

ESTUDO DE REPOTENCIAÇÃO DE UMA TURBINA FRANCIS DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA – PCH

Repowering study of a francis turbine installed in a small hydroelectric plant

Renata Rech de Souza¹; Paulo Smith Schneider²; Cristiano Vitorino da Silva³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - renatarechdesouza@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul. pss@mecanica.ufrgs.br

³ Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim. cristiano@uricer.edu.br

Data do recebimento: 21/01/2022 - Data do aceite: 07/04/2022

RESUMO: O presente estudo tem o objetivo de avaliar, através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), o escoamento de água em uma turbina Francis de 5,9 MW de potência, instalada em uma pequena central hidrelétrica, buscando identificar pontos passíveis de melhoria em seu funcionamento, visando à sua repotenciação. Para tanto, foram pesquisados aspectos relacionados aos principais componentes do equipamento e os métodos mais utilizados para análises e modificações na busca por aumento de eficiência. A partir disso, uma modelagem computacional foi desenvolvida e implementada no software Ansys CFX 19. Utilizou-se como base as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento para um escoamento turbulento transiente e incompressível, utilizando as médias de Reynolds e o modelo $k-\omega$ SST para modelar a turbulência no escoamento, desenvolvido para modelar a turbulência de escoamentos com gradientes de pressão adversos e descolamento da camada limite. Buscando identificar a influência de alterações geométricas na turbina, duas alterações na curvatura do tubo de extração foram investigadas. A partir de uma análise qualitativa dos resultados, foi possível identificar melhorias na distribuição de velocidades e pressões ao longo do tubo de extração, o que impacta significativamente no desempenho da turbina, elevando o torque do rotor em até 30%, o que promove um aumento na potência mecânica do equipamento.

Palavras-chave: Turbina Francis. CFD. Repotenciação. Tubo de extração.

ABSTRACT: The aim of this study is to evaluate the water flow in a 5.9 MW Francis turbine installed in a small hydroelectric plant, through computational fluid dynamics (CFD), seeking to identify points for improvement in its operation, aiming at its repowering. For that, aspects related to the main components of the equipment and the most used methods for analysis and modifications to increase efficiency were researched. Thus, a computational modeling was developed and implemented in the Ansys CFX 19 software. Equations related to the conservation of mass and momentum of an unsteady, incompressible turbulent flow were used as basis, considering the Reynolds Average and the $k-\omega$ SST model flow turbulence, which was developed to model the turbulence with adverse pressure gradients and boundary layer detachment. In order to identify the influence of geometric changes in the turbine, two changes in the curvature of the extraction tube were investigated. From a qualitative analysis of the results, improvements in the distribution of speeds and pressures along the extraction tube were identified, which significantly impacts the performance of the turbine, increasing the rotor torque to 30%, which promotes an increase in the equipment mechanical power.

Keywords: Francis turbine. CFD. Retrofit. Draft tube.

Introdução

A crise no setor energético brasileiro tem origem em diferentes razões e vem se intensificando a cada ano. Hunt, Stilpen e Freitas (2018) expõem que, ao longo das décadas, a maior parte das crises relacionadas à geração de energia no Brasil são consequência das condições climáticas, já que o país é, historicamente, dependente da energia hidrelétrica. Atualmente, mesmo com o desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento de outras fontes, a energia oriunda das hidrelétricas ainda é predominante no cenário energético nacional.

Segundo o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), em 2021, cerca de 60% da energia elétrica gerada no Brasil era oriunda da transformação de energia hidráulica. Isto é, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2021), o Brasil conta com 1373 usinas de geração, as quais aproveitam o potencial hidráulico dos

rios, com capacidade total instalada de 109 GW e correspondem às centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), às usinas hidrelétricas de energia (UHEs) e às pequenas centrais hidrelétricas (PCHs).

É importante mencionar que, segundo a Resolução Normativa n.º 673/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), classifica-se como CGH o empreendimento de geração que apresenta potência de até 3 MW. Empreendimentos com potência superior a 30 MW são definidos como usinas hidrelétricas de energia, sendo que as pequenas centrais hidrelétricas são empreendimentos com potência entre 3 e 30 MW, e com área de reservatório de até 13 km².

Ainda, de forma oposta a uma usina hidrelétrica de grande porte, uma PCH não necessita de grandes reservatórios para armazenagem de grandes volumes de água, pois permite seu fluxo contínuo com uma capacidade nominal mais estável. Além disso, requer uma pequena área inundável - muitas vezes equivalente ao nível das cheias

do rio. É necessário citar, também, que com o crescente consumo de energia elétrica, as PCHs apresentam-se como uma alternativa interessante para a geração de energia, já que representam uma geração mais limpa e com impacto ambiental relativamente baixo (CESBE S.A., 2015).

