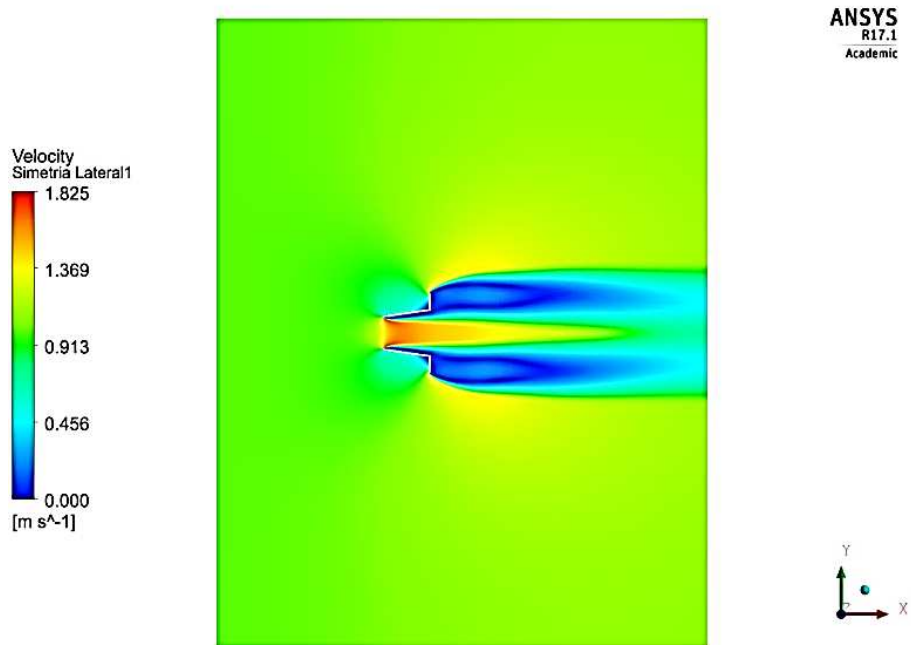
**Figura 5 – Perfil de Velocidade para 2° (Fonte: Próprio autor)**



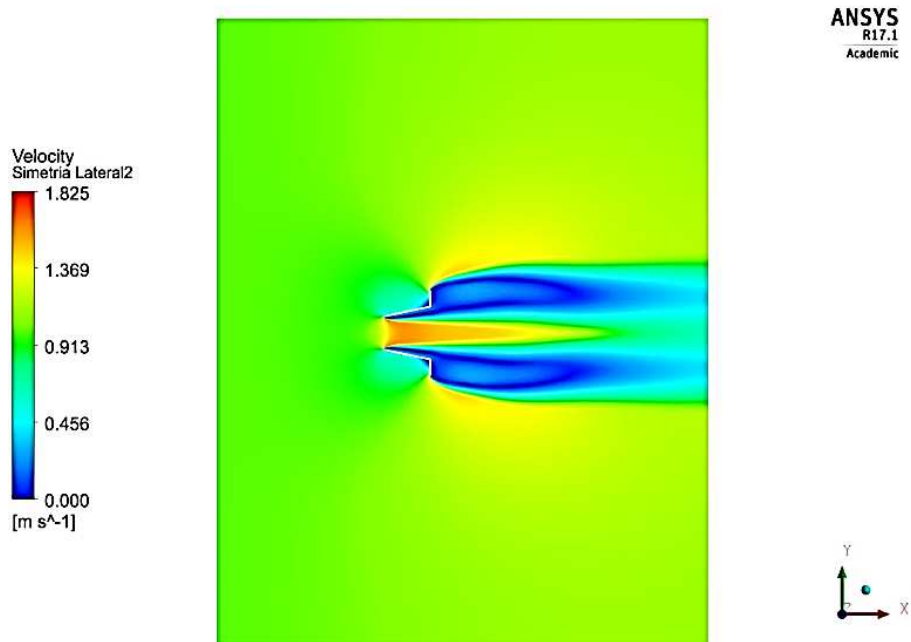
**Figura 6 – Perfil de Velocidade para 4° (Fonte: Próprio autor)**



