

PARAMETRIZAÇÃO E MALHAGEM DE TURBINAS HIDRÁULICAS AXIAIS PARA SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO UTILIZANDO UM CÓDIGO CFD.

Leonardo de Oliveira Dias – UFPA , leonardodias22@zipmail.com.br
Conjunto Orquídea, rua 2, nº16, Montese, Belém, Pará, CEP: 66070-710

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01
CEP 66075-110 - Caixa postal 479, PABX +55 91 211-2121 - Belém - Pará – Brasil

Fábio Alfaia da Cunha – UFPA , alfaia@click21.com.br

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01
CEP 66075-110 - Caixa postal 479, PABX +55 91 211-2121 - Belém - Pará – Brasil

Márcio Ferreira Martins – UFPA , marciofm@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01
CEP 66075-110 - Caixa postal 479, PABX +55 91 211-2121 - Belém - Pará – Brasil

Resumo: A utilização de softwares cada vez mais avançados traz grande evolução nos métodos de pesquisa e análise de resultados em fenômenos físicos. O objetivo deste trabalho é desenvolver metodologias para manipulação dos parâmetros geométricos de turbinas hidráulicas para implementação na simulação utilizando um código CFD. O trabalho em seu desenvolvimento teve suas bases no estudo da Linguagem de programação AutoLISP, pois foi nele que foi escrito um programa que gera automaticamente a geometria de uma turbina a partir de determinados parâmetros de entrada no ambiente CAD. Uma vez gerada a geometria da turbina procede-se a malhagem e imposição das zonas de condições de contorno no GAMBIT que é um software que possibilita a geração de malhas não estruturadas que são largamente utilizadas pelos softwares CFDs atuais. No final do trabalho é mostrado o resultado de um cálculo de escoamento 3D (em três dimensões) em torno de uma turbina feito no software FLUENT.

Palavras-chave: GAMBIT, CAD, Turbinas.

I. MODELAMENTO DO ESCOAMENTO TURBULENTO

Considerando o caso de um escoamento estacionário e incompressível com viscosidade constante, a descrição do escoamento turbulento pode ser feita pela equação da conservação da massa e pelas equações de Reynolds. Tais equações governantes podem ser escritas em uma forma de tensor cartesiana como:

Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equações de Reynolds:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

As equações de Reynolds precisam de equações adicionais para que possam ser resolvidas. O fechamento é realizado através dos modelos de turbulência que fornecem os termos adicionais. Um método comum para o fechamento das equações de Reynolds emprega a hipótese de Boussinesq para relacionar as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média. Esta aproximação é usada no modelo k- ϵ . A vantagem desta aproximação é o custo computacional relativamente baixo associado com a computação da viscosidade turbulenta, μ_t . No modelo k- ϵ , duas equações de transporte adicionais (para a energia cinética turbulenta, k, e para taxa de dissipação turbulenta, ϵ) são resolvidas e a μ_t é computada como uma função de k e ϵ . Neste trabalho é utilizado uma variante do modelo k- ϵ tradicional desenvolvido por Orszag *et al.* (1993) através da Teoria de Grupo de Renormalização chamado de k- ϵ RNG. Neste modelo é utilizada uma técnica de eliminação de escalas aplicada às equações de Navier-Stokes. As constantes e funções que aparecem no modelo são obtidas teoricamente, e não empiricamente como no caso do modelo k- ϵ tradicional.

II. GERAÇÃO DA GEOMETRIA DA TURBINA

II.1) Geração dos Perfis Aerodinâmicos

Sabe-se que as pás de uma turbina podem ser construídas a partir de suas coordenadas espaciais, tomando como referência o eixo central da turbina. Pode-se realizar também uma aproximação, começando com uma análise das pás da turbina usando o método a seguir:

O método mais utilizado para a obtenção da geometria de turbinas é o método do traçado de “grade” que determina a disposição correta e inclinação dos perfis aerodinâmicos. De maneira geral, os perfis aerodinâmicos usados em projetos possuem forma padronizada, referente a cada família de perfis, os quais são possíveis de serem analisados graças ao método de grade que seria um corte transversal às pás da turbina, formando para isso um cilindro de corte:

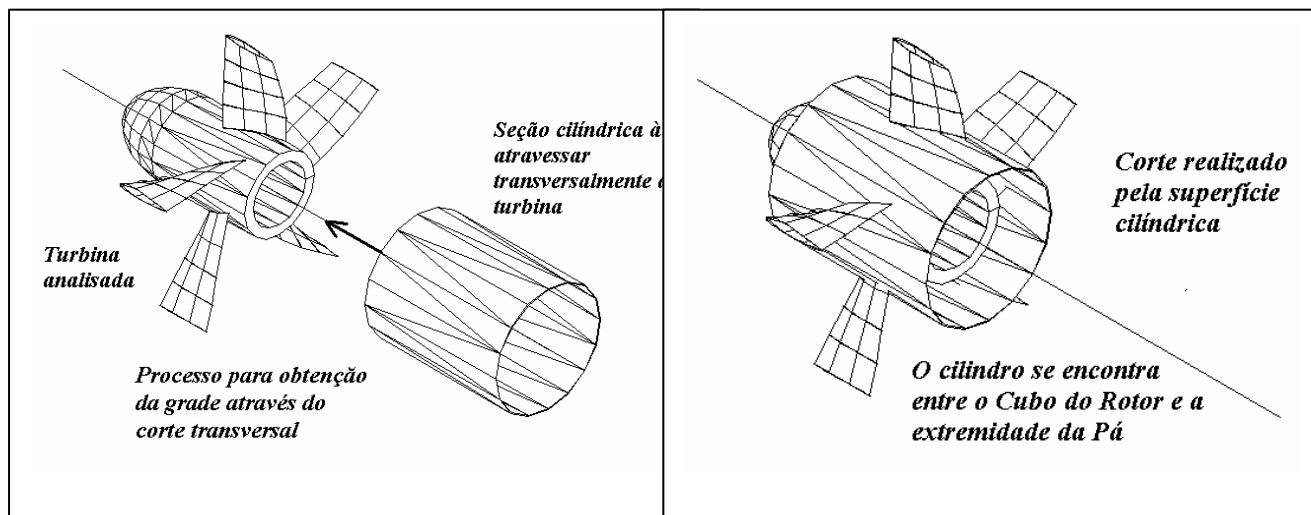


Figura II.1: Obtenção do Perfil de Grade

Após ter sido realizado o corte cilíndrico, esta superfície é planificada, dando forma ao que denominamos “grade” de acordo com a figura II.2 seguinte:

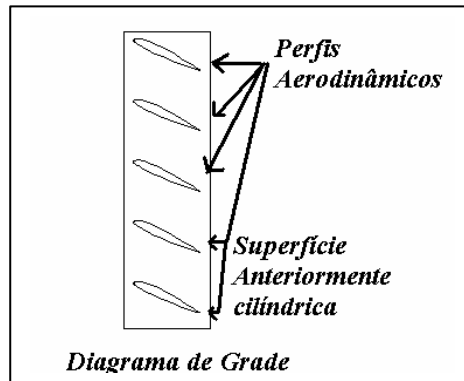


Figura II.2: Perfis aerodinâmicos no diagrama de grade

Os perfis aerodinâmicos são separados e analisados, com o propósito que se escolha, no momento da obtenção de uma turbina, o perfil que mais se adeque às características do projeto, para um melhor rendimento da máquina.

Os perfis ao longo da pá podem ter fina espessura, como chapas ou pode ser constituído de perfis boleados e largos. Esse é o caso que geralmente é usado para o tipo de turbina aqui estudado. Os perfis boleados podem ser simétricos, onde a parte superior é semelhante à inferior, ou pode ter características totalmente diferentes de acordo com os parâmetros de projeto. Os perfis mais usuais são os padronizados, e obtidos por uma série de testes convenientes, pela National Advisory Committee of Aeronautics (NACA). Usam-se também os perfis do Instituto de pesquisa de Göttingen, que na sua nomenclatura vêm precedido das letras Gö e posteriormente o número correspondente do perfil.

A diferenciação dos perfis NACA e Göttingen também está no sistema de coordenadas, onde em Göttingen usa-se, em quase todos os casos, o eixo das abcissas tangenciando a parte inferior do perfil, já nos perfis NACA, o eixo das abcissas liga o perfil do bordo de ataque ao bordo de fuga, resultando em diferentes comprimentos de perfil (corda L), que podem ser compreendidos como comprimento das pás ou profundidade dos perfis.