Ante o exposto e tendo em vista a geração de energia pelas PCHs, segundo Colnago (2011), os conjuntos turbina-gerador são os principais fatores responsáveis pelo desempenho de geração de energia elétrica. Dessa forma, a eficiência de uma turbina hidráulica é determinante para o sucesso da geração de energia a partir dos recursos hídricos. A partir disso, tem-se o conceito de repotenciação, que visa ao ganho de potência ou rendimento de determinado processo ou equipamento, apresentando-se como uma alternativa de custo reduzido para complemento da oferta de geração. A repotenciação é uma técnica de engenharia amplamente utilizada na indústria como forma de aumento de eficiência de equipamentos e de sistemas inteiros. No que se refere a turbinas, existem vários aspectos que podem ser avaliados e trabalhados em seus componentes para o ganho de eficiência. Dessa forma, estudos acerca desse tema vêm sendo desenvolvidos e implementados na prática, gerando resultados satisfatórios no desempenho desses equipamentos. Choi et al. (2013) validaram, computacionalmente, melhorias na performance de uma turbina Francis de 5 MW de potência. O objeto do estudo, nesse caso, foi o rotor da turbina, sendo que nas simulações computacionais do funcionamento do mesmo avaliou-se o comportamento do escoamento e a distribuição de pressão no equipamento. Com o resultado dessas análises, desenvolveu-se uma nova geometria para o rotor e essa proporcionou um aumento de 9,93% na eficiência máxima da turbina.

Em outro trabalho, Jeon, Byeon e Kim (2013) avaliaram os efeitos do tubo de

extração de uma turbina Francis em sua performance hidráulica. Nesse estudo, a avaliação foi feita com o auxílio de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e foram variados os modelos de tubo de extração e a espessura das pás direcionais. A partir da formulação desenvolvida, obteve-se que a eficiência da turbina aumenta à medida em que a espessura das pás direcionais é reduzida devido à redução da força de arrasto. Para o tubo de extração, avaliou-se a distribuição de pressão na seção transversal da sua porção inicial. Pôde ser observado que houve uma distribuição de pressão mais uniforme para o caso em que o tubo de extração foi dividido em duas passagens, reduzindo a região com desprendimento de vórtices e apresentando uma maior estabilidade do fluxo. Na mesma linha, Cibulski e Silva (2015) realizaram uma avaliação em CFD acerca da repotenciação de uma turbina hidráulica do tipo Francis. Para tanto, utilizou diferentes geometrias para o rotor em questão, modificando-se o número de pás do componente e, também, a angulação das mesmas. A modificação dos ângulos de entrada e de saída das pás resultou em um acréscimo de cerca de 60% na potência do equipamento.

De forma semelhante, Chakrabarty, Sarkar e Maity (2016) analisaram, em CFD, o tubo de extração tipo cotovelo, de uma turbina hidráulica, visando à melhoria na sua eficiência. No estudo, com a utilização do *software* Ansys Fluent, foram realizadas mudanças em diferentes dimensões do tubo de extração com o intuito de encontrar uma geometria ótima baseada na eficiência desse componente. A partir disso, foi encontrado um formato ótimo para o tubo, e observou-se que a eficiência do tubo de extração depende do comprimento do mesmo e da sua seção transversal.

Visando avaliar a influência da curvatura do tubo de extração no desempenho de uma turbina Francis, Arispe, Oliveira e Ramirez

(2018) estudaram técnicas para a parametrização da sua geometria. Para isso, foram definidos critérios para a curva geratriz do cotovelo do tubo de extração com curvas em formato de arco de um círculo, espiral logarítmica e espiral hiperbólica. A partir da simulação numérica das geometrias geradas e avaliação da distribuição de velocidade, foi possível observar que as curvaturas, utilizando critérios para o formato logarítmico e hiperbólico apresentaram maiores ganhos de eficiência para a turbina avaliada, devido à identificação de uma transição mais suave na direção do escoamento na região do cotovelo, reduzindo assim as recirculações existentes.

A partir da análise da literatura apresentada, é possível observar que a maioria das modificações realizadas, visando ao aumento de rendimento em turbinas, estão relacionadas a modificações geométricas no equipamento, seja pela alteração das pás do rotor, pela alteração no ângulo das pás guias ou em modificações no tubo de extração. Os métodos numéricos utilizados são modelos consolidados que proporcionam uma aproximação considerável da condição real de operação. Assim, e frente à importância das pequenas centrais hidrelétricas para a geração de energia e o grande número delas em operação no Brasil, ressalta-se a importância de avaliar seus componentes, uma vez que essa avaliação possibilita a solução de possíveis problemas de operação, bem como a melhoria da sua eficácia. Nesse aspecto, e por representar parte fundamental para a geração de energia, o presente estudo avalia, por meio de CFD, o escoamento de água no interior de uma turbina Francis de 5,9 MW, instalada em uma pequena central hidrelétrica localizada no interior do Rio Grande do Sul, considerando suas reais condições de operação, com o intuito de verificar o seu desempenho e buscar indicadores que possam elevar sua eficiência por meio de um trabalho de repotenciação.

Metodologia

Modelo matemático

A modelagem desenvolvida baseia-se nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para um escoamento transiente e incompressível turbulento, adotando-se as médias de Reynolds - RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), bem como o modelo de turbulência $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*) para prever o comportamento da turbulência no escoamento da água (MENTER, 1994).

