

AValiação DO ESCOAMENTO NA CASCATA T106 COM OS MODELOS SPALART-ALLMARAS E γ - Re_θ

David Luiz Silva Rodrigues ⁽¹⁾ (rsdavid35@aluno.ufsj.edu.br), Rafael Romão da Silva Melo ⁽¹⁾
(rafaelmelo@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos

RESUMO: *A compreensão do escoamento em turbinas de baixa pressão, componente relevante de turbinas a gás, é de grande relevância para implementação de melhorias nesse dispositivo. Para o estudo desse componente, recorre-se, com frequência, a análise de cascatas de pás bidimensionais. Tais estudos se dividem em métodos experimentais e de fluidodinâmica computacional (CFD, sigla do inglês). Nesse cenário, o presente trabalho modelou o escoamento na cascata de pás T106 com a ferramenta open-source OpenFOAM e comparou os resultados com dados experimentais da literatura. Os modelos Spalart-Allmaras e γ - Re_θ foram usados para previsão da separação do escoamento na superfície de sucção das pás e para verificação dos perfis de velocidade na região da esteira. Ambos modelos conseguiram modelar a esteira de forma satisfatória, e somente o modelo γ - Re_θ pôde prever a separação do escoamento, com comprimento de 22% da corda da pá. Dessa forma, também foi possível verificar o desempenho de modelos de turbulência com custo computacional viável e disponíveis em ferramentas livres.*

PALAVRAS-CHAVE: MODELAGEM, TURBULÊNCIA, TRANSIÇÃO, T106, OPENFOAM.

EVALUATION OF FLOW IN THE T106 CASCADE WITH THE SPALART-ALLMARAS AND γ - Re_θ MODELS

ABSTRACT: *Understanding the flow in low pressure turbines, a relevant component of gas turbines, is of great relevance for implementing improvements in this device. To study this component, analysis of two-dimensional blade cascades is often used. Such studies are divided into experimental and computational fluid dynamics (CFD) methods. In this scenario, the present work modeled the flow in the T106 blade cascade with the open-source tool OpenFOAM and compared the results with experimental data from the literature. The Spalart-Allmaras and γ - Re_θ models were used to predict the flow separation on the blade suction surface and to verify the velocity profiles in the wake region. Both models were able to model the wake satisfactorily, and only the γ - Re_θ model was able to predict the flow separation, with a length of 22% of the blade chord. In this way, it was also possible to verify the performance of turbulence models with a viable computational cost and available in free tools.*

KEYWORDS: MODELING, TURBULENCE, TRANSITION, T106, OPENFOAM.

1. INTRODUÇÃO

A otimização de componentes de turbinas a gás é fundamental para o desempenho global desses equipamentos, além possibilitar a redução de custos e do impacto no meio ambiente (Misirlis et al., 2020). Entre os componentes, destaca-se a turbina de baixa pressão, pois, de acordo com Saha e Ranjan (2021), sua eficiência está fortemente ligada a redução do consumo específico de combustível. Sendo assim, o estudo de turbinas de baixa pressão pode ser feito através da compreensão das características do escoamento.

As turbinas de baixa pressão operam com número de Reynolds Re de $0,3 \cdot 10^5$ a $3 \cdot 10^5$. Dessa forma, a camada limite na superfície das pás tende a ser laminar e, na superfície de sucção, há tendência de transição à turbulência e separação do fluxo por conta da presença de um gradiente de pressão adverso, causado pela geometria das pás (Wang et al., 2021). Merece foco, em especial, os mecanismos de transição para a turbulência.

Tal processo sofre influência de parâmetros do escoamento, como intensidade da turbulência I e gradiente de pressão, além da rugosidade superficial. Da combinação desses parâmetros, um dos modos de transição é favorecido, conforme descrevem Marciniak, Kügeler e Franke (2010).

- Transição natural e *by pass*: ocorre devido à amplificação de instabilidades na camada limite laminar. O modo normal ocorre em baixos valores de intensidade da turbulência e o *by pass* em altos valores de intensidade da turbulência.
- Transição induzida por separação: na presença de um forte gradiente de pressão adverso, o escoamento se separa da parede e, em contato com o fluxo livre, rapidamente torna-se turbulento. Além disso, em turbinas de baixa pressão, esse modo se destaca.
- Transição induzida por esteira: no caso de turbinas multiestágios, a esteira gerada por pás a montante interagem com a camada limite das pás a justante, induzindo instabilidades que levam a transição.