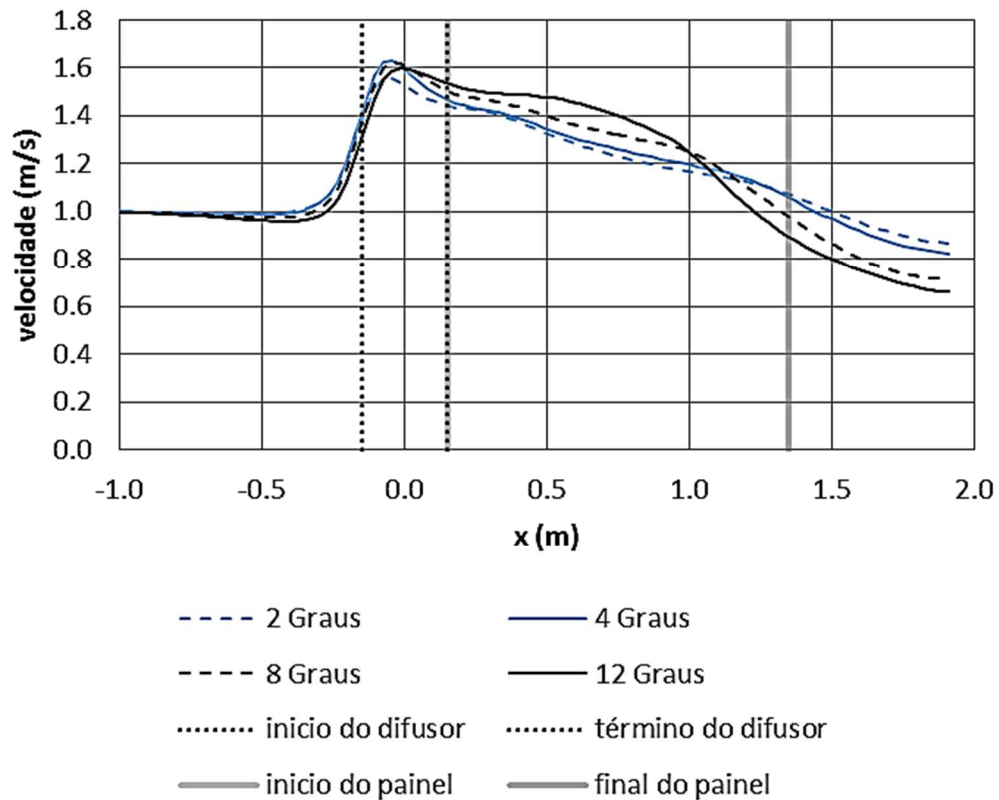
**Figura 7 – Perfil de Velocidade para 8°** (Fonte: Próprio autor)



**Figura 8 – Perfil de Velocidade para 12°** (Fonte: Próprio autor)



**Figura 9 – Análise de Velocidades** (Fonte: Próprio autor)



As médias das velocidades no trecho referente à extensão do painel, calculadas para realização da análise termodinâmica, são apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3 – Velocidade média sob o painel** (Fonte: Próprio autor)

Geometria	Velocidade(m/s)
2°	1,25
4°	1,27
8°	1,30
12°	1,32

### 3.2 Análise Termodinâmica

Para a realização da análise termodinâmica foi necessário o conhecimento das propriedades padrões de painéis solares comerciais, desta forma, as dimensões e propriedades consideradas para a realização do balanço de energia e análise da eficiência estão apresentados nas tabelas 4 e 5.

Através do cálculo das velocidades médias e dada a melhor performance do difusor com 12 graus de angulação, uma análise termodinâmica comparativa pôde ser realizada entre o

comportamento do painel sem a presença do difusor, onde a velocidade permanece a 1m/s, e considerando a velocidade média do vento de 1,32m/s. As análises foram realizadas considerando uma temperatura ambiente fixa de 25°C e com intensidades de irradiação solar variando de 400 a 900 W/m<sup>3</sup> em intervalos fixos de 100W/m<sup>3</sup>. Os resultados sob a eficiência de geração de energia podem ser observados através do gráfico apresentado na figura 10.