Usando-se o AutoLISP (linguagem de programação usada que é interna ao AutoCAD), cria-se um novo comando (*defun*) com o nome de *prog*, depois usa-se a função *setq* e cria-se as constantes para a primeira fase do programa (*ro*, *gr*, *k11*, *k12*, *k13*):

- **ro densidade da água**
- **gr aceleração da gravidade**
- **K11, k12, k13 constantes existentes em algumas relações**

Depois existe a chamada por entrada do operador (*q* e *ha*), procede-se o cálculo da potência nominal (*p*) e depois aplica-se um condicional para cada valor de *p*, e fazem-se alguns cálculos para que se determine o valor de *Nq* e de outras constantes como:

- **n rotação da turbina**
- **vec velocidade específica constante**
- **dec diâmetro específico constante**
- **cp coeficiente de pressão**
- **cv coeficiente de vazão**
- **ddec diâmetro em relação a dec**
- **dcp diâmetro em relação ao cp**
- **dcv diâmetro em relação ao cv**
- **dem diâmetro externo medio**
- **dim diâmetro interno medio**
- **r1, r2, r3, r4 e r5 raios das 5 estações**

Opta-se, então, por uma repetição do restante do programa igual ao número de estações requerido e então adota-se outras constantes para a Segunda parte do programa ($m, k1, ang, t, a, b, d, f, e, g, rt, rf, r$) e os valores de entrada do operador ($c, teta, r$):

- As constantes **m, k1 e t** são dados amarrados para cada perfil;
- As constantes **a, b, d, f, e e g** são constantes da equação para o cálculo de **yt**, que significa a cota da linha de centro do perfil, e as linhas superior e inferior;
- Os valores de entrada do operador são os valores desejados no projeto: **c** = corda do perfil, **teta** = ângulo de construção do perfil, **r** = raio da estação em que se encontra o perfil.
- Os valores de **ang, rf e rt**, são calculados da seguinte forma:

$$ang = (teta \times p) \div 180^\circ \quad rt = 1,1019 \times t^2 \times c \quad rf = 0,00126 \times c$$

ang: transformação do ângulo de rad para graus

rt: raio do círculo que forma o bordo de ataque

rf : raio do círculo que forma o bordo de fuga

Como já foi dito, amarra-se as coordenadas do eixo X ($x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, x11, x12, x13, x14, x15, x16, x17, x18, x58, x59, x60, x61, x62, x63, x64, x65, x66$), que servirão, com o auxílio das devidas equações, para encontrar a coordenada no eixo Y e formar um ponto no eixo XY.

Faz-se o cálculo do **yt** para cada ponto de acordo com a fórmula:

$$yt = \frac{t}{g} \cdot (a\sqrt{x} + bx^3 - dx - fx^2 - ex^4)$$

Yt indica a distância entre a linha de centro até uma das linhas ou inferior ou superior, e varia de perfil para perfil, pois cada um deles possui um valor de “t”, o que modifica totalmente a geometria do perfil. As outras coordenadas são constantes para qualquer família NACA.

Faz-se, então o cálculo da ordenada **yc** da linha central para cada ponto de acordo com as equações abaixo:

$$yc = \frac{k1}{6} \cdot [x^3 - 3mx^2 + (3-m) \cdot m^2 x] \quad m \leq x \leq 1$$

$$yc = \frac{k1}{6} \cdot m^3 \cdot (1-x) \quad 0 \leq x \leq m$$

Yc indica a coordenada “y” da linha central do perfil, já que este possui as coordenadas do eixo “x” como um parâmetro inicial.

Constroem-se, por conseguinte, os pontos da linha central ou linha de centro P(x, yc).

Passa-se para outra etapa já com a linha principal formada. Essa etapa consiste em transladar o eixo referencial que se encontrava no ponto P(0,0), para o ponto de maior largura do perfil (no nosso caso NACA23012) apenas subtraindo-se o valor da translação pelos valores da abscissa, da seguinte forma:

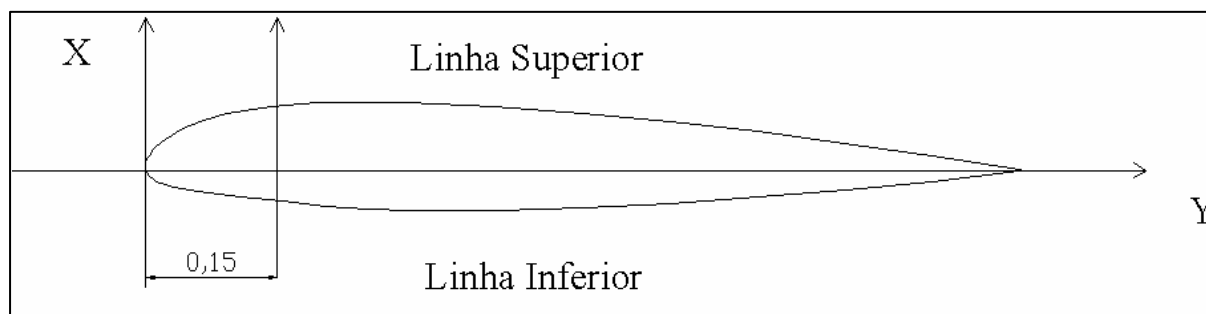


Figura II.3: Perfil NACA 23012 sofrendo translação no eixo x

Constroem-se, por conseguinte os pontos transladados da linha central P(xc, yc).

Passando-se para outra etapa, iremos rotacionar essa linha no novo eixo formado da seguinte maneira (de acordo com o apêndice I):

- Acha-se a distância do centro ao ponto a ser rotacionado:
- Rotaciona-se o ponto da seguinte maneira:

$$d = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$$

$$x_{cr} = d \cos[\text{atg}(y_c/x_c) + \text{ang} + p] \quad 0 \leq x \leq 0,15$$

$$y_{cr} = d \sin[\text{atg}(y_c/x_c) + \text{ang} + p]$$

$$y_{cr} = d \sin[\text{atg}(y_c/x_c) + \text{ang}] \quad 0,15 \leq x \leq 1$$

$$x_{cr} = d \cos[\text{atg}(y_c/x_c) + \text{ang}]$$

Constroem-se os pontos rotacionados de acordo com o ângulo “teta” especificado pelo usuário.

Além da linha central, o mesmo procedimento é feito para os pontos que formam a linha superior e inferior que é obtida de acordo com o artifício matemático:

$$Xs_n = \left[x - Yt_n \cdot \sin(a \tan(Y_c/x)) \right] \quad y_{s_n} = \left[y + Yt_n \cdot \cos(a \tan(Y_c/x)) \right]$$

Em uma nova fase transformam-se as coordenadas do ponto de cartesianas para cilíndricas da seguinte forma:

Inicialmente :

$$z = r \Rightarrow P(x, y, z) = P(x, y, r)$$

$$P_c = (x, y_c, z_c)$$

$$z_c = r \cdot \cos(y/r)$$

$$y_c = r \cdot \sin(y/r)$$

Esse mesmo passo é feito para todos os pontos do perfil, para que o desenho transforme-se totalmente, agora girado no eixo cartesiano e modelado cilíndricamente.

