

Energia Solar e Eólica 2

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica 2

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica 2 [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-067-4

DOI 10.22533/at.ed.674192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO₂, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO₂, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO₂.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO₂ requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 10 |
| ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NOS CAMPI IFG ITUMBIARA E URUAÇU | |
| Sergio Batista da Silva Olívio Carlos Nascimento Souto Fernando Nunes Belchior Ghunter Paulo Viajante Elias Barbosa Macedo Vera Ferreira Souza | |
| DOI 10.22533/at.ed.6741922011 | |
| CAPÍTULO 2 | 24 |
| ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA INTEGRADA EM UM SHOPPING CENTER DE FORTALEZA - CE | |
| Sofia da Costa Barreto Paulo Cesar Marques de Carvalho | |
| DOI 10.22533/at.ed.6741922012 | |
| CAPÍTULO 3 | 41 |
| ESTUDO DO COMPORTAMENTO E QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ABACAXI SECADO EM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO | |
| Raphaela Soares da Silva Camelo Juliana Lobo Paes Milena Araujo Silva Madelon Rodrigues Sá Braz Dhiego Santos Cordeiro da Silva Camila Lucas Guimarães | |
| DOI 10.22533/at.ed.6741922013 | |
| CAPÍTULO 4 | 54 |
| ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE O CUINSE ₂ E SUA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS | |
| Yuri Hamayano Lopes Ribeiro Denis Gilbert Francis David Marcus Vinícius Santos da Silva Jailton Souza de Almeida | |
| DOI 10.22533/at.ed.6741922014 | |
| CAPÍTULO 5 | 66 |
| EXPERIÊNCIA DE CURSO GRATUITO DE INSTALADOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE OFERECIDO PELO IFTO CAMPUS PALMAS | |
| Claudio Silva dos Santos Abimael Ribeiro Martins Adail Pereira Carvalho Brunno Henrique Brito | |
| DOI 10.22533/at.ed.6741922015 | |
| CAPÍTULO 6 | 78 |
| IMPACTO DA LEI PALMAS SOLAR NA ANÁLISE FINANCEIRA DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO | |
| Isamara Quirino de Castro Carlos Brunno Henrique Brito | |

Felipe Tozzi Bittencourt
DOI 10.22533/at.ed.6741922016

CAPÍTULO 7 91

IMPACTOS DOS INCENTIVOS DOS GOVERNOS DO ESTADO E DO MUNICÍPIO NA MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO

Allan Carlos do Nascimento Silva
Brunno Henrique Brito

DOI 10.22533/at.ed.6741922017

CAPÍTULO 8 104

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DOIS GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS DIRETAMENTE NO BARRAMENTO C.C. DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS/MINIRREDES (GEDAE/UFPA)

Jorge Augusto Leal Corrêa
Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa
Marcos André Barros Galhardo
João Paulo Alves Veríssimo
Israel Hidai Lobato Lemos
Edinaldo José da Silva Pereira
João Tavares Pinho

DOI 10.22533/at.ed.6741922018

CAPÍTULO 9 121

INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Elismar Ramos Barbosa
Merlim dos Santos Ferreira de Faria
Fabio de Brito Gontijo

DOI 10.22533/at.ed.6741922019

CAPÍTULO 10 132

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO

Guilherme Marques Neves
Waldeir Amaral Vilela
Enio Bueno Pereira
Luiz Angelo Berni

DOI 10.22533/at.ed.67419220110

CAPÍTULO 11 146

INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA ATRAVÉS DE GERADOR DE VÓRTICE LONGITUDINAL DO TIPO DELTA

Felipe Augusto Santos da Silva
Leandro Oliveira Salviano

DOI 10.22533/at.ed.67419220111

CAPÍTULO 12 161

METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Marcus Vinícius Contes Calça
Matheus Rodrigues Raniero
Alexandre Dal Pai
Carlos Roberto Pereira Padovani
Domingos Mario Zeca Fernando

CAPÍTULO 13 174

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ABRIGOS DE PONTOS DE ÔNIBUS NA AV. ALMIRANTE BARROSO – BELÉM/PA

Ana Laura Pinheiro Ruivo Monteiro
Edinaldo José da Silva Pereira
Everton Leandro Santos Amaral
Ítalo de Sousa
Magda Tayane Abraão de Brito

DOI 10.22533/at.ed.67419220113

CAPÍTULO 14 191

PROJETO PRELIMINAR DE UM RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIR A IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL

Franciele Carlesso
Jenny Marcela Rodriguez Gomez
Luiz Angelo Berni
Graziela da Silva Savonov
Luis Eduardo Antunes Vieira
Waldeir Amaral Vilela
Edson Luiz de Miranda

DOI 10.22533/at.ed.67419220114

CAPÍTULO 15 200

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE FOGÕES SOLARES

Diego Lopes Coriolano
Erico Diogo Lima da Silva
Iraí Tadeu Ferreira de Resende
Vanina Cardoso Viana Andrade
Denilson Pereira Gonçalves
Renan Tavares Figueiredo
Odélsia Leonor Sanchez de Alsina

DOI 10.22533/at.ed.67419220115

CAPÍTULO 16 213

PROPOSTA DE RETROFIT NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E ESTUDO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UM DOS BLOCOS DA UTFPR EM CURITIBA

Larissa Barbosa Krasnhak
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.67419220116

CAPÍTULO 17 229

PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA OTIMIZAÇÃO DO GASTO PÚBLICO COM O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE DE ENSINO FEDERAL IMPLANTADA NA REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO

Adriano Moraes da Silva
Rebeca Lorena Santos Maia e Silva
Danielle Bandeira de Mello Delgado

DOI 10.22533/at.ed.67419220117

CAPÍTULO 18 246

PLATAFORMA PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA A AQUISIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Júlio César Madureira Silva
Augusto César da Silva Bezerra
Claudinei Rezende Calado
Ana Luiza F. Maia
Amanda Ribeiro Amorim

DOI 10.22533/at.ed.67419220118

CAPÍTULO 19 255

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE DADOS EM SERVIDOR REMOTO UTILIZANDO PLATAFORMAS OPEN SOURCE RASPBERRY PI E ARDUINO

