



Dimensionamento por Algoritmo de um Rotor Axial de uma Turbina Hidráulica para Geração de Energia Elétrica em uma Propriedade Agrícola

Algorithmic Design of an Axial Rotor for a Hydraulic Turbine to Generate Electrical Energy in an Agricultural Property

Alexandre de Castro Salvestro

Angela Maria Picolloto

Lucídio Molina Filho

Jean Paulo Silva Natal

Matheus Pastori Bosco

Raul Victor Caetano Furquim

Resumo: As propriedades agrícolas desenvolvem diversas atividades que envolvem o uso da energia elétrica, cujo consumo pode gerar grandes gastos ao produtor rural. Muitas dessas propriedades contam com rios ou riachos, cujo potencial hidráulico muitas vezes não é aproveitado, visto que pode ser empregado para geração sustentável de energia elétrica por meio de uma Micro Central Hidrelétrica. Com foco no desenvolvimento de um programa no software Microsoft Excel, este trabalho busca simplificar, por meio de algoritmo, o caminho complexo por um grande volume de equações para se obter os dados necessários para construção do rotor, um dos principais componentes de uma turbina hidráulica, a partir de dados de entrada coletados no rio da propriedade rural em que se pretende realizar a instalação da turbina hidráulica. Após desenvolvimento do algoritmo e aplicação dos dados de entrada coletados, foi possível obter, para a aplicação em estudo, um rotor de quatro pás com diâmetro de 1100 mm, capaz de fornecer 170 kW de potência ao eixo, evidenciando a potencial capacidade de geração de energia elétrica em prol do produtor rural.

Palavras-chave: energia elétrica; turbina hidráulica; rotor.

Abstract: Farms develop various activities involving the use of electricity, these consumptions can generate large expenses to the producer. Many of them have in their lands rivers or streams whose hydraulic potential can be employed for sustainable generation of electricity through a Micro Hydroelectric Power Station and are not taken advantage of. Focusing on the development of a program in Microsoft Excel software, this work seeks to algorithmically simplify a complex path through a large volume of equations to obtain the data needed to construct the rotor, one of the main components of a hydraulic turbine, from input data collected in the river of the rural property in which it is intended to install the hydraulic turbine. After developing the algorithm and applying the input data collected, it was possible to obtain for the study application a four-bladed rotor with a diameter of 1100mm, capable of supplying 170 kW of power to the shaft, showing a potential power generation capacity in for the farmer.

Keywords: electric power; hydraulic turbine; rotor.

INTRODUÇÃO

Em suas mais diversas formas, a energia elétrica se tornou indispensável para a sobrevivência da espécie humana e seu desenvolvimento socioeconômico (ANEEL, 2005). Ela está presente na maioria das atividades do cotidiano, seja em meio urbano ou rural, como fonte de iluminação, calor ou força motriz.

A manutenção de uma propriedade rural pode exigir uma quantia significativa de energia elétrica, tanto para o conforto de seus habitantes em suas residências quanto para acionamento de equipamentos como bombas hidráulicas para irrigação, exaustores de aviários, silos de armazenagem de grãos, iluminação de barracões, ordenhas mecanizadas dentre outras instalações. Tais equipamentos somados podem consumir uma elevada quantidade de energia, o que representa um gasto significativo ao produtor, tornando meios sustentáveis de obtenção de energia elétrica a partir dos recursos disponíveis na propriedade, como rios e riachos, uma boa opção para reduzir a conta com a companhia de abastecimento.

A energia hidráulica foi uma das primeiras formas de energia que substituiu a força motriz de origem animal. No início, era utilizada particularmente para moagem de grãos e bombeamento de água, sendo que uma das primeiras formas de conversão de energia hidráulica em energia elétrica utilizada pelo homem foi por meio do uso da roda d'água (Macintyre, 1983).

Com princípio de funcionamento similar ao das rodas d'água, as turbinas hidráulicas são responsáveis por transformar a energia cinética da água em movimento mecânico. Dividem-se em diversos modelos, sendo as principais as do tipo Pelton, Francis, Bulbo, Hélice e Kaplan, considerando que “a escolha do tipo de turbina varia conforme a aplicabilidade, onde cada tipo é indicado para funcionar em uma determinada amplitude de vazão e queda” (Ost; Kraulich, 2013, p.12).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2002), o Brasil, com aproximadamente 8,5 milhões de quilômetros quadrados e condições geoclimáticas extremamente favoráveis, possui um dos maiores e melhores potenciais energéticos hidráulicos do mundo, representando cerca de 90% do fornecimento de energia elétrica do país.

O Brasil é um país agrícola e, devido à necessidade de geração de energia elétrica para atividades rurais, é interessante ao produtor, caso possua, o aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis em sua propriedade. Esse aproveitamento pode ser realizado a partir da instalação de uma Micro Central Hidrelétrica (MCH) que, dimensionada adequadamente respeitando-se a vazão e queda d'água disponíveis, poderá atenuar ou até mesmo eliminar, nos casos de maior oferta hídrica, os custos com energia elétrica.