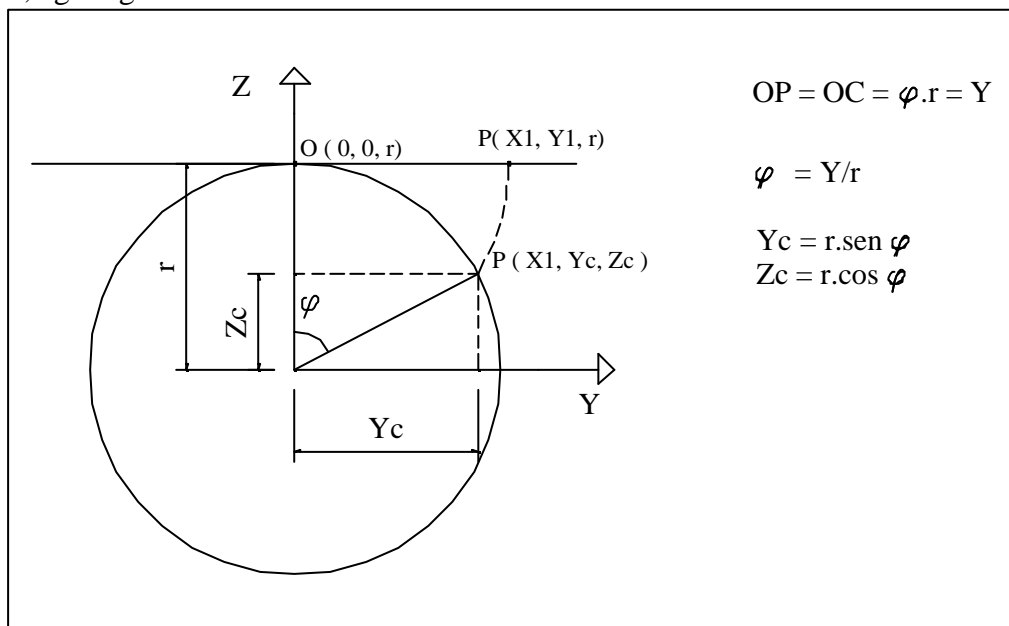


Figura II.4: Mudança de coordenadas para a junção perfeita ao rotor

II.2) Geração e Malhagem da Pá

Para esta tarefa foi utilizado o software GAMBIT que é o gerador de geometrias e malhas do FLUENT. O GAMBIT possui uma linguagem de programação própria, por isso foi necessário escrever todos os procedimentos para geração da geometria da turbina em tal linguagem. O GAMBIT denomina seus arquivos de procedimentos de *journal*. Todos os comandos contidos no *journal* são executados na sequência em que eles são lidos. A metodologia para geração da geometria da turbina no GAMBIT é listada abaixo, sendo que cada passo corresponde a uma sequência de comandos contidos no arquivo de procedimentos (*journal*).

1. A partir das coordenadas dos pontos do CAD foram gerados pontos no GAMBIT (figura II.5);
2. Foram geradas curvas passando pelos pontos dos perfis e também ligando os mesmos (figura II.5). Cada curva (perfil) é interpolada por 67 pontos;
3. Superfícies foram geradas a partir das curvas dos perfis e das curvas que os ligam;
4. As superfícies foram utilizadas para geração do volume de uma pá da turbina;
5. Foram copiados 3 pás, sendo estas espaçadas 90° uma das outras;
6. Foi gerado o volume do eixo da turbina e através de uma operação de união este foi incorporado aos volumes das pás. A geometria resultante é mostrada na figura II.6(B);
7. Foi gerado um cilindro, figura II.6(A), representando o fluido no interior do canal onde está a turbina. O comprimento do cilindro é igual ao do eixo da turbina;
8. É subtraído o volume da turbina do volume criado no item 7. O volume resultante corresponde ao volume de fluido entorno da turbina, figura II.6(C).

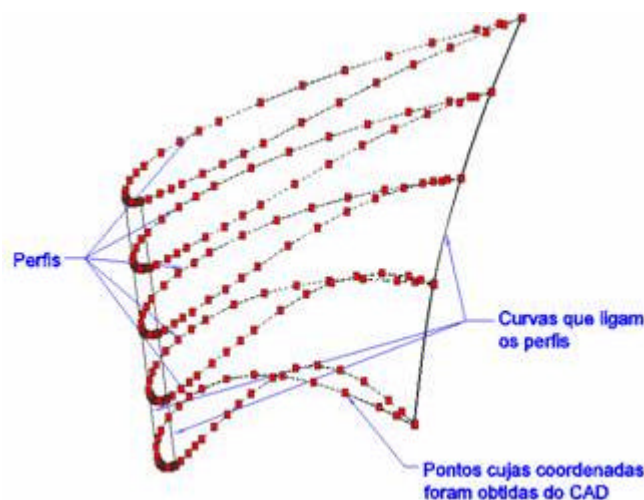


Figura II.5. Curvas e pontos de construção da turbina.

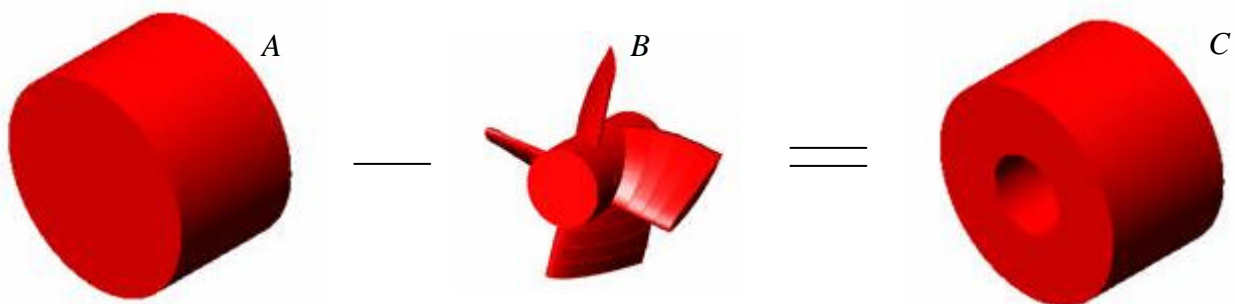


Figura II.6. Volumes A e B utilizados para geração do volume de fluido entorno da turbina (C).