Dito isso, a literatura conta com diversos trabalhos, experimentais e de fluidodinâmica computacional (CFD, sigla do inglês), que possibilitam a compreensão do caso. Em CFD, modelos de turbulência são empregados para análise dessa característica dos escoamentos. O modelo $k-\omega$ SST, baseado no conceito de média de Reynolds, calcula a viscosidade turbulenta ν_t com base na solução de duas equações de transporte: da energia cinética turbulenta k e da taxa de dissipação específica ω . Nesse cenário, a proposta do modelo $\gamma-Re_\theta$ é resolver mais duas equações de transporte, para intermitência γ e número de Reynolds da espessura do momento de transição Re_θ . Além disso, destaca-se o papel de γ que, ao assumir o valor 0, infere-se que a camada limite é laminar e o valor 1 indica que a camada limite se encontra completamente turbulenta (Marciniak;

Kügeler; Franke, 2010; OpenCFD, 2023). Também, de acordo com OpenCFD (2023), o modelo *Spalart-Allmaras* é composto por uma equação de transporte que calcula a viscosidade transportada $\tilde{\nu}$. Através desse parâmetro, obtém-se a viscosidade turbulenta ν_t .

Por fim, o estudo do problema via cascatas de pás, como a T106, é recorrente na literatura. Sendo assim, todos os trabalhos citados a seguir dedicaram-se a avaliar esse caso com uso de diferentes técnicas. Sideridis, Yakinthos e Goulas (2011) estudaram experimentalmente o escoamento e o balanço de energia cinética turbulenta no perfil T106, com objetivo de fornecer uma ferramenta para validação de modelos de turbulência. Além disso, nesse trabalho foi registrada a separação do escoamento com o comprimento de aproximadamente 20% da corda da pá na superfície de sucção. Marciniak, Kügeler e Franke (2010) reportaram o desempenho adequado, porém com alguma superestimação de perdas do modelo baseado em média de Reynolds $\gamma\text{-Re}_\theta$. Wang et al. (2021) avaliaram o processo de evolução da camada limite por meio de simulação de grandes escalas (LES, sigla do inglês) tendo demonstrado que, para baixos valores de Re , há maiores perdas aerodinâmicas e aumento da região de separação na superfície de sucção. Misirlis et al. (2020) aplicaram a ferramenta de código aberto OpenFOAM para análise do escoamento, com uso do modelo de turbulência $k-\omega$ SST e propuseram uma nova correlação para cálculo do coeficiente de transferência de calor ao redor do perfil T106. Por fim, Saha e Ranjan (2021) concluiu que o modelo $\gamma\text{-Re}_\theta$ consegue prever a separação na superfície de sucção, contudo, a posição e o tamanho da região não é completamente precisa quando comparada com os resultados de simulação numérica direta (DNS, sigla do inglês).

Nesse cenário, o presente trabalho visa avaliar o desempenho na predição da separação do escoamento na superfície de sucção da pá com os modelos baseados na média de Reynolds *Spalart-Allmaras* e $\gamma\text{-Re}_\theta$. Além disso, esses modelos serão empregados na análise da esteira gerada pela pá. Os resultados serão validados com os dados experimentais de Sideridis, Yakinthos e Goulas (2011) e a ferramenta *open-source* OpenFOAM será empregada. Dessa forma, visa-se analisar o escoamento em uma cascata de pás com ferramentas livres e modelos de turbulência com custo computacional viável para serem empregados na indústria.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características do escoamento