O escoamento turbulento de fluidos viscosos exige uma modelagem capaz de prever o comportamento caótico e aleatório do movimento do fluido e, para metodologias numéricas por técnicas de volumes finitos, apresentam o já conhecido problema de fechamento ao se aplicar as médias de Reynolds, que se tratam de médias temporais sobre os termos das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento em escoamentos isotérmicos e não reativos, obtidas por meio de balanços de massa e de forças sobre um volume de controle infinitesimal de fluido. Este problema reside no surgimento de termos adicionais nestas equações onde faz-se necessária a utilização de modelos complementares para resolver a turbulência, calculando uma viscosidade aparente do escoamento, para que seja possível a solução do sistema de equações do modelo (FREIRE et al., 2002). Tal indeterminação no sistema de equações proposto para o escoamento surge devido ao tensor de Reynolds $\overline{u'_i u'_j}$, que precisa ser determinado com equacionamento complementar. A seguir, apresentam-se as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento já com as médias para um escoamento incompressível, isotérmico e não reativo de uma substância pura. A conservação da massa em

coordenadas generalizadas fica

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{U}_i) = 0 \quad (1)$$

onde $\bar{\rho}$ $\bar{\rho}$ é a massa específica média do fluido [kg/m³], t corresponde ao tempo [s], x_j consiste na coordenada espacial [m] e \bar{U}_i \bar{U}_i é a componente do vetor velocidade média [m/s]. Para a conservação da quantidade de movimento tem-se

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\nu} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right] + \bar{F}_i \quad (2)$$

onde $\bar{\nu}$ $\bar{\nu}$ é a viscosidade cinemática média molecular do fluido [m²/s], δ_{ij} δ_{ij} é a função delta de Kronecker, \bar{F}_i \bar{F}_i consiste em uma força de corpo instantânea [N] e \bar{p} \bar{p} é a pressão média termodinâmica [Pa] no escoamento. O tensor de Reynolds na Eq. (2) representa a quantidade de movimento adicional causada pela turbulência do escoamento. Segundo Kolmogorov (*apud* FREIRE et al., 2002), o tensor de Reynolds pode ser avaliado por meio da relação

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3)$$

onde k k é a energia cinética das flutuações de velocidade [J/kg] e ν_t ν_t é a viscosidade cinemática turbulenta [m²/s], propriedade do escoamento. Substituindo a Eq. (3) na Eq. (2), tem-se

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\bar{\nu} + \nu_t) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right] + \bar{F}_i \quad (4)$$

sendo que a energia cinética k k não precisa ser obtida obrigatoriamente pelo modelo, já que pode ser eliminada pela definição de uma nova pressão p^* p^* para o escoamento, como segue

$$p^* = \bar{p} + \frac{2}{3} k \quad (5)$$

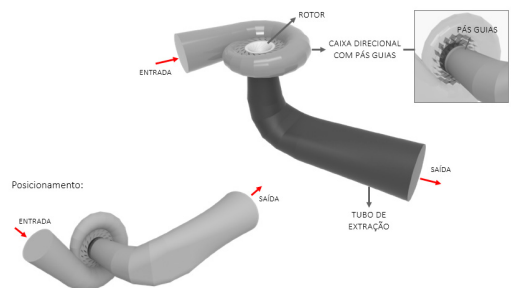
Para resolver o conjunto de equações apresentado, Eqs. (1), (4) e (5), tem-se a necessidade de um modelo adicional para representar a viscosidade turbulenta do escoamento, ν_t ν_t . Neste trabalho adota-se o modelo k - ω SST em função de suas características combinadas entre o modelo k - ω (LAUNDER; SPALDING, 1974) e o modelo k - ω (WILCOX, 1988), obtendo-se boa resolução da turbulência próximo das paredes do domínio, bem como no seu núcleo.

O modelo de turbulência k - ω SST desenvolvido por Menter (1994) consiste em um modelo de viscosidade turbulenta de duas equações. Esse modelo foi desenvolvido para modelar a turbulência de escoamentos com gradientes de pressão adversos e separação da camada limite, fazendo uso da formulação dos modelos k - ω e k - ε (COSTA, 2018). O modelo k - ω SST é composto pela equação de transporte de energia cinética (k) e pela equação da taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta (ω).

Modelo físico

O modelo avaliado consiste em uma turbina Francis com eixo horizontal, composta por sua caixa espiral com pás guias (voluta), rotor e tubo de extração no formato curvado (cotovelo), como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Modelagem da turbina avaliada



As dimensões para modelagem dos componentes foram disponibilizadas pela equipe da PCH, citada anteriormente, sendo que o diâmetro de entrada da caixa espiral é de 1,2 m e de 1,65 m na saída do tubo de extração. Outros dados acerca do equipamento e sua operação, segundo a empresa responsável, são apresentados na Tabela I.