II.2) Malhagem da Geometria da Turbina

A malha gerada foi do tipo não-estruturada. Foram utilizados elementos tetraédricos para a malhagem do domínio. Os elementos das duas primeiras camadas mais próximas das paredes foram ajustados para serem duas vezes menores do que os demais. Na figura II.7(a) é mostrada a malha do volume de fluido entorno da turbina. Já na figura II.7(b) são mostradas as paredes do volume de fluido malhadas, sendo omitida a malha interna do volume e uma das superfícies. O número total de elementos utilizados para a malhagem do domínio foi de 507.621.

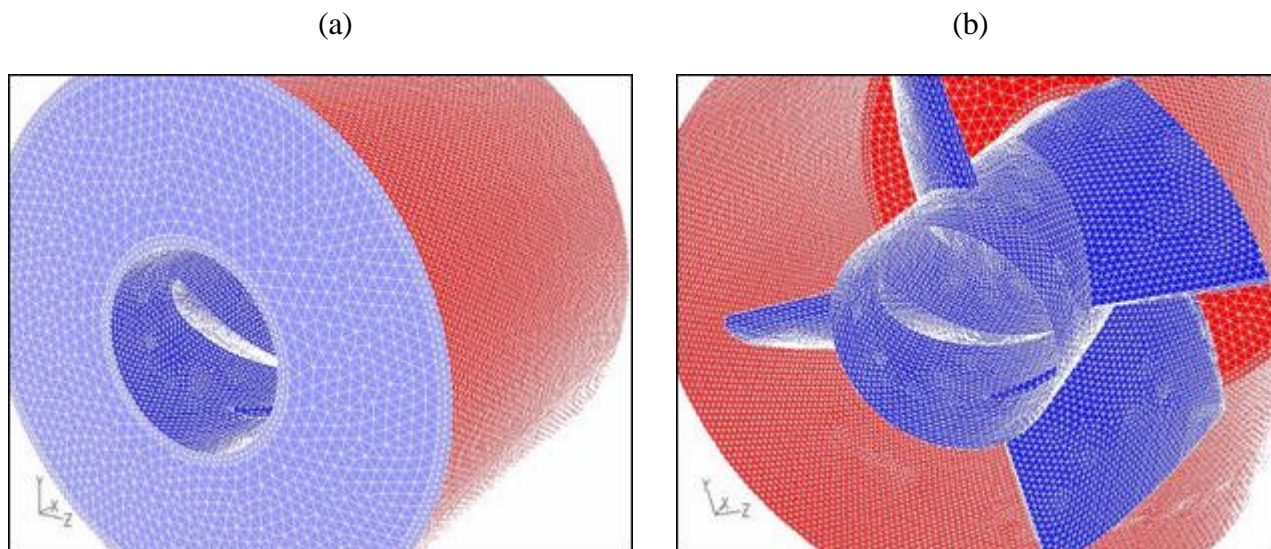


Figura II.7. Malha da turbina (a) e Superfícies que correspondem às paredes do domínio (b).

II.3) Condições de Contorno e Solução Numérica

O cálculo realizado se resume à determinação do campo de escoamento de fluido entorno da turbina considerada imóvel. Foram admitidas condição de não deslizamento nas paredes, uma velocidade de entrada de fluido constante de 10 m/s e pressão de referência na saída do canal.

As simulações numéricas foram executadas no código de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) FLUENT v.6.1. que resolve as equações governantes utilizando o método de volumes finitos em um sistema de malhas não-estruturadas. O algoritmo acoplamento pressão-velocidade empregado foi o SIMPLE. Um esquema de discretização de segunda ordem foi utilizado na equação da pressão. Um esquema de primeira ordem foi utilizado nas demais equações. Como critério de convergência, a soma dos resíduos absolutos normalizados em cada volume de controle para todas as variáveis é controlada para serem menores que 10^{-4} . O solver foi ajustado para rodar com precisão simples nos cálculos. Ao todo foram resolvidas 6 equações, sendo uma equação da conservação da massa, 3 equações de Reynolds e duas equações do modelo de turbulência.