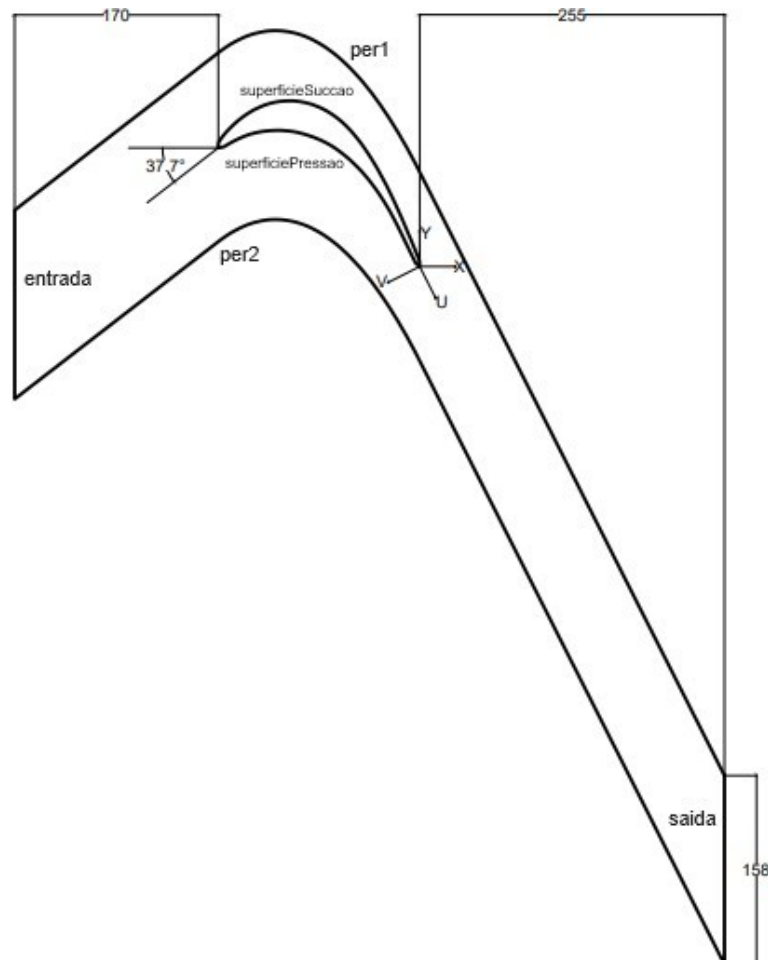
Apesar de ser um escoamento turbulento, a média do escoamento na terceira dimensão (eixo normal ao plano XY) tende a zero, permitindo realizar a simulação bidimensional do escoamento turbulento médio. Além disso, $Re \simeq 65000$, baseado no comprimento de passagem

$L_0=0,158\text{ m}$, $U_0=5,45\text{ m/s}$ e a intensidade da turbulência (I) a montante das pás é $\approx 2\%$, ou seja, $Tu=I \cdot 100 \approx 2$. Também, o comprimento de mistura (l_m) empregado foi $0,025\text{ m}$ e o ângulo de entrada $\theta_1=37,7^\circ$, conforme Misirlis et al. (2020). Por fim, o escoamento foi modelado em regime permanente com o algoritmo *SIMPLEC*.

2.2 Domínio computacional

O domínio computacional foi criado conforme exposto na Figura 1. Os perfis de velocidade e as condições de contorno foram definidas de acordo com eixo XY . Após isso, as componentes de velocidade foram decompostas na direção do escoamento U e normal ao escoamento V na região da esteira, para comparação com os dados experimentais de Sideridis, Yakinthos e Goulas (2011). Ademais, $\widehat{XU}=63,2^\circ$, a corda $C \approx 196\text{ mm}$ e a corda axial $C_{ax} \approx 169\text{ mm}$.

FIGURA 1. Geometria do domínio computacional e condições de contorno.



Fonte: Autor (2024).

2.3 Condições de contorno

As condições de contorno foram definidas conforme a Tabela 1. Em *per1* e *per2* aplicou-se a condição de contorno periódica *cyclicAMI*. Na *saida*, p_k e v_t foram definidos como nulos, e os demais campos como *zeroGradient*. Os valores de k , ω , γ e Re_θ foram determinados segundo as equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente, conforme recomendação da documentação do OpenCFD (2023). A viscosidade modificada $\tilde{\nu}$ do modelo *Spalart-Allmaras* foi definida como $3 \cdot \nu$, conforme Rumsey (2024). Por fim, os campos de k , ω , γ e Re_θ foram iniciados com os mesmos valores da entrada e os demais campos foram iniciados com valores nulos.

TABELA 1. Condições de contorno.

Campo	<i>entrada</i>	<i>superficieSucção/superficiePressão</i>
$p (p_k)$	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>
U	<i>fixedValue</i> (4,312 3,333 0)	<i>noSlip</i>
γ	<i>fixedValue</i> (1)	<i>zeroGradient</i>
k	<i>fixedValue</i> (0,0178215)	<i>kLowReWallFunction</i> ($1 \cdot 10^{-12}$)
ω	<i>fixedValue</i> (9,7493)	<i>omegaWallFunction</i> ($1 \cdot 10^{12}$)
Re_θ	<i>fixedValue</i> (260,2545)	<i>zeroGradient</i>
$\nu - \gamma - Re_\theta (v_t)$	<i>calculated</i> (0)	<i>nutkWallFunction</i> ($1 \cdot 10^{-12}$)
$\nu - \text{Spalart-Allmaras} (v_t)$	<i>calculated</i> (0)	<i>nutUSpaldingWallFunction</i> ($1 \cdot 10^{-12}$)
$\tilde{\nu}$	<i>fixedValue</i> ($3,9744 \cdot 10^{-5}$)	<i>fixedValue</i> ($1 \cdot 10^{-12}$)