José Ilton de Oliveira Filho
Wilk Coelho Maia

DOI 10.22533/at.ed.67419220119

CAPÍTULO 20 263

SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM GOIÂNIA: MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pedro Victor Valadares Romanholo
Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Enes Gonçalves Marra
Sérgio Pires Pimentel

DOI 10.22533/at.ed.67419220120

CAPÍTULO 21 275

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS SOLARIMÉTRICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA EMC/UFG

Jéssica Alice Alves da Silva
Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Sérgio Pires Pimentel
Enes Gonçalves Marra

DOI 10.22533/at.ed.67419220121

CAPÍTULO 22 290

TESTES DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES CUMULUS DO MODELO WRF PARA MELHORAR AS ESTIMATIVAS DE VENTO

Lucia Iracema Chipponelli Pinto
Francisco Jose Lopes de Lima
Fernando Ramos Martins
Enio Bueno Pereira

DOI 10.22533/at.ed.67419220122

CAPÍTULO 23 303

O ENSINO SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA NAS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

André Barra Neto
Ana Paula Pinheiro Zago
Márcia Helena da Silva
Mirian Sousa Moreira
José Eduardo Ferreira Lopes

DOI 10.22533/at.ed.67419220123

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 24 | 317 |
| POTENCIALIDADE DO BIOGÁS GERADO PELA CODIGESTÃO ENTRE DEJETO BOVINO E SUÍNO | |
| <ul style="list-style-type: none"> Juliana Lobo Paes Camila Ferreira Matos Gabriel Araújo e Silva Ferraz Giancarlo Bruggianesi Camila Kelly de Queiroz Caroline Stephanie Gomes de Castro Soares | |
| DOI 10.22533/at.ed.67419220124 | |
| CAPÍTULO 25 | 333 |
| SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL | |
| <ul style="list-style-type: none"> Marcus Godolphim de Castro Neves Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias Cassio Roberto Macedo Maia Ricardo Alan Verdú Ramos | |
| DOI 10.22533/at.ed.67419220125 | |
| CAPÍTULO 26 | 344 |
| ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE 24 MESES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE NO ESTADO DO TOCANTINS | |
| <ul style="list-style-type: none"> Brunno Henrique Brito Thálisson Câmara Belém Márcio Serafim de Almeida Felipe Tozzi Bittencourt | |
| DOI 10.22533/at.ed.67419220126 | |
| CAPÍTULO 27 | 359 |
| ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS | |
| <ul style="list-style-type: none"> Robson de Souza Santiago Bruno Lindbergh Sousa Yordanka Reyes Cruz Estevão Freire Suely Pereira Freitas Gisel Chenard Díaz | |
| DOI 10.22533/at.ed.67419220127 | |
| CAPÍTULO 28 | 376 |
| INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM AEROPORTOS SOBRE A SEGURANÇA DAS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS | |
| <ul style="list-style-type: none"> Francisco Wilson Falcão Júnior Paulo Cesar Marques de Carvalho Wilson Cabral de Sousa Júnior | |
| DOI 10.22533/at.ed.67419220128 | |
| SOBRE O ORGANIZADOR | 390 |

INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA ATRAVÉS DE GERADOR DE VÓRTICE LONGITUDINAL DO TIPO DELTA

Felipe Augusto Santos da Silva

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia de Energia
Rosana – São Paulo

Leandro Oliveira Salviano

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Departamento de Engenharia Mecânica
Ilha Solteira – São Paulo

RESUMO: Preocupações quanto aos impactos ambientais e a escassez dos recursos fósseis para a geração de energia tem motivado o desenvolvimento tecnológico de alternativas renováveis que complementem a matriz energética. Coletores solares de placa planas são utilizados em aplicações domésticas ou comerciais para o aquecimento de fluídos, minimizando a demanda por energia elétrica empregada para o aquecimento de água em chuveiros e piscinas, que muitas vezes onera a fatura de energia elétrica. Contudo, o desenvolvimento de tecnologias que intensifique a conversão da energia solar para a energia térmica ainda permanece como uma importante área de desenvolvimento para aumentar a eficiência do sistema solar. Geradores de vórtices longitudinais (GVL) do tipo delta-winglet são técnicas passivas consolidadas aplicadas em trocadores de calor compactos, mas que ainda são pouco utilizadas na área

solar térmica. Aplicando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), neste trabalho avaliamos o processo de intensificação da transferência de calor através da aplicação de GVL do tipo delta-winglet no interior dos tubos de um coletor solar de placa plana. A melhor razão entre a transferência de calor e a perda de carga foi verificada para o ângulo de ataque dos GVL de 30°, enquanto a maior transferência de calor foi atingida para o ângulo de ataque igual a 45°, independentemente do número de Reynolds (300, 600 ou 900). Além disso, os geradores de vórtices 1 e 2 apresentaram impacto significativo apenas no fator de atrito, podendo ser eliminados sem prejuízo à transferência de calor.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar, Coletor solar, Intensificação da transferência de calor

ABSTRACT: Continental concerns about the environmental impacts and the scarcity of fossil energy resources for generation of energy has progressively motivated the technological development of alternatives from renewable sources that could complement the energy matrix. Flat plate solar collectors could be used in domestic or commercial applications for fluid heating, minimizing the demand for electricity which is traditionally used for water heating in showers and swimming pools. It often increases a lot the electric bill. However, the development

of technologies that improve the process of energy conversion from solar radiation to thermal energy remains an important development area to increase the efficiency of solar system. Longitudinal vortex generators type delta-winglet are important passive techniques applied in compact heat exchangers, but it is few applied on solar thermal area. Through Computational Fluid Dynamics (CFD), this work evaluates the process of augmentation of heat transfer by vortex generators type delta-winglet on a flat plate solar collector. The high argumentation ratio between heat transfer and pressure drop is verified for the attack angle of vortex generator at 30° , whereas the higher heat transfer is achieved for attach angle of 45° , for all Reynolds number evaluated (300, 600 and 900). Moreover, the vortex generator 1 and 2 just impact on friction factor and for this case could be suppressed without significant impact on overall transfer.