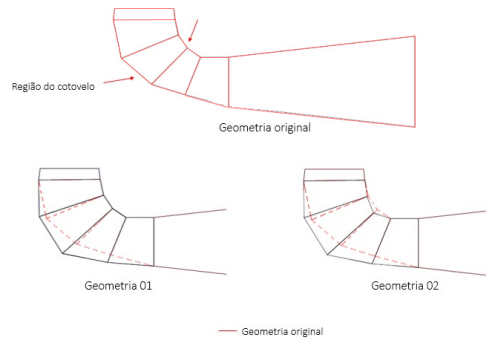
Tabela I - Dados da turbina

Variável	Valor
Potência nominal unitária	5,92 MW
Rotação nominal do rotor	900 rpm
Vazão nominal unitária	6,25 m ³ /s
Altura da queda	105,8 m

O tubo de extração foi escolhido como objeto de estudo por se tratar de um importante componente usado para converter a pressão dinâmica em pressão estática, recuperando a energia de saída do rotor da turbina, o que aumenta a sua eficiência (CHAKRABARTY; SARKAR; MAITY, 2016). As oportunidades de ganho de eficiência do equipamento foram numericamente analisadas pela alteração de sua geometria. Foram simuladas, computacionalmente, alterações na curvatura do cotovelo do tubo de extração, de forma semelhante ao estudo realizado por Arispe, Oliveira e Ramirez (2018). A região foi escolhida, pois está relacionada ao escoamento da água no tubo de extração e influencia na eficiência do equipamento. Duas novas geometrias foram geradas: a geometria 01 apresenta uma modificação apenas na parte externa do cotovelo; enquanto a geometria 02 apresenta modificação na curvatura tanto da parte externa, quanto na parte interna do cotovelo. Ambas modificações visam a proporcionar uma transição mais suave entre o cone (porção inicial) e o cotovelo do tubo de extração, e avaliar sua influência no rendimento do equipamento em comparação

à condição original. As geometrias geradas podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2 - Modificações nas geometrias do tubo de extração



No presente estudo, o fluido de trabalho utilizado é a água e o *software* utilizado para a simulação numérica foi o Ansys CFX 19. Inicialmente, na seção de entrada, foram inseridos os dados referentes à pressão originada pela queda d'água de 105,8 m. Para a região de saída, se estabeleceu o fluxo mássico de 6.238,25 kg/s e nas paredes do domínio atribuiu-se a condição de não deslizamento. Segundo Arispe, Oliveira e Ramirez (2018) essa se caracteriza como uma condição de contorno robusta e menos suscetível a instabilidades numéricas. A Tabela II apresenta as demais condições de contorno selecionadas no *software* de simulação.

Para a conexão entre as interfaces dos domínios gerados (caixa espiral, rotor e tubo de extração), utilizou-se o modelo GGI (*General Grid Interface*) que permite o acoplamento dos componentes da malha, sem a necessidade de mudanças topológicas na mesma, sendo útil quando se trata de objetos rotacionais, como é o caso das turbinas (KC et al., 2016). O modelo *Frozen Rotor* foi selecionado como modelo de interface rotativa, que trata o escoamento do componente fixo para o rotativo mudando o sistema de referên-

Tabela II - Condições de contorno determinadas

Entrada		Paredes	
Variável	Parâmetro	Variável	Parâmetro
Pressão total	11 atm	<i>Mass and momentum</i>	<i>No slip wall</i>
Intensidade turbulência	Média (5%)	<i>Rugosidade</i>	<i>Smooth wall</i>
Saída		Interfaces	
Variável	Parâmetro	Variável	Parâmetro
Fluxo mássico	6238,25 kg/s	Modelo interface rotativa	<i>Frozen rotor</i>
		Conexão	<i>General Grid Interface (GGI)</i>
Condições iniciais			
Variável		Parâmetro	
p		1 atm	
$u, v \text{ e } w$		0 m/s	
Modelo de turbulência		$k-\omega$ SST	
Rotação imposta		900 rpm	

cias sem fazer médias, o que possibilita que características locais do escoamento, como as recirculações, sejam transportadas através da interface (ANSYS, 2009). Além disso, foi imposta uma rotação para o rotor de 900 rpm, implicando em uma análise transiente com passo de tempo de 0,001 [s] e critério de convergência foi de 1×10^{-4} para o *Root Mean Square* (RMS).

Modelo numérico

Os domínios computacionais foram gerados a partir do método de volumes finitos de Patankar (1980) para a integração das equações de conservação no domínio, sendo que a malha computacional foi gerada para cada um dos componentes dimensionados da turbina. Optou-se por uma malha tetraédrica devido à complexidade das geometrias avaliadas e por essa apresentar maior flexibilidade na geração automática em geometrias complexas (GOHIL; SAINI, 2015). A malha de cada domínio foi gerada com auxílio do *software* ICEM CFD, sendo que o conjunto completo resultou em aproximadamente 30 milhões de volumes de controle. Nas regiões próximas às paredes dos componentes,

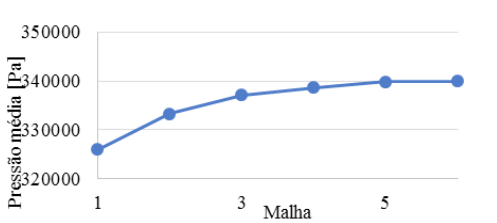
atribuiu-se uma malha prismática para que haja uma análise mais precisa das forças superficiais ocasionadas pelo escoamento na camada limite. Segundo López (2017), a espessura da primeira camada de prismas deve ser determinada com base no problema avaliado e no resultado que se deseja obter. Assim, determina-se a distância adimensional y^+ que, para o presente estudo, atribuiu-se $y^+ > 30$, que consiste no valor necessário para cobrir a porção turbulenta de um escoamento completamente desenvolvido (ARIFF; SALIM; CHEA, 2009).