Fonte: Autor (2024).

$$k = \frac{3}{2} (I \cdot U)^2 \quad (1)$$

$$\omega = \frac{k^{0,5}}{0,09^{0,25} \cdot l_m} \quad (2)$$

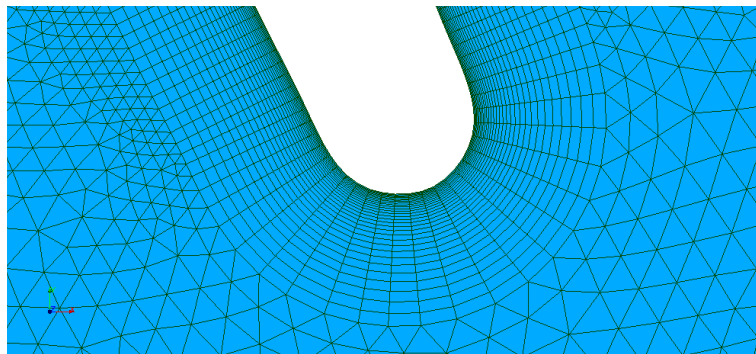
$$\gamma = 1 \quad (3)$$

$$Re_{\theta} = \frac{331,5}{(Tu - 0,5658)^{0,671}} \quad (4)$$

2.4 Geração das malhas

Com base no domínio computacional, duas malhas híbridas foram geradas. A primeira malha (Figura 2) foi composta por elementos triangulares de tamanho máximo $0,0008\text{ m}$. Nas paredes, uma região de elementos uniformes com espessura de $0,003\text{ m}$, *stretch* de 1,1 e 30 camadas foi criada. Na segunda malha, definiu-se o tamanho máximo dos elementos triangulares como $0,0006\text{ m}$ e a região uniforme foi construída com 40 camadas e *stretch* de 1,075. Vale ressaltar que duas malhas foram geradas para verificação da independência da solução, sendo que uma é pelo menos 20% mais refinada em todas as direções em relação a outra, conforme recomenda Çengel e Cimbala (2007).

FIGURA 2. Região do bordo de fuga da primeira malha.



Fonte: Autor (2024).

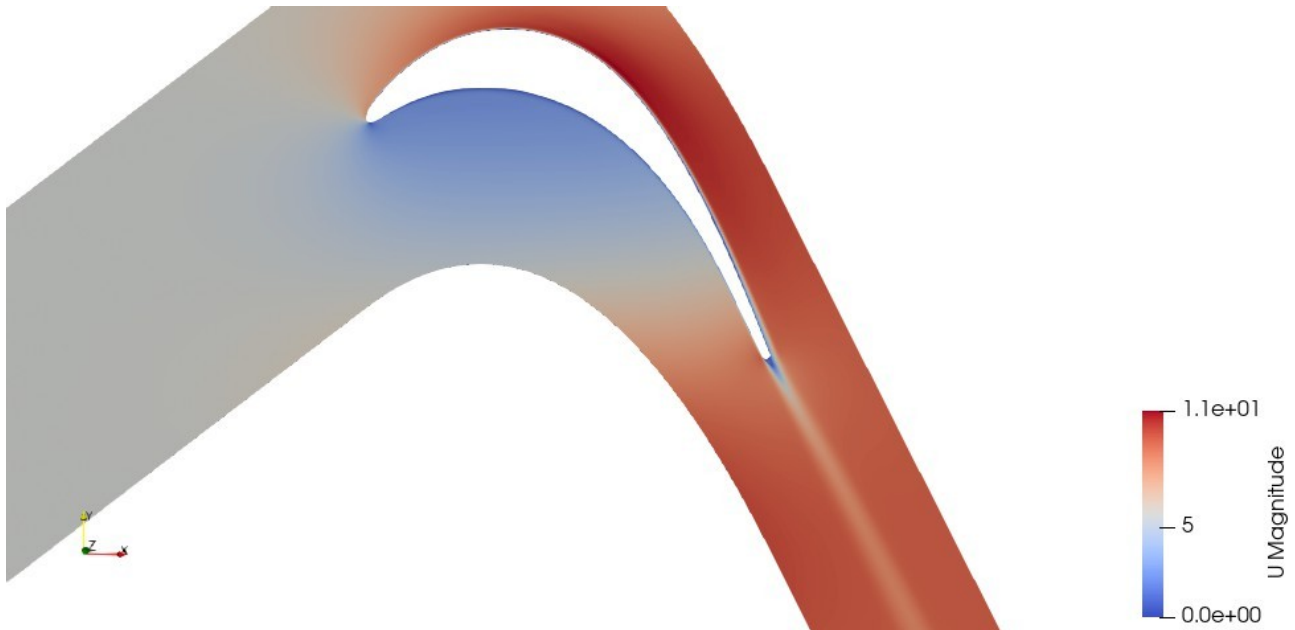
2.5 Esquemas de discretização e convergência