KEYWORDS: Solar Energy, Solar collector, Augmentation of Heat Transfer

1 | INTRODUÇÃO

A incidência da radiação solar sobre o globo terrestre desempenha um papel fundamental para a vida na Terra e é aplicada em muitas atividades humanas. Uma importante aplicação é a conversão da energia solar em energia térmica ou elétrica (KEMERICH et al., 2016). Esse processo tem ganhado cada vez mais atenção devido ao aumento populacional e, conseqüentemente, o aumento da demanda por energia. Além disso, preocupações quanto aos impactos ambientais e a escassez dos recursos de origem fóssil para a geração de energia pressionam para que a conversão da energia solar seja cada vez mais empregada, ocupando um papel fundamental entre as fontes de energias renováveis. Visto isso, políticas públicas têm incentivado a utilização da energia solar em residências populares, principalmente o uso de coletores solares para o aquecimento de água, enfatizando a necessidade de desenvolvimento de pesquisas que visem o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de coletores a baixo custo que apresentem maior eficiência de conversão (MARQUES, 2015).

Nacionalmente a utilização da energia solar como fonte alternativa é ainda mais interessante, pois o Brasil é um dos países mais propensos à radiação solar durante todo o ano, por estar localizado na zona intertropical do planeta (TIBA, 2000). Dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006 mostram que apesar da região Sul ter o menor potencial de energia solar no Brasil, com radiação média global de $5,2 \text{ kW/m}^2$, isto representa uma diferença de aproximadamente de 11,8% em relação ao maior índice brasileiro na região Nordeste, com radiação média global de $5,9 \text{ kW/m}^2$.

Assim, considerando este relevante potencial de aproveitamento da energia proveniente da incidência solar, prospecta-se a possibilidade de diminuir a dependência do petróleo e do equilíbrio na geração de energia elétrica em épocas de estiagem, visto que na matriz energética brasileira as hidrelétricas se destacam. A conversão direta da radiação solar em energia térmica para o aquecimento da água de chuveiros

e piscinas para uso doméstico ou comercial pode gerar uma economia significativa na fatura de energia elétrica, uma vez que o aquecimento de água pode ser responsável pela maior parcela na fatura mensal de energia (PEREIRA et al., 2006).

Coletores solares são muito utilizados para realizar a conversão da energia solar para energia térmica em fluídos, no entanto, o aumento da eficiência da transferência de calor ainda é um desafio (SHUKLA et al., 2013). Estudos de técnicas passivas, caracterizadas pela modelagem da arquitetura dos coletores, tem conquistado um espaço importante nas pesquisas (LIU; SAKR, 2013). Uma linha bastante explorada é a utilização de fitas torcidas (*Twisted-taped*) para o aumento da transferência de calor nos tubos circulares por onde passa o fluído em um coletor solar de placa plana. Entretanto, a inserção destes dispositivos no interior dos tubos causa uma perda de carga elevada, exigindo, desta forma, maior potência de bombeamento do fluído podendo tornar o sistema economicamente inviável (GARG et al., 2016).

Como alternativa, esse trabalho propõe a utilização de geradores de vórtices longitudinais do tipo *delta-winglet* para intensificar a transferência de calor em um coletor solar de placa plana, a partir da simulação computacional, desde que uma das principais características termo hidráulicas desta técnica é promover o aumento significativo da transferência de calor com moderada perda de carga (LEI et al., 2017). Além disso, são dispositivos geometricamente simples e podem ser facilmente produzidos pelos atuais processos de manufatura industrial.

2 | METODOLOGIA COMPUTACIONAL

2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

A modelagem numérica da transferência de calor e do escoamento de um fluido no interior de um tubo de seção transversal circular considera as hipóteses de escoamento incompressível e tridimensional, regime permanente e laminar, (CHESHMEH, 2012). Considerando um fluido Newtoniano com propriedades constantes, as equações da Continuidade, *Momentum* e Energia, podem ser definidas, respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h_i - k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = -u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

2.2 PARÂMETROS TERMO HIDRÁULICOS

O escoamento em um tubo circular é caracterizado pelo número de *Reynolds* (Re) e é calculado em função do diâmetro do tubo, Eq. (4). Os parâmetros para o cálculo da transferência de calor e da perda de pressão são expressos pelo número de *Nusselt* (Nu) e fator de atrito (f), respectivamente, definidos pela Eq. (5) e Eq. (6).

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{h D}{k_f} \quad (5)$$

$$f = \frac{2 \Delta p}{\rho u^2} \frac{D}{L_T} \quad (6)$$

Onde, u é a velocidade média (m/s), ρ é a densidade (Kg/m³), μ é a viscosidade cinemática do fluido (Kg/m.s), k_f a condutividade térmica do fluido (W/m.K), D é o diâmetro do tubo (m), h é o coeficiente de transferência de calor (W/m².K), p é a pressão (Pa) e L_T o comprimento.

A perda de pressão (Δp) é calculada a partir da diferença de pressão entre a entrada (*Inlet*) e a saída (*Outlet*) do domínio computacional, expressa pela Eq. (7).

$$\Delta p = \bar{P}_{Outlet} - \bar{P}_{Inlet} \quad (7)$$

Onde:

$$\bar{p} = \frac{\iint_A p dA}{\iint_A dA} \quad (8)$$

Por fim, o coeficiente da transferência de calor convectiva é determinado de acordo com a equação:

$$h = \frac{q''}{(T_W - T_M)} \quad (9)$$

Onde T_W e T_M é a temperatura média na parede do tubo e a temperatura média do domínio, respectivamente.

2.3 DOMÍNIO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Considerando a simetria geométrica do coletor solar de placa plana, o domínio computacional considera apenas um único tubo (flauta), reduzindo o custo computacional e, conseqüentemente, o tempo de processamento. As características geométricas e

operacionais do coletor solar avaliados são semelhantes aos equipamentos aplicados em residências assistidas por programas sociais do governo federal. Idealizou-se uma placa de 0,98 m disposta de forma simétrica na direção do eixo-x e deslocada 0,0008 m (e) na direção negativa do eixo-y no interior do tubo, para suportar dez geradores de vórtices do tipo *delta-winglet* espaçados igualmente ao longo da placa.