Partindo desses princípios, esse trabalho teve como objetivo demonstrar o dimensionamento, por meio de algoritmo elaborado no software Microsoft Excel, de um rotor para turbina hidráulica de baixa potência para geração de energia elétrica em propriedades agrícolas que tenham recursos hídricos disponíveis com as mínimas características necessárias para abrigar uma MCH.

METODOLOGIA

O algoritmo para cálculo das dimensões do rotor axial, que foi desenvolvido no Software Microsoft Excel, teve como base a metodologia proposta na obra Projeto de máquinas de fluxo - Tomo 4 (2011), de autoria de Zulcy de Souza, o qual apresenta instruções e 52 equações necessárias para dimensionamento do rotor, parte principal da turbina hidráulica, e demais componentes.

Para desenvolvimento e aplicação do algoritmo para dimensionamento de um rotor axial para turbina hidráulica foram realizadas as seguintes etapas: Escolha do local com potencial hidrelétrico para estudo;

- Coleta de dados *in loco*;
- Desenvolvimento do algoritmo no Software Microsoft Excel;
- Comparação e validação do programa com exemplo do livro;
- Aplicação dos dados de entrada coletados no local de estudo no algoritmo;
- Modelagem 3D do rotor a partir das dimensões fornecidas pelo algoritmo.

Escolha do local

Para a obtenção dos dados de entrada do algoritmo para dimensionamento de um rotor para geração de energia hidrelétrica em propriedade agrícola, foi selecionado um trecho do rio Jacaré (Figura 1), localizado entre os municípios de Iporã e Brasilândia do Sul. A escolha do canal hidráulico em questão se deu pela altura de queda encontrada no local, com grande potencial de resultados sem necessidade de barragem e pela facilidade de executar o estudo *in loco*.

Figura 1 – Local de realização da coleta de dados.



Fonte: autores.

Coleta de dados

Os principais dados do local que o algoritmo exige são os valores de vazão e queda do trecho do canal em análise.

Levantamento da vazão

Seguindo as orientações de Mancintyre (1983), foi possível obter a vazão aproximada do canal através do estudo da área da seção de escoamento (S) e a velocidade de fluido (v).

Para a obtenção da área da seção, foi selecionado um trecho do canal com aproximadamente 18 metros de largura em seu montante. Com auxílio de uma estação total, a profundidade foi verificada em 8 pontos diferentes no leito do rio, distribuídos com aproximadamente a mesma distância entre si, conforme figura 2. Por meio do software de topografia TopoEvn Cad, foi possível a obtenção do esboço da seção transversal do rio, assim como a área ocupada pela água.

Figura 2 – Medição da profundidade do leito do rio.



Fonte: autores.

Segundo Mancintyre (1983), é possível obter a velocidade do fluido no canal através da cronometragem do tempo que um flutuador leva para percorrer uma trajetória retilínea delimitada por meio de marcadores distanciados entre si de 20 a 30 metros, posicionados longitudinalmente no centro do rio. Seguindo esse conceito foram fixadas duas estacas no leito do rio distanciadas em 20 metros uma da outra,

conforme figura 3, e liberada uma garrafa PET de 2 litros como flutuante acima da primeira estaca. Foi então cronometrado o tempo que a garrafa levou para percorrer o percurso entre os marcadores. A média obtida das 5 amostras coletadas (dispostas em uma tabela) foi utilizada para calcular a velocidade de escoamento do rio.

Figura 3 - Posicionamento das estacas marcadoras.



Fonte: autores.

Com o tempo médio (t) e o comprimento (L) do percurso do flutuador, foi possível calcular a velocidade (v) de escoamento com a equação 01:

$$v = L/t \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (01)$$

Estando determinadas a área da sessão do rio e a velocidade de escoamento do fluido, foi possível calcular a vazão do rio por meio da equação 02:

$$Q = S \cdot v \quad [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] \quad (02)$$

Determinação da altura de queda disponível

Para determinação da altura de queda no local, a estação total foi posicionada em um ponto que poderia realizar medições tanto a montante quanto a jusante da queda d'água. Estando posicionada conforme figura 4, foram coletadas cotas de pontos na altura da lâmina d'água, tanto acima como abaixo da queda, determinando a altura de queda disponível pela diferença entre elas.

Figura 4 – Estação total posicionada para coleta das cotas a jusante e montante.



Fonte: autores.

Outros dados de entrada para o algoritmo

Além dos dados de vazão e altura de queda disponíveis no local da instalação, o algoritmo também exige a altura do canal de fuga da instalação em relação ao nível do mar, a altura de sucção máxima, o rendimento interno e do distribuidor, assim como as tensões admissíveis do material tanto para o eixo quanto para o corpo do rotor. O valor de altitude do canal de fuga foi determinado por meio do aplicativo Google Earth, que indica a altitude no ponto desejado. A altura de sucção máxima, os rendimentos interno e do distribuidor, e as tensões adotadas, tanto de acordo com o material do eixo quanto do corpo do rotor, foram definidos com base no algoritmo desenvolvido por Souza (2011).