Testes de independência de malha

Foram geradas seis malhas com graus de refinamento diferentes para cada componente, sendo empregada uma redução no tamanho dos volumes de controle tetraédricos. As malhas geradas foram simuladas computacionalmente com as condições de contorno já apresentadas. Ressalta-se que nessa etapa a avaliação foi realizada em regime permanente, visto que se trata de um procedimento de comparação da qualidade e nível de refinamento entre das malhas. Como

critério de comparação, avaliou-se a pressão média obtida na saída do tubo de sucção. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 3.

Figura 3 - Comparação entre a pressão média obtida na saída do tubo de extração para as seis malhas geradas



Pode-se observar que a partir da malha de número 4 não houve grande diferença entre os resultados obtidos, sendo que os mesmos discordam em menos de 1% em relação às malhas 5 e 6. Assim, optou-se pela utilização da malha de número 5, a qual apresenta cerca de 30 milhões de volumes de controle, visando a um menor esforço computacional e um resultado com nível de precisão satisfatório. Os resultados obtidos para a simulação numérica em regime permanente, utilizando-se da malha 5 para a geometria original, foram utilizados como campo inicial para as simulações em regime transiente.

Resultados e discussões

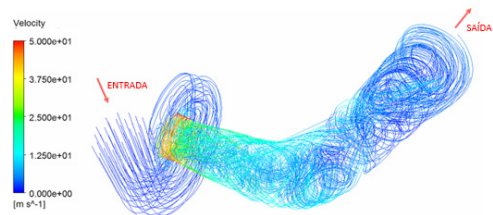
Análise numérica em regime transiente

Os resultados obtidos para as linhas de corrente do escoamento de água desde a entrada na caixa espiral até a saída no tubo de extração são apresentados na Figura 4.

Percebe-se que a partir da entrada da caixa espiral há o aumento da velocidade na região do rotor, que ocorre devido à rotação deste componente da turbina. Contudo, na saída

do rotor é possível observar a existência de *swirl*, o que, segundo Arispe, Oliveira e Ramirez (2018) desvia a maior parte do escoamento para uma região do cotovelo, causando distribuição de velocidade não uniforme desde a entrada do difusor e que se estende ao longo do percurso do escoamento no tubo de extração. A existência de *swirl* no tubo de extração é um dos fatores que pode levar à cavitação no componente (ZHANG; ZHANG, 2012).

Figura 4 - *Streamlines* para o escoamento de água no equipamento



Pode-se identificar, também, uma redução da velocidade a partir da saída do rotor. Entretanto, para este regime de operação, as recirculações são mais intensas e se expandem ao longo do tubo de extração, oriundas de variações de pressão existentes pela movimentação do rotor. De acordo com Agarwal et al. (2017), o desprendimento de vórtices é um dos principais problemas que ocorrem em tubos de extração, criando campos oscilatórios de pressão que podem causar vibrações severas e perdas no tubo de extração. Os autores também ressaltam que a pressão e a velocidade devem diminuir ao longo do percurso no tubo de extração, e as zonas de pressão elevadas devem ser evitadas nesse componente, pois podem prejudicar o seu desempenho. A fim de melhor verificar este efeito, a Figura 5 apresenta a distribuição de pressão e velocidade para a seção longitudinal do tubo de extração, onde é possível

observar que há um aumento de pressão mais significativo ao longo do tubo de extração, o que não é favorável ao desempenho do componente, segundo a teoria. Também são identificadas regiões de oscilação tanto de velocidade, quanto de pressão, sendo que a maior variação desses parâmetros é observada na região do cotovelo, onde há um redirecionamento do escoamento que acaba criando essas flutuações. Segundo Arispe, Oliveira e Ramirez (2018) essa variação faz com que, na parte interna da curva do cotovelo, haja uma separação do escoamento e uma redução da pressão nessa região. Enquanto isso, na parede externa da curva do cotovelo, há uma “colisão” do escoamento, resultando em um aumento de pressão e redução da velocidade nessa região.

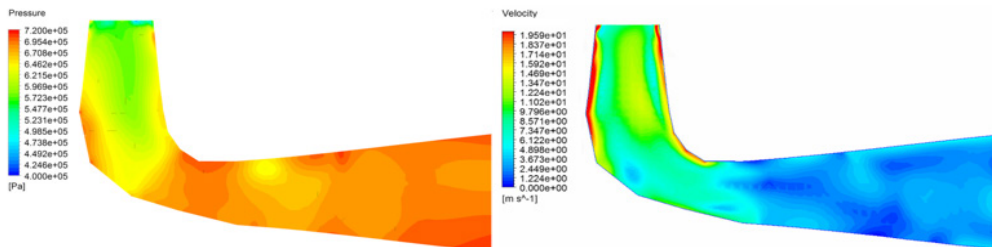
Modificações na geometria do tubo de extração

No que se refere às modificações geométricas realizadas no tubo de extração, segundo Chakrabarty, Sarkar e Maity (2016), existe uma perda de energia cinética na saída do rotor e, sendo assim, o tubo de extração caracteriza-se como um importante componente usado para converter a pressão dinâmica em pressão estática, recuperando a energia de saída do rotor da turbina e aumentando a sua eficiência. Sabendo que o

cotovelo do tubo de extração é responsável pelo redirecionamento do escoamento após a saída do rotor, as modificações realizadas visaram a avaliar a influência da suavização da curvatura nessa região.