Empregou-se o esquema de discretização *linear* em todas as equações, exceto para os termos advectivos, onde foi usado o esquema *upwind*. Os critérios de convergência considerados foram o resíduo de $1 \cdot 10^{-4}$ ou o limite de 5000 iterações.

3. RESULTADOS

As soluções convergiram conforme o critério do resíduo em todos os casos. A Figura 3 exibe a solução do campo de velocidade do modelo $\gamma\text{-Re}_\theta$. Além disso, para malha 1, $y^+_{\max}=0,84$, e na malha 2, $y^+_{\max}=0,62$. Tal resultado demonstra que a configuração das condições de contorno para modelagem na parede com baixos números de Reynolds foi apropriada.

FIGURA 3. Campo de velocidade na região da pá resolvido pelo modelo γ - Re_θ .



Fonte: Autor (2024).

Também, foi possível verificar a independência da solução através dos perfis de velocidade. Com base nos perfis de velocidade de cada direção, os resultados dos modelos em cada malha foram comparados através da raiz do erro médio quadrático (RMSE, sigla em inglês). O maior valor observado foi de $0,01003 \frac{m}{s}$, conforme a Tabela 2. Dessa forma, há evidência de que a solução obtida não foi influenciada pela malha.

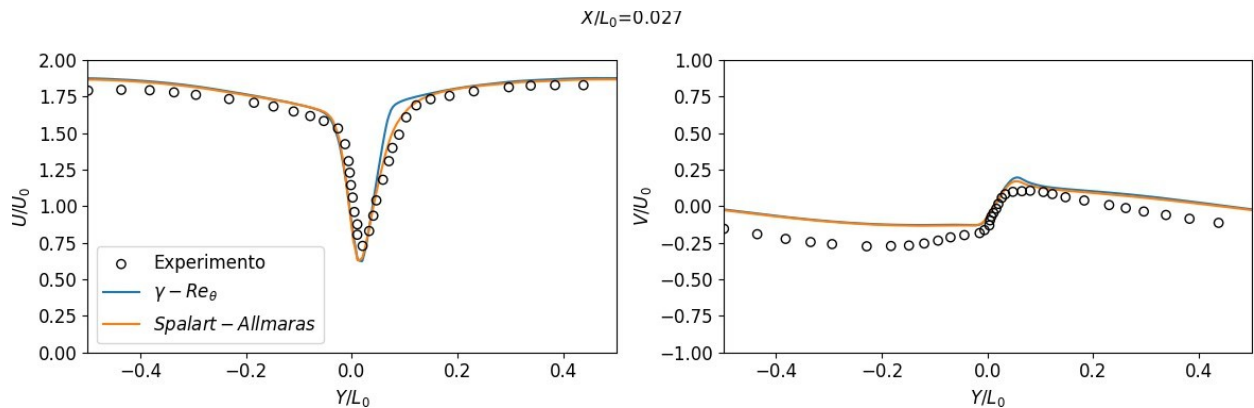
As Figuras 4, 5, 6, 7 e 8 exibem os perfis de velocidade em diferentes posições da esteira. Os dados foram extraídos considerando o eixo XY nas posições $X/L_0=0,027m$, $X/L_0=0,042m$, $X/L_0=0,075m$, $X/L_0=0,185m$ e $X/L_0=0,718m$, respectivamente e, posteriormente, as componentes foram projetadas nas direções U e V . É possível observar que ambos modelos descrevem de forma satisfatória o escoamento e concordam com os dados experimentais. O modelo *Spalart-Allmaras* se mostrou mais preciso na região central da esteira.

TABELA 2. RMSE das soluções das diferentes malhas.