O tubo possui diâmetro de 0,00952 m (3/8") e 1 m de comprimento. A vazão de água normalmente verificada neste tipo de coletor solar, medida no tubo principal de alimentação, varia entre 75 a 220 litros por horas (l/h). O coletor solar comercial considerado tem nove tubos paralelos. Desta forma, considerando a situação ideal de uniformidade na distribuição de água entre os tubos, adotou-se as vazões de 8,3, 16,6 e 24,4 l/h por tubo, o que representa os números de *Reynolds* de 300, 600 e 900, respectivamente. Os geradores possuem razão de aspecto 2, onde a base é duas vezes a altura (a) de 0,004 m, como pode ser visto na Figura 1.

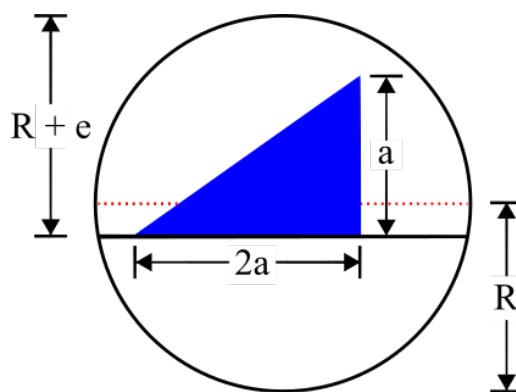


Figure 1 - Plano Transversal do Domínio Computacional

Na entrada do domínio (*Inlet*) computacional e na saída (*Outlet*) são adotados velocidade prescrita e pressão prescrita, respectivamente. Sobre a superfície do tubo é definido um fluxo de calor médio constante de 750 W/m^2 . A transferência de calor conjugada (condução/convecção) é considerada nos geradores de vórtices e na placa. O escoamento na parede do tubo, assim como nos geradores de vórtices e na placa, é considerado sem escorregamento. Foram analisados três ângulos de ataque para os geradores de vórtices *delta-winglet*, sendo os ângulos de 15° , 30° e 45° . A Figura 2 mostra o domínio computacional submetido a um fluxo de calor constante com os dez gerados de vórtices espaçados igualmente ao longo da placa no interior do tubo.

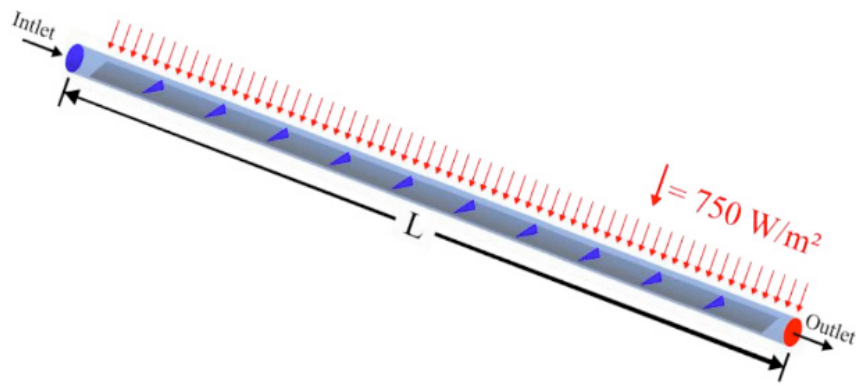


Figure 2 - Domínio Computacional

2.4 INDEPENDÊNCIA DE MALHA E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A análise de independência de malha, com os geradores de vórtices, considera a metodologia *GCI - Grid Convergence Index* proposto por (DIVISION et al., 2008). A Tabela 1 mostra as três diferentes densidades de malhas avaliadas:

| | Quantidade de elementos | Fator de refinamento, $r = \left(\frac{G_n}{G_{n+1}} \right)^{\frac{1}{3}}$ |
|------------------|-------------------------|---|
| Grid 1 (G_1) | 436.323 | - |
| Grid 2 (G_2) | 974.060 | 1,31 |
| Grid 3 (G_3) | 2.152.009 | 1,30 |

Tabela 1 – Características da malha para cada *Grid*.

Segundo (DIVISION et al., 2008), é desejável que o Fator de Refinamento seja maior que 1,30 e, conforme é mostrado na Tabela 1, a recomendação é seguida em relação as densidades de malha. O procedimento para se obter o GCI foi aplicado para o número de *Nusselt* e fator de atrito considerando a situação mais crítica, ou seja, número de *Reynolds* igual a 900 e ângulo de ataque do gerador de vórtice de 45°. Na Tabela 2, é mostrado que a maior incerteza é de 1,94% para o fator de atrito. Assim, considerando o baixo valor do GCI, a independência de malha é atingida e a malha intermediária (*Grid 2*) pode ser utilizada para as demais configurações dos geradores de vórtices.

| GCI (%) | |
|-------------------|------|
| Número de Nusselt | 1,27 |
| Fator de Atrito | 1,94 |

Tabela 2 - *Grid Convergence Index*.

Os elementos de malha *Grid 2* foram avaliados a partir do critério “*Orthogonal Quality*”. Este parâmetro é calculado considerando os vetores normais para determinar os cossenos de cada face dos tetraedros, obtendo a ortogonalidade dos elementos, que deve estar entre 0 e 1. Em malhas tetraédricas, a qualidade da malha é considerada satisfatória quando o valor de ortogonalidade se aproxima do valor unitário. Desta forma, considerando o valor médio obtido de 0,90083, os elementos de malha *Grid 2* são considerados adequados para os propósitos do presente trabalho.

A validação do modelo é feita comparando os resultados da simulação numérica com os valores teóricos. Segundo (INCROPERA et al., 2014), o valor de *Nusselt* para um escoamento interno em regime laminar e completamente desenvolvido em tubos circulares, com fluxo de calor constante sobre superfície, deve ser de 4,36 e o fator de atrito é definido pela Eq. (10):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

Contudo, considerando os resultados para o número de *Reynolds* igual a 900 e escoamento interno em um tubo liso, a Figura 3 mostra que a diferença entre os resultados numéricos e teóricos para o número de *Nusselt* e o fator de atrito são de 3,54% e 2,54%, respectivamente. Desta forma, os resultados da modelagem numérica são considerados satisfatórios.