De forma semelhante aos resultados apresentados por Arispe, Oliveira e Ramirez (2018), a Figura 6 ilustra as linhas de escoamento ao longo do tubo de extração, bem como planos para a distribuição de velocidade no componente para a geometria original do tubo e as duas geometrias modeladas com modificações na curvatura do cotovelo, desta vez, somente em regime transiente de análise. Pode-se observar que, após a saída do cotovelo, há diferença entre os campos de velocidade obtidos para cada geometria. Nota-se, também, uma redução gradual na variação de velocidade ao longo dos planos, em especial para a geometria 2, que apresenta uma mudança mais significativa logo após a saída do cotovelo. Essa diferença também pode ser observada na Figura 7, onde a distribuição de velocidade é apresentada ao longo da seção longitudinal do tubo. Pode-se verificar que as regiões de velocidades mais baixas existentes na geometria original apresentam-se de forma mais amena nas duas geometrias modeladas. Isso pode ser explicado pelo fato de que as duas geometrias modeladas apresentam curvas com características que proporcionam uma transição mais suave na direção do escoamento para a turbina.

Figura 5 - Distribuição de pressão (a) e de velocidade (b) para a seção longitudinal do tubo de extração - geometria original



Assim, segundo Arispe, Oliveira e Ramirez (2018), a variação da velocidade não se dá de forma abrupta e as recirculações logo após o cotovelo diminuem consideravelmente em comparação à geometria original.

Outra comparação que pode ser feita relaciona-se à distribuição de pressão ao longo do tubo de extração. Como já apresentado

para a geometria original, foi identificado um aumento de pressão no componente, o que é prejudicial para o seu funcionamento. A Figura 8 apresenta uma comparação entre a distribuição de pressão obtida para a geometria original do tubo (a) e para a geometria 02 (b).

Figura 6 - Linhas de corrente e planos de distribuição de velocidade ao longo do tubo de extração para as três geometrias estudadas

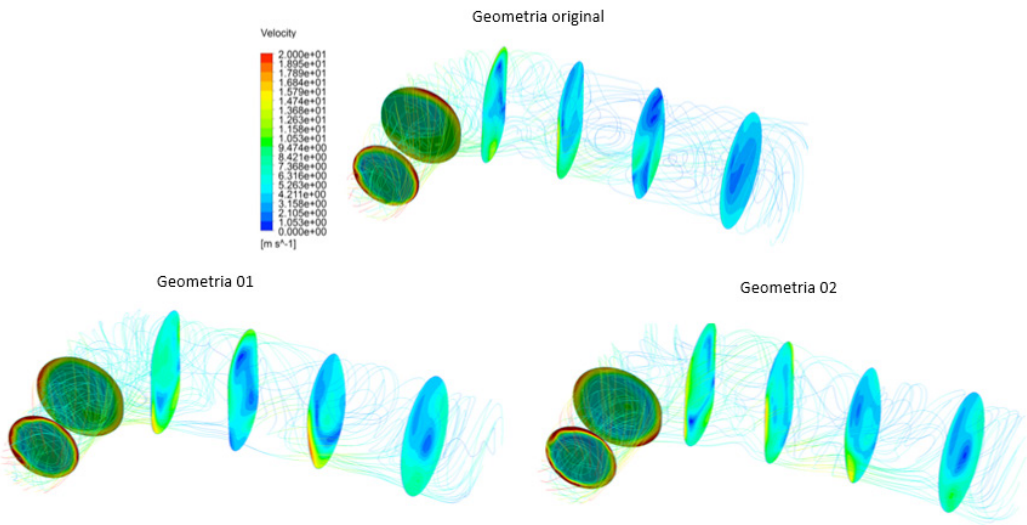


Figura 7 - Distribuição de velocidade na seção longitudinal do tubo para as geometrias avaliadas