Seção	Spalart-Allmaras (Direção U)	Spalart-Allmaras (Direção V)	γ -Re θ (Direção U)	γ -Re θ (Direção V)
$X/L_0=0,027\text{ m}$	0,01003	0,00358	0,00982	0,00323
$X/L_0=0,042\text{ m}$	0,00849	0,00293	0,00966	0,00275
$X/L_0=0,075\text{ m}$	0,00606	0,00165	0,00605	0,00159
$X/L_0=0,185\text{ m}$	0,00448	0,00069	0,00496	0,00087
$X/L_0=0,718\text{ m}$	0,00366	0,00051	0,00570	0,00085

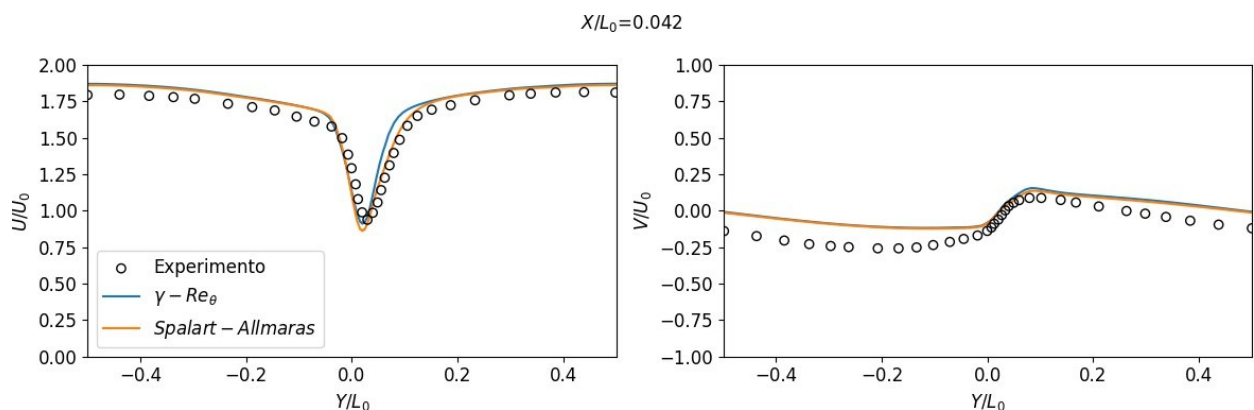
Fonte: Autor (2024).

FIGURA 4. Perfil de velocidade $X/L_0=0,027\text{ m}$.



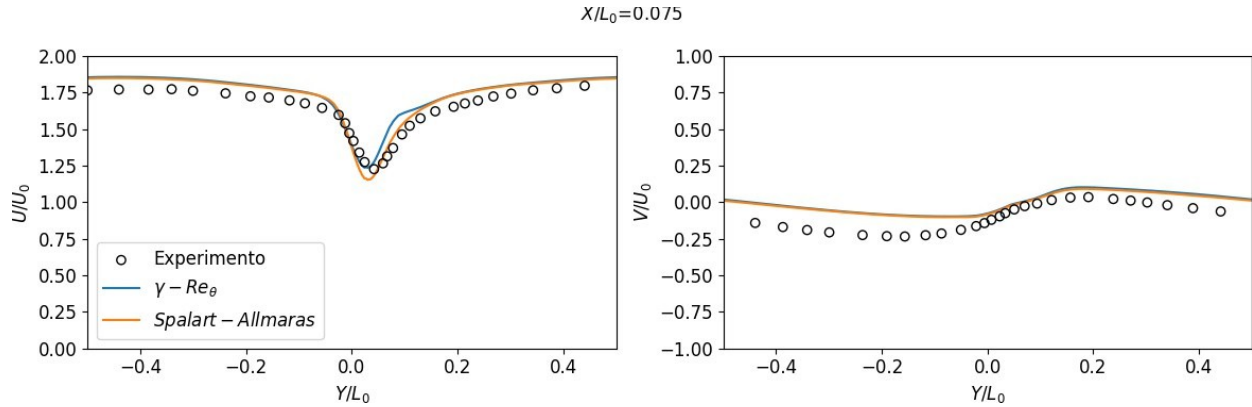
Fonte: Autor (2024).

FIGURA 5. Perfil de velocidade $X/L_0=0,042\text{ m}$.