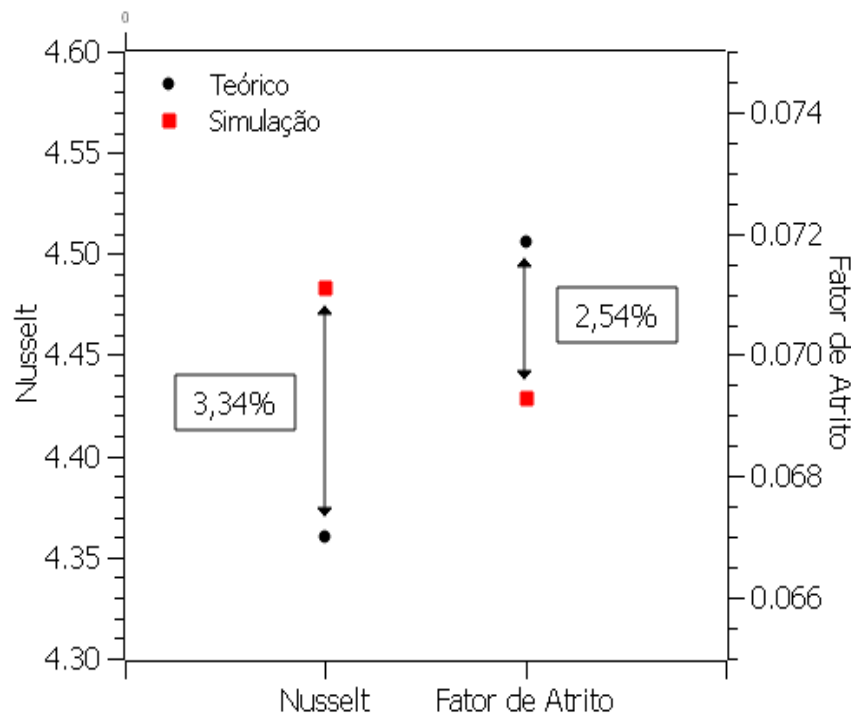


Figura 3 - Gráfico da validação do modelo computacional.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação numérica foi realizada no pacote comercial *ANSYS* 18.0. A Figura 4 apresenta a razão de intensificação da transferência de calor em função da inserção dos geradores de vórtices (Nu) em relação do tubo liso (Nu_0). Como pode ser observado, a intensificação na transferência de calor foi significativamente alcançada para os três números de *Reynolds* e ângulos de ataque avaliados. Ângulos de ataque maiores resultaram no aumento mais significativo da transferência de calor, independentemente do número de *Reynolds*, entretanto, é evidente também a maior dificuldade em intensificar a transferência de calor para baixo número de *Reynolds* ($Re = 300$), apesar da notável intensificação de mais de 40% para o ângulo de ataque igual a 45° .

O processo de intensificação da transferência de calor por meio de geradores de vórtices também resulta no aumento da perda de carga do sistema, avaliado através do fator de atrito. A Figura 5 mostra os resultados da razão entre o fator de atrito (f) com geradores de vórtices e o fator de atrito (f_0) considerando o tubo liso. Como pode ser observado, o aumento no ângulo de ataque dos geradores de vórtices *delta-winglet* está diretamente ligado ao aumento da perda de carga, independentemente do número de *Reynolds*. O aumento no número de *Reynolds* também provoca a elevação na penalização na perda de carga. Conforme mostrado na Figura 4, a maior razão de intensificação na transferência de calor é alcançada para o ângulo de ataque de 45° ; porém, para este ângulo é também observado a maior razão do fator de atrito.

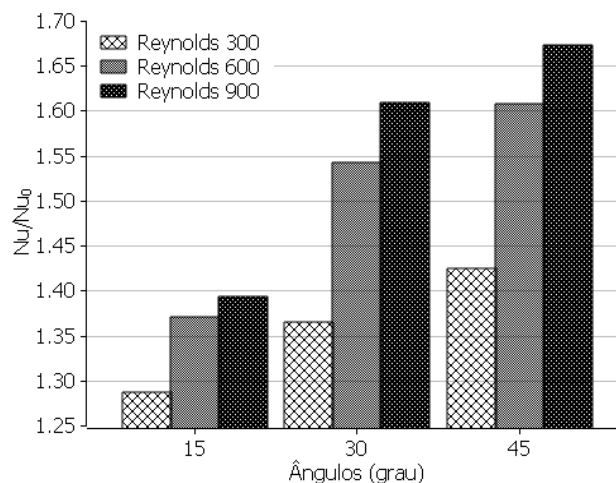


Figura 4 - Aumento do número de *Nusselt*.

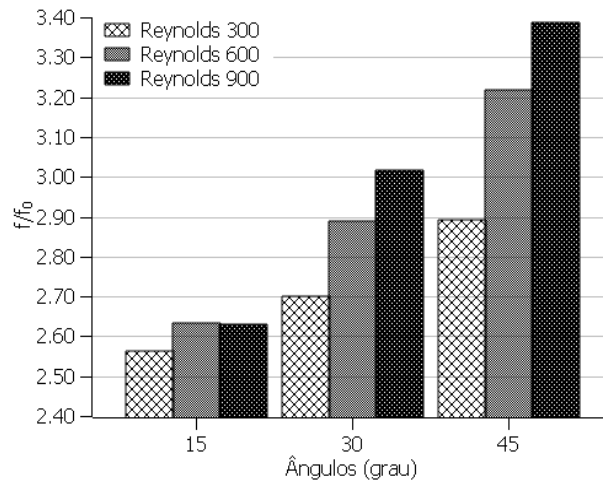


Figura 5 - Aumento do fator de atrito.