III. RESULTADOS

Nesta parte do trabalho serão mostrados os resultados das simulações CFD. Na figura III.1 é omitido o volume do fluido, sendo mostrada apenas a distribuição de pressão nas superfícies das pás e eixo da turbina. Já na figura III.2 é mostrado o campo de velocidades em um plano transversal ao eixo da turbina, localizado no ponto médio da corda do perfil da extremidade da pá.

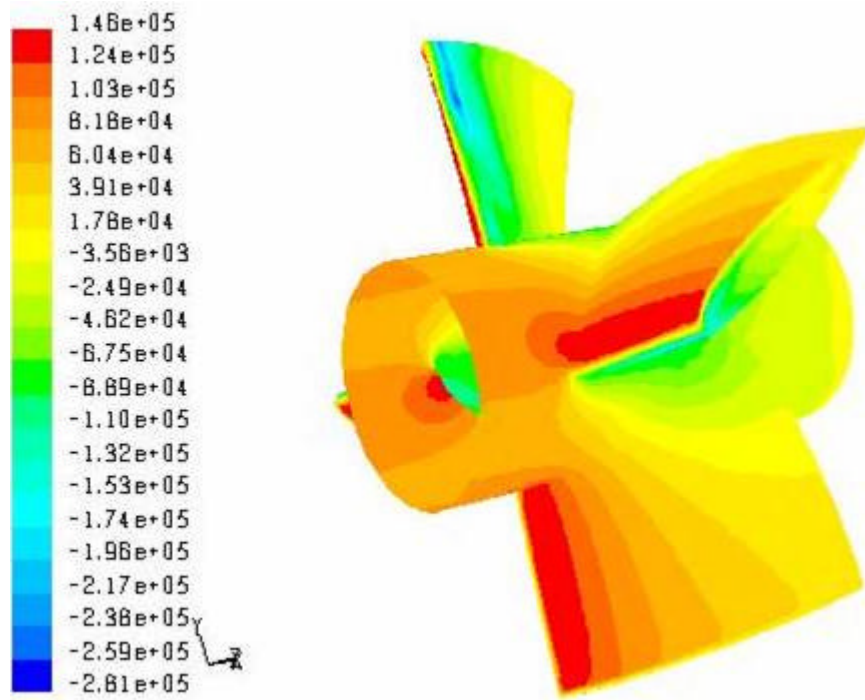


Figura III.1. Contornos de Pressão Estática (Pa) na Superfície das Pás e Eixo da Turbina.

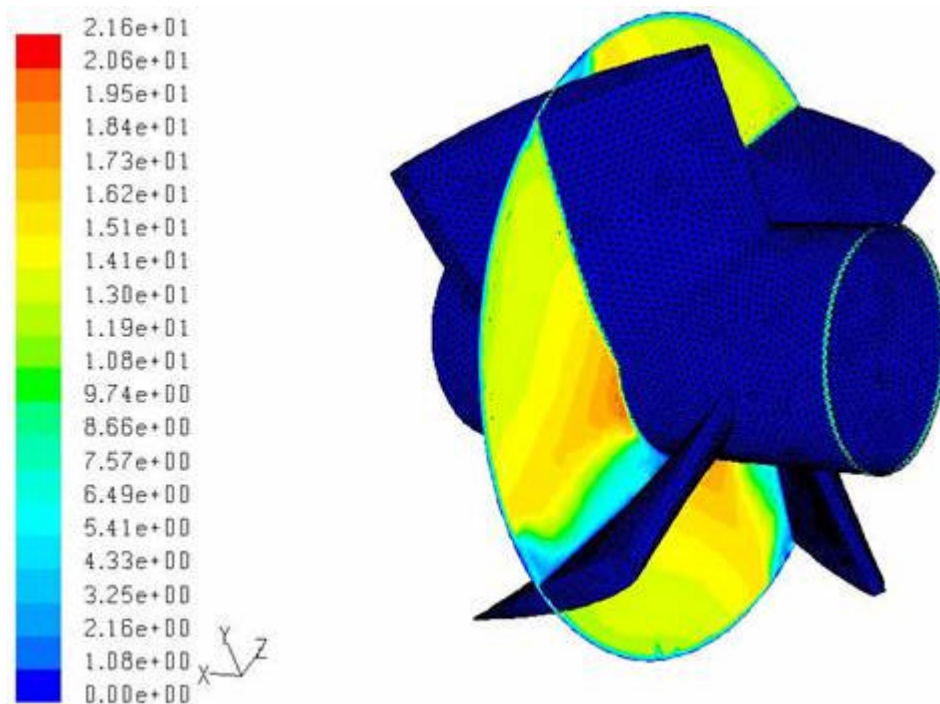


Figura III.2. Distribuição de velocidade (m/s) em um plano trans versal ao eixo da turbina.