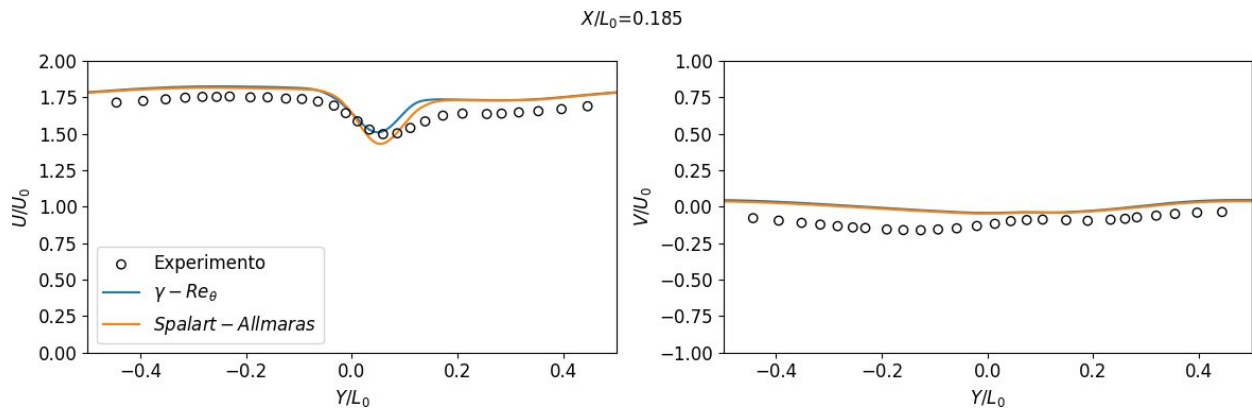
Fonte: Autor (2024).

FIGURA 6. Perfil de velocidade $X/L_0=0,075 m$.



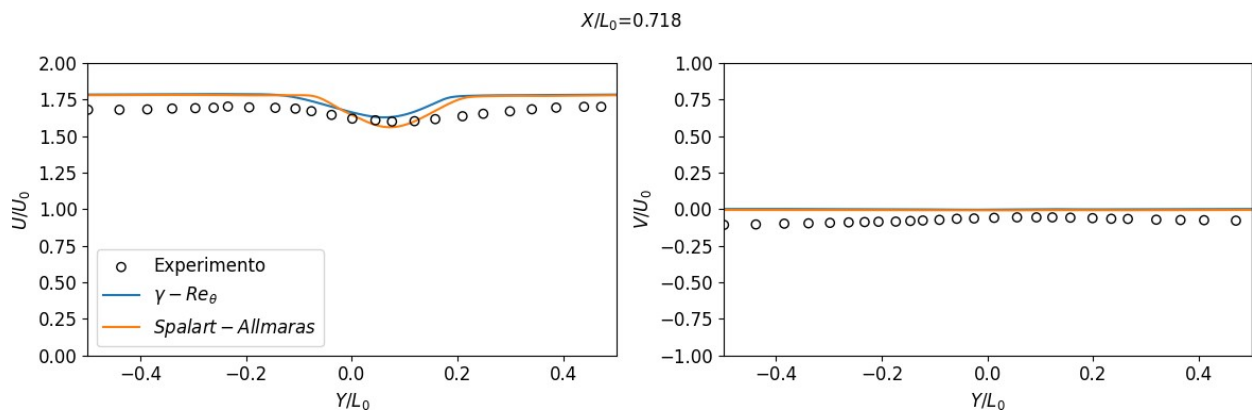
Fonte: Autor (2024).

FIGURA 7. Perfil de velocidade $X/L_0=0,185 m$.



Fonte: Autor (2024).

FIGURA 8. Perfil de velocidade $X/L_0=0,718 m$.

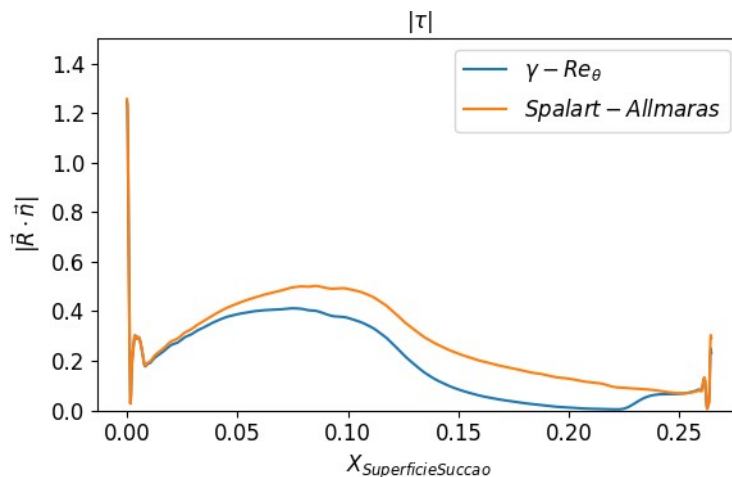


Fonte: Autor (2024).