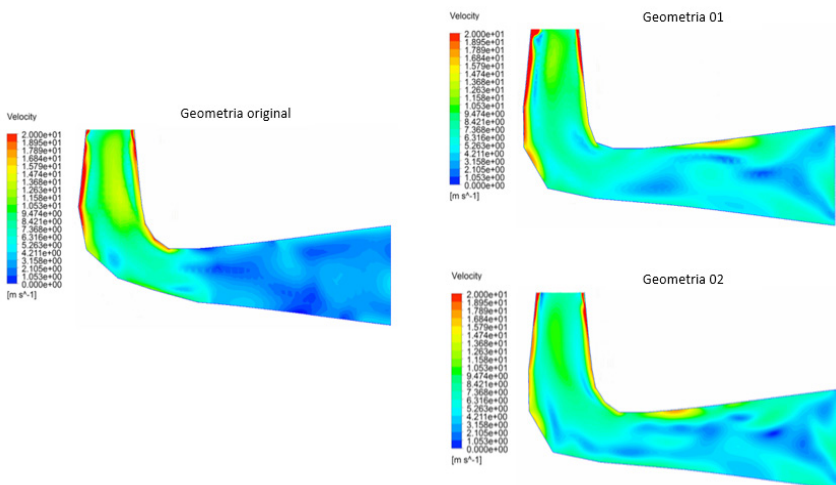
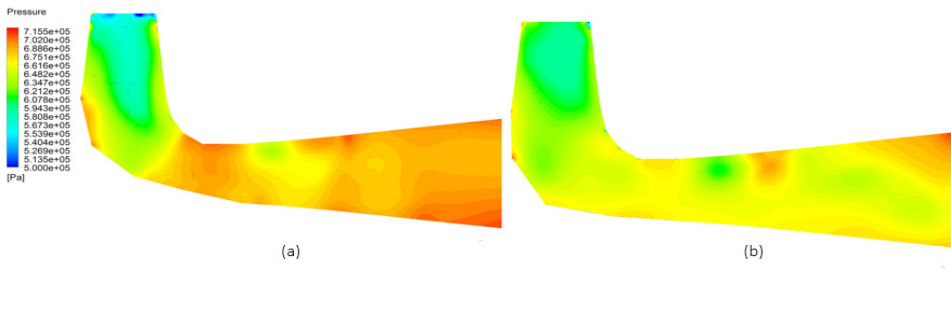


Figura 8 - Distribuição de pressão na seção longitudinal do tubo de extração da geometria original (a) e para a geometria 02 (b)

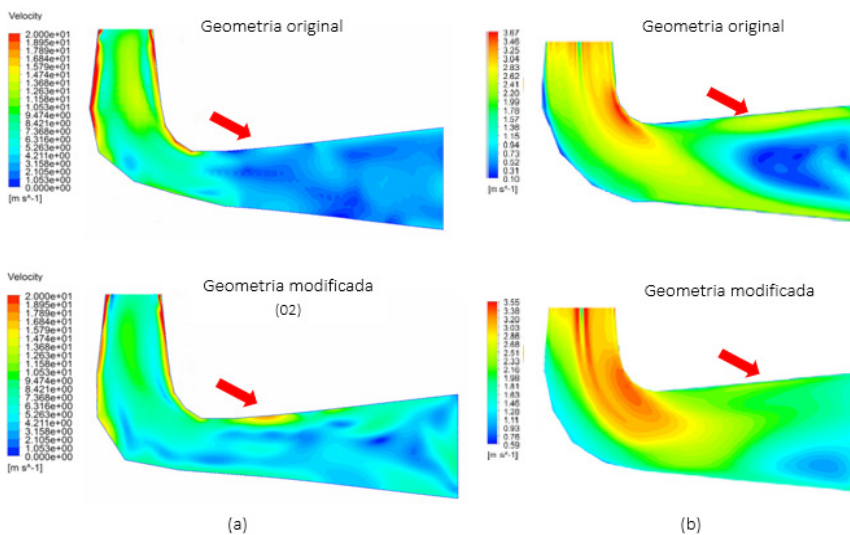


Nota-se que na geometria 02 ainda há um aumento da pressão ao longo do tubo, porém houve uma redução significativa nos valores obtidos para esse parâmetro após a modificação do cotovelo do componente, quando em comparação à geometria original. Novamente, tal fato explica-se pelas características da curvatura na geometria 02, que proporcionam uma transição mais suave na direção do escoamento.

Considerando as diferenças entre as condições de contorno estabelecidas e o modelo

de turbina avaliado em cada estudo, observa-se que a partir da modificação da curvatura interna e externa do cotovelo, para ambos os casos, o efeito identificado na distribuição de velocidade foi semelhante na região após o cotovelo, como pode ser visto na Figura 9. A partir da modificação da curvatura interna e externa do cotovelo, as regiões de baixa velocidade após a região ficaram mais homogêneas, resultando em valores de velocidades mais elevados, o que resulta em um ganho de eficiência na turbina avaliada, concordando com Arispe, Oliveira e Ramirez (2018).

Figura 9 - Comparação qualitativa entre as geometrias avaliadas no presente estudo (a) e no estudo desenvolvido por Arispe, Oliveira e Ramirez (2018) (b)



De forma a comparar os resultados obtidos no presente estudo para as três geometrias avaliadas, analisa-se também o torque gerado e a diferença de pressão média entre a entrada e a saída do tubo de extração. A Tabela III apresenta os valores obtidos para esses parâmetros.

Tabela III - Valores para torque e diferença de pressão entre entrada e saída do tubo de extração

	Geometria original	Geometria 01	Geometria 02
Torque [N.m]	1.087,91	1.376,25	1.420,81

Pode-se perceber que as geometrias modificadas apresentaram um torque mais elevado em relação à geometria original. Tais resultados reforçam os pontos identificados nas imagens apresentadas, onde nota-se uma redução na diferença de pressão ao longo do tubo e um melhor direcionamento do escoamento.