Deste modo, a bem-sucedida aplicação das técnicas passivas no processo de intensificação da transferência de calor deve apresentar boa relação entre o aumento da transferência de calor e a perda de carga associada. Assim, como pode ser visto na Figura 6, a melhor relação é alcançada para o ângulo de ataque de 30° e número de *Reynolds* 600 e 900. Outra relação interessante é observada para o ângulo de ataque de 15° e número de *Reynolds* 900, pois apesar da baixa intensificação da transferência de calor para o ângulo de ataque de 15°, evidenciado na Figura 4, o impacto na perda de carga associada é também relativamente baixo. Apesar de indicar a maior razão de transferência de calor (Figura 4), o ângulo de ataque de 45° apresenta as piores relações entre o aumento da transferência de calor e a perda de carga associada para os três números de *Reynolds* analisados.

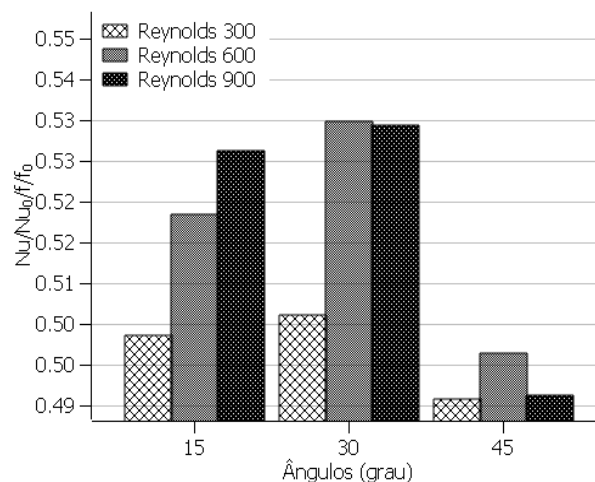


Figura 6 - Relação entre o aumento da transferência de calor e perda de carga associada.

As Figura 7, Figura 8 e Figura 9 mostram os impactos dos geradores de vórtices no escoamento do fluido ao longo do tubo para os números de *Reynolds* de 300, 600 e 900, respectivamente. As características termo hidráulicas são avaliadas observando o comportamento do número de *Nusselt* e do fator de atrito para os ângulos de ataque

de 30° e 45°, que representam a melhor e a pior relação entre a transferência de calor e o fator de atrito, respectivamente, como apresentado na Figura 6. A Tabela 3 indica a posição de cada gerador de vórtice *delta-winglet* sobre a placa no interior do tubo.

| Gerador de vórtice | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Posição (m) | 0,059 | 0,157 | 0,255 | 0,353 | 0,451 | 0,549 | 0,647 | 0,745 | 0,843 | 0,941 |

Tabela 3 - Posição dos geradores de vórtices ao longo do tubo.

São evidentes o impacto local e a jusante dos geradores de vórtices ao longo do tubo, tanto para a transferência de calor quanto para a perda de carga. Além disso, o aumento no ângulo de ataque aumento a transferência de calor com significativa penalização na queda de pressão do escoamento, corroborando com os resultados apresentados nas Figura 4 e 5. Nota-se também, independentemente do número de *Reynolds*, que o desenvolvimento da camada limite no início do tubo resulta na maior transferência de calor e também na maior perda de carga, como consequência dos maiores gradientes de propriedade. Assim, o impacto dos geradores de vórtice 1 e 2 influenciam significativamente apenas no fator de atrito, podendo, desta forma, serem eliminados sem prejuízo considerável à transferência de calor e com significativo benefício na redução da perda de carga global do sistema. Finalmente, o comportamento de *Nusselt* e do fator de atrito pode ser considerado periódico a partir do gerador de vórtice 4, localizado na posição 0,353 m, conforme a Tabela 3.

Os aspectos termo hidráulicos são analisados a partir dos campos de velocidade e temperatura em planos transversais, conforme mostrados nas Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente. A análise considera o escoamento próximo ao gerador de vórtice 5, quando o número de *Nusselt* e o fator de atrito já se comporta de forma periódica, conforme evidenciado na Figura 7, Figura 8 e Figura 9. Novamente, são considerados para análise a melhor (ângulo de ataque de 30°) e a pior (ângulo de ataque de 45°) relação entre a transferência de calor e perda de carga, além do tubo liso (*Smooth*) que é o referencial para comparação.

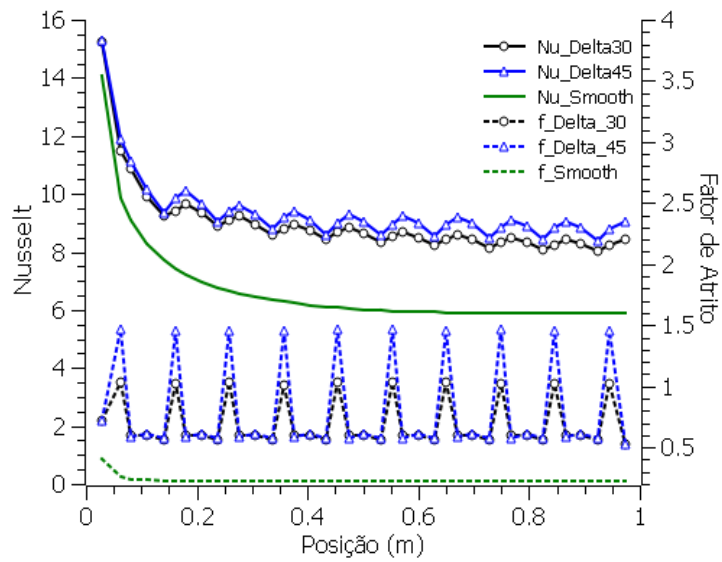


Figura 7 - Comportamento de *Nusselt* e fator de atrito ao longo do tubo para *Reynolds* 300.