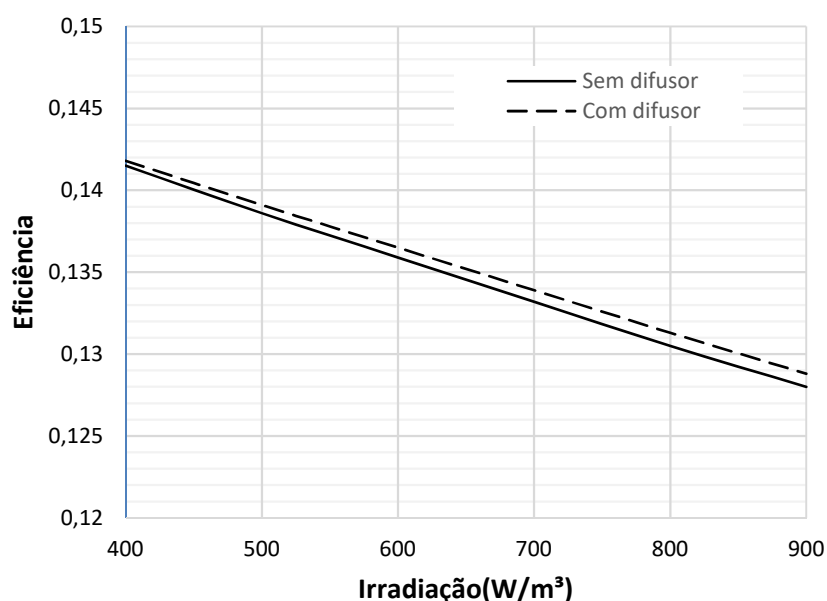
**Tabela 4 – Dimensões do painel solar** (Fonte: Próprio autor)

Dimensão	Medida(m)
<i>Largura</i>	<i>0,52</i>
<i>Comprimento</i>	<i>1,2</i>
<i>Espessura</i>	<i>0,01</i>

**Tabela 5 – Propriedades do painel solar** (Fonte: Próprio autor)

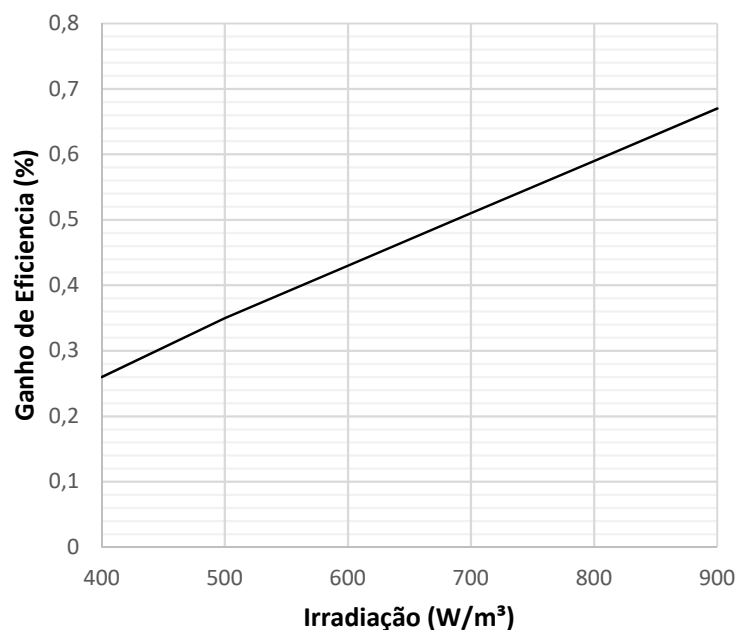
Propriedade	Valor
<i>Condutividade</i>	<i>148 W/(mK)</i>
<i>Emissividade da superfície superior</i>	<i>0,9</i>
<i>Emissividade da superfície inferior</i>	<i>0,5</i>
<i>Eficiência máxima (superfícies à 25°)</i>	<i>0,15</i>

**Figura 10 – Eficiências com e sem difusor** (Fonte: Próprio autor)



O resultado sobre a porcentagem de ganho pode ser observado no gráfico apresentado na figura 11.