A partir das avaliações realizadas, tem-se que as propostas de modificação geométrica do tubo de extração apresentaram resultados positivos em relação à distribuição de pressão e velocidade no componente, proporcionando um maior torque no rotor e uma redução na diferença de pressão média entre a entrada e saída do tubo de extração. De forma similar aos estudos realizados por Arispe, Oliveira e Ramirez (2018), a suavização da curvatura do cotovelo proporcionou uma redução nas flutuações de velocidade na porção final do tubo de extração, contribuindo para o seu melhor desempenho, com um aumento do torque do rotor em cerca de 30% em relação à geometria original.

Conclusões

O presente estudo realizou a análise numérica de uma turbina Francis instalada

em uma pequena central hidrelétrica de 5,92 MW, tendo como objetivos principais a implementação do modelo e sua utilização para análise do escoamento, a fim de verificar um possível ganho de eficiência do equipamento a partir de modificações em seus componentes.

A partir da comparação qualitativa dos resultados obtidos com a literatura utilizada, tendo por base o estudo desenvolvido por Arispe, Oliveira e Ramirez (2018), pode-se dizer que a avaliação realizada proporcionou uma percepção adequada do comportamento do escoamento da turbina, permitindo a identificação de pontos passíveis de melhoria. A escolha do tubo de extração como objeto do estudo deve-se à sua influência no desempenho da turbina, já que a sua geometria interfere, fortemente, no comportamento do escoamento. As modificações geométricas realizadas na curvatura do tubo apresentaram os resultados esperados, oriundos da imposição de uma transição mais suave na direção do escoamento na região do cotovelo do tubo, fazendo, assim, com que houvesse uma redução de velocidades e pressões no componente.

A partir da análise dos resultados é possível afirmar que as modificações geométricas no tubo de extração proporcionam ganhos para o desempenho da turbina, sendo possível observar esses ganhos a partir da verificação dos valores obtidos para o torque do rotor, chegando a incrementos de aproximadamente 30%. Sendo assim, a repotenciação de turbinas, como o modelo estudado, é possível a partir de uma avaliação detalhada acerca do comportamento do escoamento de água ao longo do tubo de extração, além de outros métodos aplicados no rotor e na superfície do equipamento, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, T.; CHAUDHARY, S.; VERMA, S. Numerical and Experimental Analysis of Draft Tubes for Francis Turbine. **Indian Journal Of Science And Technology**, v. 10, n. 21, p.1-11, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil – BIG, Banco de Informações de Geração**. 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 26 ago. 2020.
- ANSYS INC. **Ansys CFX-Solver Theory Guide**. Release 12.1, 2009.
- ARIFF, M.; SALIM, M.; CHEA, S. C. Wall y^+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: Part 2 - High Reynolds Number. *In: Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, 2009.
- ARISPE, T. M.; OLIVEIRA, W.; RAMIREZ, R. Francis turbine draft tube parameterization and analysis of performance characteristics using CFD techniques. **Renewable Energy**, v. 127, p.114-124, 2018.
- CESBE S.A., Engenharia e Empreendimentos. PCH: modelo de sucesso na geração de energia.2015. Disponível em: <http://www.cesbe.com.br/pch-modelo-de-sucesso-na-geracao-de-energia/>. Acesso em: 25 ago. 2019.
- CHAKRABARTY, S.; SARKAR, B. K.; MAITY, S. CFD Analysis of The Hydraulic Turbine Draft Tube to Improve System Efficiency. **Matec Web of Conferences**, v. 40, p.1-6, 2016.
- CHOI, H.-J.; ZULLAH, M. A.; ROH, H.-W.; HA, P.-S.; OH, S.-Y.; LEE, Y.-H. CFD validation of performance improvement of a 500 kW Francis turbine. **Renewable Energy**, v. 54, p.111-123, 2013.
- CIBULSKI, L. J.; SILVA, C.V. Análise numérica da repotencialização de uma turbina Francis. **Perspectiva**, v. 39, n. 146, p. 57-71, 2015.
- COLNAGO, G. R. **Contribuição para a Otimização de Turbinas em Usinas Hidrelétricas: Especificação e Operação**. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- COSTA, L. M. F. **Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento de vento em pontes suspensas**. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- FREIRE, A. S.; MENUT, P. P. M.; SU, J. **Turbulência**. Rio de Janeiro: ABCM, 2002.
- GOHIL, P. P.; SAINI, R. P. Effect of temperature, suction head and flow velocity on cavitation in a Francis turbine of small hydro power plant. **Energy**, v. 93, p. 613-624, 2015.
- HUNT, J. D.; STILPEN, D.; FREITAS, M. A. V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 208-222, 2018.
- JEON, J H; BYEON, S S; KIM, J. Effects of draft tube on the hydraulic performance of a Francis turbine. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 52, n. 5, p.1-6, 2013.
- KC, A.; LEE, Y.; THAPA, B. CFD study on prediction of vortex shedding in draft tube of Francis turbine and vortex control techniques. **Renewable Energy**, v. 86, p.1406-1421, 2016.
- LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 3, p. 269-289, 1974.

LÓPEZ, D. P. P. **Simulação computacional de CFD de um pequeno trocador de calor casco e tubo**. 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2017.

MENTER, F. R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Taylor&Francis: 1980.

WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA Journal**, v. 26, p. 1299-1310, 1988.

ZHANG, H.; ZHANG, L. Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. **Procedia Engineering**, v. 31, p.156-165, 2012.