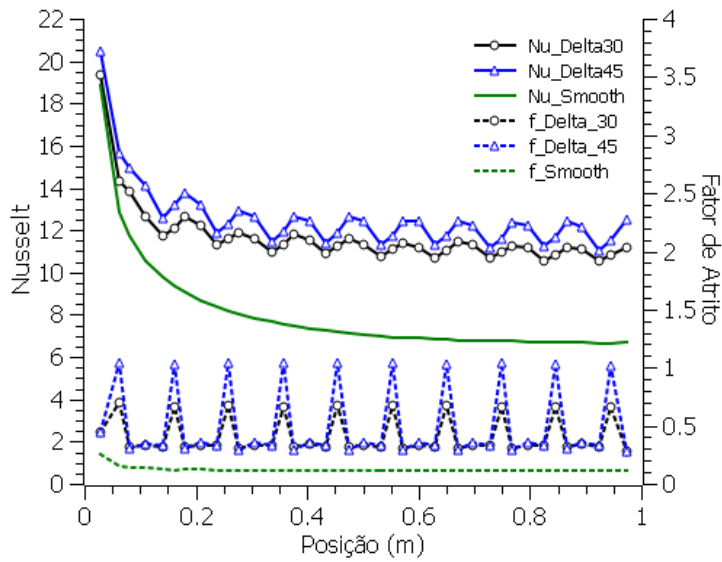


Figura 8 - Comportamento de *Nusselt* e fator de atrito ao longo do tubo para *Reynolds* 600.

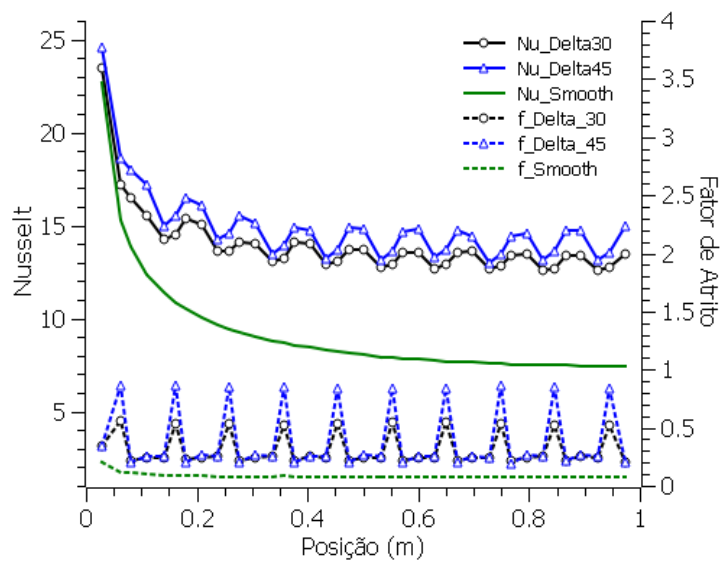


Figura 9 - Comportamento de *Nusselt* e fator de atrito ao longo do tubo para *Reynolds* 900.

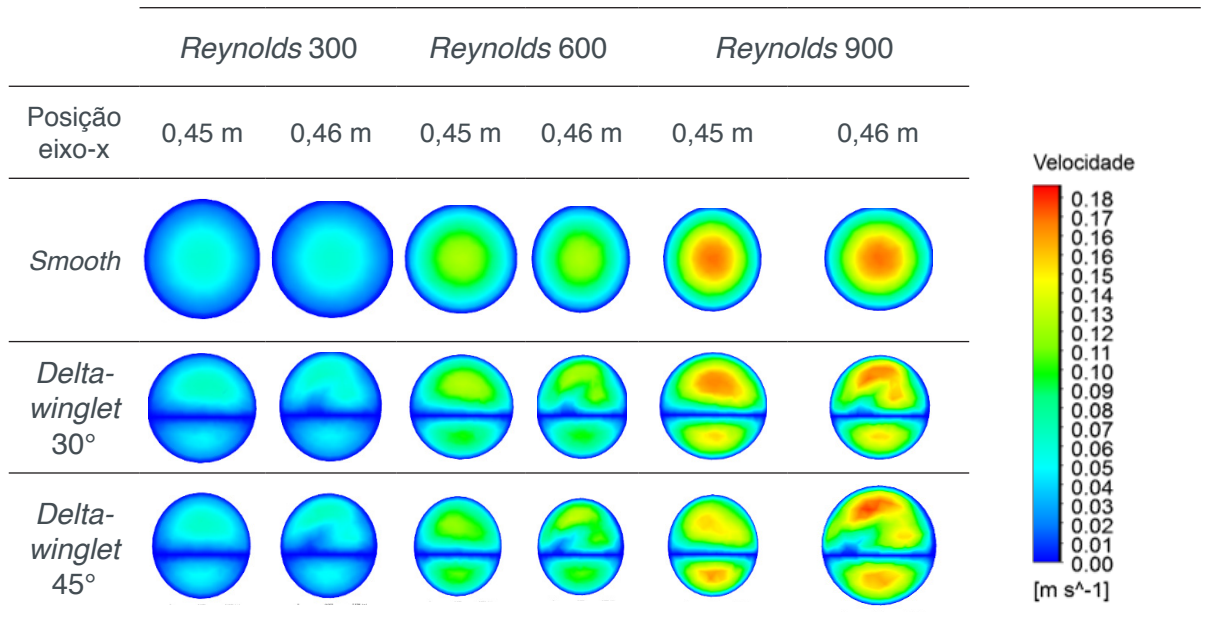


Tabela 4 - Velocidade nos planos transversais do tubo antes e depois do gerador de vórtice *delta-winglet 5*