**Figura 11 – Ganho de Eficiência** (Fonte: Próprio autor)



## 4 Conclusão

A aplicação de difusores com a geometria apresentada resultou em um aumento de velocidade de fluxo de ar considerável, principalmente para a angulação de 12°, onde houve um aumento médio de 32% no trecho referente à extensão do painel. O estudo termodinâmico do painel permitiu concluir que tal aumento de velocidade proporciona ganhos que variam de 0,25 a 0,67%, dependendo da irradiação solar em que o painel esteja submetido. Desta forma, a aplicação de carenagens de característica difusora representa um meio viável para o aumento da eficiência na geração de energia elétrica a partir do sol. É necessário ainda o aprofundamento de pesquisa para o estudo em outras angulações de abertura ou para a aplicação de tais carenagens em maiores escalas como em grandes parques solares.

## Referências

- Abe, K. e Ohya Y. (2004). An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. **92**:315-330.
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (2000). *Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres*. Acedido em 20 de maio de 2017, em: <http://www.cresesb.cepel.br/>.
- Elsafi, A.M. e Gandhidasan, P. (2015). Comparative study of double-pass flat and compound parabolic concentrated photovoltaic–thermal systems with and without fins. *Energy Conversion and Management*. **98**: 59–68.

- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. e Lavine, A.S. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6ª Edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro.
- Instituto Nacional de Meteorologia (1998). *Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. Versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície*. Acedido em 15 de fevereiro de 2018, em: <http://www.inmet.gov.br>.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2006). *Atlas Brasileiro de Energia solar*. Acedido em 20 de maio de 2017, em: <http://www.inpe.br/>.
- Jones, W.P. e Launder, B.E. (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **15**:301-314.
- Mattos G. M. (2016). *Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar*. Acedido em 03 de Maio de 2017 no Web site da: Universidade Federal do Rio de Janeiro: [www.poli.ufrj.br/](http://www.poli.ufrj.br/).
- Mojumdera, J.C., Chonga, W.T., Onga, H.C., Leongb, K.Y. e Abdullah-Al-Mamoon. (2016). An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy and Buildings*. **130**:272-285.
- Naphon, P. (2005). On the performance and entropy generation of the double-pass solar air heater with longitudinal fins. *Renew Energy*. **30**:1345–1357.
- Pinheiro, L.A.R., Junior, A.P.B. e Silva, E.C.M. (2016). Convecção Natural em Painéis Fotovoltaicos. *CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Fortaleza, Brasil, 21-25 Agosto 2016.
- Pottler, K., Sippel, CM., Beck, A. e Fricke, J. (1999). Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. *Solar Energy*. **67**:35–52.
- Teo, H.G., Lee, P.S., e Hawlader, M.N.A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*. **90**:309-315.
- Tonui, J.K. e Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renew Energy*. **32**:623-637.

## Authors Profiles:

**Thiago Lustosa Lima Dórea** student of mechanical engineering in the SENAI CIMATEC Technology School – Brazil, Salvador in 2018. He is now participating in the CAPES BRAFITEC exchange program at the Université Polytechnique Lyon 1 - France. His research interests are in the areas of Renewable Energy, Energy, Numerical Simulation and Automotive Engineering.

**Alex Álisson Bandeira Santos** has received a PhD from the Energy and Environment program of UFBA – Brazil, Salvador in 2010. He is now Pro-Rector of Post-Graduation and Research and Professor Researcher at the SENAI CIMATEC Technology School, and, Senior Member of the Brazilian Association of Engineering and Mechanical Sciences (ABCM). His research interests are in the areas of Energy, Industrial Combustion, Thermal Engineering, Industrial Maintenance, Energy Efficiency of Process and Industrial Equipment.

**Turan Dias Oliveira** has received a master's degree in Computer Modeling and Industrial Technology from the SENAI CIMATEC Technology School – Brazil, Salvador in 2015. He is now Professor and Researcher at the SENAI CIMATEC Technology School. His research interests are in the areas of Renewable Energy, Energy, Numerical Simulation, Energy Efficiency.

**João Pedro Brito de Andrade e Souza** student of mechanical engineering by the SENAI CIMATEC Technology School - Brazil, Salvador in 2018. He is now a mechanical engineering intern by Benteler within the Ford Northeast Industrial Complex. His interests are by renewable energy areas, focused on solar energy and automotive engineering