Além disso, o ponto de separação na superfície de sucção foi identificado através da magnitude da tensão cisalhante $\vec{\tau} = \vec{R} \cdot \vec{n}$, onde $\vec{R}$ é o tensor simétrico de tensões cisalhantes e $\vec{n}$ o

vetor normal. Sendo assim, foi possível determinar a separação do escoamento na superfície de sucção com o modelo $\gamma\text{-Re}_\theta$, pois, ao longo do comprimento da superfície de sucção $X_{\text{superfícieSucção}}$, $|\tau| \simeq 0$ em $X_{\text{superfícieSucção}} = 0,221m$. O comprimento desse ponto até o bordo de fuga da pá é $\simeq 0,043m$ que é equivalente a $\simeq 25\%C_{ax}$ e $\simeq 22\%C$. Tal resultado concorda com as observações de Saha e Ranjan (2021), que reportou que o modelo $\gamma\text{-Re}_\theta$ retorna resultados satisfatórios, porém com desvios em relação a técnicas mais sofisticadas, e com os dados experimentais de Sideridis, Yakinthos e Goulas (2011), que reportou um comprimento de separação de 20% da corda. Em contrapartida, é possível atestar consoante a Figura 9 que o modelo *Spalart-Allmaras* não conseguiu de capturar a separação do escoamento.

FIGURA 9. Magnitude da tensão cisalhante na superfície de sucção.



Fonte: Autor (2024).

4. CONCLUSÕES

A otimização dos componentes de turbinas a gás é fundamental para o desempenho global desses equipamentos e, nesse sentido, a compreensão do escoamento na turbina de baixa pressão se faz necessária. Sendo assim, o presente trabalho usou técnicas de CFD para modelagem da esteira e da separação do escoamento na superfície de sucção na cascata de pás T106, uma simplificação para a análise de turbinas de baixa pressão.

O objetivo geral, de modelar e comparar os resultados com experimentos, foi atingido. Foi possível constatar a eficácia dos modelos *Spalart-Allmaras* e $\gamma\text{-Re}_\theta$ na previsão da esteira. Além disso, o modelo $\gamma\text{-Re}_\theta$ conseguiu prever a separação do escoamento de forma satisfatória, sendo que o tamanho da região de recirculação estimada foi de $\simeq 22\%C$ e $\simeq 25\%C_{ax}$. Em contrapartida, o modelo *Spalart-Allmaras* não pôde capturar a separação do fluxo.

Em futuros trabalhos, técnicas de simulação híbrida, como *Spalart-Allmaras DDES* (OpenCFD, 2023) podem ser empregadas para compreensão do comportamento transiente do escoamento durante o seu desenvolvimento, além da visualização mais precisa da região de separação do escoamento na superfície de sucção da pá.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. McGraw-Hill, 2007.

MARCINIAK, V.; KÜGELER, Edmund; FRANKE, M. Predicting transition on low-pressure turbine profiles. In: V European conference on computational fluid dynamics ECCOMAS CFD. [S.l.: s.n.], 2010. v. 2010.

MISIRLIS, D.; VLAHOSTERGIOS, Z.; SALPINGIDOU, C.; FLOUROS, M.; DONUS, F.; YAKINTHOS, K. Cfd analysis of the heat transfer and fluid flow around a low pressure turbine blade. CET Journal-Chemical Engineering Transactions, v. 81, 2020.

OPENCFD. User Guide, 2023. Disponível em: <https://doc.openfoam.com/2306/>. Acesso em: 01 julho 2024.

RUMSEY, C. The Spalart-Allmaras Turbulence Model, 2024. Disponível em: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>. Acesso em: 01 julho 2024.

SAHA, G.; RANJAN, R. Transition modelling for flow separation in low-pressure turbine cascades. In: SPRINGER. Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power. [S.l.], 2021. p. 319–324.

SIDERIDIS, A.; YAKINTHOS, K.; GOULAS, A. Turbulent kinetic energy balance measurements in the wake of a low-pressure turbine blade. International journal of heat and fluid flow, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 212–225, 2011.

WANG, Y.; WANG, F.; SONG, Y.; CHEN, F. Compressible large eddy simulation of the boundary layer evolution in a low-pressure turbine cascade at different reynolds numbers. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Springer, v. 43, p. 1–10, 2021.