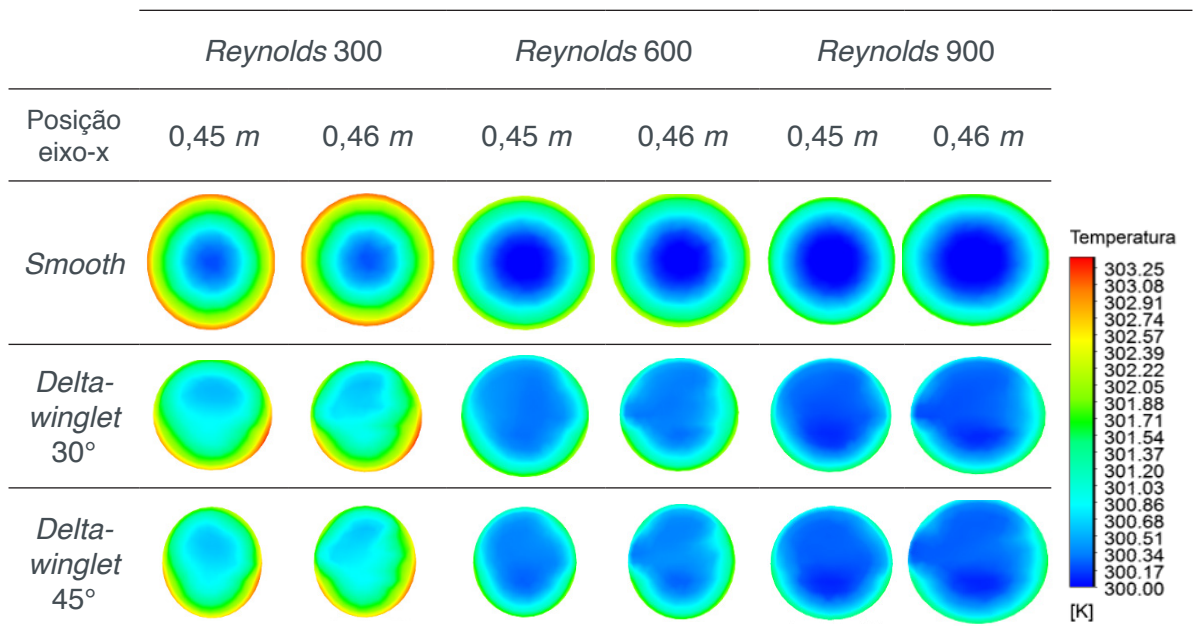


Tabela 5 - Temperatura nos planos transversais do tubo antes e depois do gerador de vórtice *delta-winglet 5*

A Tabela 4 mostra que para o tubo liso (*Smooth*) o comportamento do escoamento do fluido é parabólico, com maior aceleração no centro da sessão transversal. Para os tubos com geradores de vórtices identifica-se uma maior aceleração do fluido próxima a parede do tubo após o gerador de vórtice 5. A aceleração do fluido é mais evidente conforme aumenta o ângulo de ataque. A distorção do escoamento é provocada pela geração do escoamento secundário longitudinal em função da inserção dos geradores de vórtices. O vórtice longitudinal gerado aumenta a mistura entre as correntes frias e quentes, conforme é mostrado na Tabela 5, além de reduzir a espessura das camadas limites térmica e dinâmica.

Apesar do deslocamento da placa no eixo-y ter sido inicialmente idealizado para que fosse possível um maior fluxo mássico na região dos geradores de vórtices, os planos transversais de velocidade mostram que em função da maior resistência ao escoamento, o fluxo indicou a tendência de deslocar-se para a parte de baixo da placa, evidenciado pela maior aceleração na parte de baixo do tubo com geradores de vórtices a 45°. Desta forma, os resultados indicam que a hipótese inicialmente adotada quanto a instalação dos geradores de vórtices sobre a placa deslocada deve ser reavaliada, e a condição simétrica pode ser uma opção mais adequada. Finalmente, para número de *Reynolds* baixo a difusão da energia térmica é bastante acentuada, conforme mostra a Tabela 5, caracterizando a dificuldade de intensificar a transferência de calor mostrada na Figura 4. Este comportamento é sensivelmente diferente conforme pode ser visto no campo de velocidade e temperatura para a condição de 45° e número de *Reynolds* 900.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, analisou-se a aplicação de geradores de vórtices longitudinais do tipo *delta-winglet* para o aumento da eficiência de conversão térmica de coletor solar de placa plana, comercialmente aplicado em residências assistidas por ações governamentais. O desempenho da transferência de calor e da perda de carga foram analisados numericamente por meio da modelagem computacional realizada no software comercial ANSYS 18.0. Os parâmetros geométricos dos geradores de vórtices *delta-winglet* foram os ângulos de ataque de 15°, 30° e 45°, e as características operacionais correspondem aos números de *Reynolds* de 300, 600 e 900.

Os resultados permitem concluir que:

- A aplicação de geradores de vórtices *delta-winglet* para intensificar a transferência de calor em coletores solares de placa plana é uma técnica passiva muito efetiva;
- A intensificação da transferência de calor a partir de técnicas passivas é preponderantemente dificultada em baixo número de *Reynolds*;
- As melhores relações entre a transferência de calor e a perda de carga associada aconteceram com os geradores de vórtices posicionados com ângulo de ataque de 30°, independentemente do número de *Reynolds*;
- A maior transferência de calor é obtida para o ângulo de ataque de 45°, entretanto, para esta configuração é também verificada a maior penalização na perda de carga do sistema;
- Os geradores de vórtices 1 e 2 apresentam impacto significativo apenas no fator de atrito, podendo ser eliminados sem prejuízo a transferência de calor.

5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de iniciação científica (Processo: 2017/00608-0) e fomento (Processo: 2016/14620-9). À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Experimental de Rosana/SP, por fornecer o apoio institucional para o desenvolvimento de pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- CHESHMEH, A. Velocity Boundary Layer Analysis of a Flat Plate Heat Exchanger in Laminar Flow : A Case Study. v. 2, n. 6, p. 310–314, 2012.
- DIVISION, F. E. et al. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. v. 130, n. July, p. 128–131, 2008.
- GARG, M. O. et al. Heat transfer augmentation using twisted tape inserts : A review. v. 63, p. 193–225, 2016.
- INCROPERA, F. et al. **Fundamentos de Transfêrencia de Calor e Massa**. 7. ed. [s.l.: s.n.].
- KEMERICH, P. DA C. et al. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 20, n. 1, p. 241–247, 2016.
- LEI, Y. et al. Improving the thermal hydraulic performance of a circular tube by using punched delta-winglet vortex generators. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 111, p. 299–311, 2017.
- LIU, S.; SAKR, M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 64–81, 2013.
- MARQUES, R. Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios. 2015.
- PEREIRA, E. B. et al. **Brazilian Atlas of Solar Energy**. [s.l.: s.n.].
- SHUKLA, R. et al. Recent advances in the solar water heating systems : A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 173–190, 2013.
- TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, v. 1, p. 111, 2000.

SOBRE O ORGANIZADOR:

Paulo Jayme Pereira Abdala possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-067-4