IV. CONCLUSÃO

Como já era esperado, o trabalho desenvolvido para a visualização de turbinas hidráulicas axiais serviu de base para uma análise mais profunda usando métodos numéricos, como o de volumes finitos, utilizando malhagem não estruturada para a obtenção de parâmetros fundamentais para a simulação e observação de fenômenos físicos da turbina em funcionamento. No trabalho anterior, utilizava-se exclusivamente o AutoCAD para a visualização da turbomáquina, agora usam-se os programas GAMBIT e FLUENT dando continuidade ao projeto com a malhagem e simulação de escoamento.

Este trabalho descreveu as etapas iniciais e indispensáveis para realização de uma simulação completa do escoamento entorno de uma turbina axial. Foi descrita a metodologia para geração da geometria de uma turbina axial no programa GAMBIT a partir de dados de um programa CAD. Tal geometria foi malhada e foi realizado um cálculo considerando a turbina imóvel. O cálculo é preliminar e tem a função de testar geometria e malha gerada. O próximo passo é isolar um setor que represente a turbina para que se possa tirar proveito de sua simetria cíclica (desta forma o domínio é reduzido a um quarto do total), inclusão do estator no domínio, geração de malhas mais elaboradas e realização de um cálculo considerando a interação entre o rotor e o estator.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOOTT, A. "Theory of wing sections", Ed. Livros Técnicos e Científicos, 4ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 1979.
- BRAN, R; DE SOUZA, Z, "Máquinas de Fluxo: turbinas, bombas, e ventiladores", 1ª Edição, Ed. Ao Livro Técnico, 1980, Rio de Janeiro RJ
- FLUENT Inc., 2003, "FLUENT 6.1, User's Guide", Volume, vol. 1-4, Lebanon, USA.
- KRAMER, W; KRAMER, D, "Programando em AutoLISP" 1ª Edição, Ed. MAKRON, MCGRAW-HILL, 1995, São Paulo SP
- PFLEIDERER, CARL, "Máquinas de Fluxo", Ed. Livros Técnicos e Científicos, 4ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 1979.
- Schweiger, F. and Gregori, J., "Analysis of Small Hydro Turbine Design", *Water Power & Dam Construction*, pp. 8-11, 1990.
- W. FOX, R ; T. MCDONALD, A, "Introdução à Mecânica dos Fluidos" 4ª Edição Revista, Ed. LTC, 1998, Rio de Janeiro, RJ;

PARAMETRIC AND MESHING OF AXIAL HYDRAULIC TURBINES FOR FLOW SIMULATION USING A CFD CODE.

Leonardo de Oliveira Dias – UFPA , leonardodias22@zipmail.com.br

Conjunto Orquídea, rua 2, nº16, Montese, Belém, Pará, CEP: 66070-710

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01
CEP 66075-110 - Caixa postal 479, PABX +55 91 211-2121 - Belém - Pará – Brasil

Fábio Alfaia da Cunha – UFPA , alfaia@click21.com.br

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01
CEP 66075-110 - Caixa postal 479, PABX +55 91 211-2121 - Belém - Pará – Brasil

Márcio Ferreira Martins – UFPA , marciofm@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01
CEP 66075-110 - Caixa postal 479, PABX +55 91 211-2121 - Belém - Pará – Brasil

Abstract: *The use of softwares more and more advanced brings a great evolution in the research methods and analysis of results in physical phenomena. The objective of this work is to develop methodologies for manipulation of the geometric parameters of hydraulic turbines for implementation in the simulation using a CFD code. The work in its development was on bases in AutoLISP's programation language study, because in it that was written a program that generates automatically the geometry of a turbine starting from certain entrance parameters in the CAD ambient. Once generated the geometry of the turbine it was proceed the meshing and imposition of the areas of outline conditions in GAMBIT that is a software that makes possible the generation of unstructured meshes that are used broadly by the CFDs softwares current. In the end of the work the result of a calculation of 3D (three dimensions) flow is shown around a turbine done in the FLUENT software.*

Keywords: *GAMBIT, CAD, Turbines.*