Desenvolvimento do algoritmo

Após estudo do roteiro de cálculo proposto por Souza (2011), as equações necessárias para obtenção das dimensões do rotor e seus perfis de pás foram transcritas para o Software Microsoft Excel, ordenadas conforme o autor propôs de forma a processarem os dados de entrada passo a passo e fornecerem os resultados esperados, como diâmetro do cubo, diâmetro externo das pás, diâmetro do eixo, potência fornecida pelo eixo, além de vários outros dados fundamentais

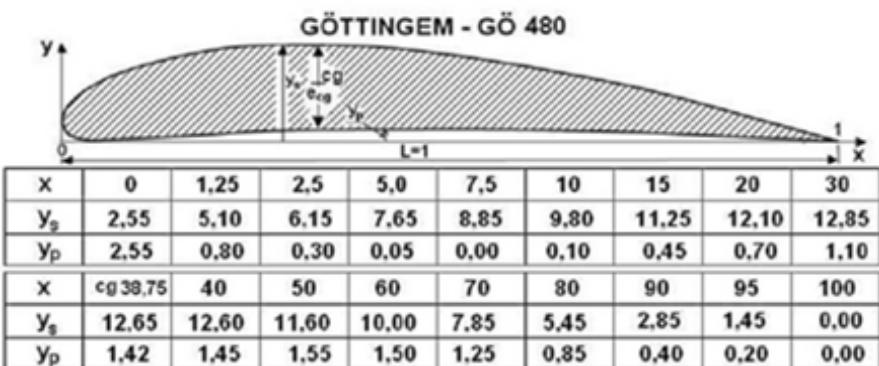
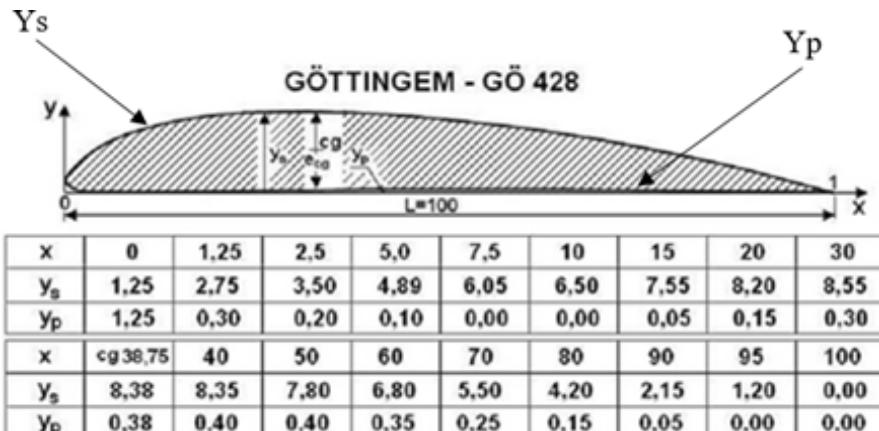
para dimensionamento do rotor que podem ser observados na própria estrutura do programa.

Após a apresentação das equações utilizadas, Souza (2011) aplicou-as em um exemplo, no qual definiu os dados de entrada e obteve resultado satisfatório. Tendo como referência esse exemplo, foram aplicados os mesmos dados de entrada usados por Souza (2011) no programa para conferência dos resultados das equações.

Determinação dos perfis

Para dimensionar o rotor é necessária a determinação dos perfis de suas pás, para a qual é necessário o dimensionamento das linhas de sucção (Y_s) e pressão (Y_p) dos perfis que formam a pá para os quais foram utilizadas as equações geradas a partir dos perfis GÖTTINGEM 480 (GÖ 480), para seções próximas ao cubo, e GÖTTINGEM 428 (GÖ 428), para seção externa, conforme figura 5.

Figura 5 - Perfis GO 428 e GO 480.



Fonte: Souza (2011).

Os perfis GO 428 e GO 480, apresentados por Souza (2011), definem por meio das coordenadas x , y_s e y_p uma equação da curva padrão gerada, conforme figura 6, para cada seção que varia de 0 à 0,3.L e 0,3 à 1,0.L, sendo L o comprimento da corda do perfil, tanto das linhas de succção quanto de pressão. Tais equações foram relacionadas por meio das equações 03 e 04 aos comprimentos da corda de cada perfil e a seus respectivos coeficientes de engrossamento fornecidos pelo algoritmo.

$$y^* = 10 \cdot y \cdot f \cdot L \quad (03)$$

$$p \quad p \quad e$$

$$y^* = 10 \cdot y \cdot f \cdot L \quad (04)$$

$$s \quad s \quad e$$

Onde:

y_p^* - coordenadas em y para linha de pressão.

y_s^* - coordenadas em y para linha de succção.

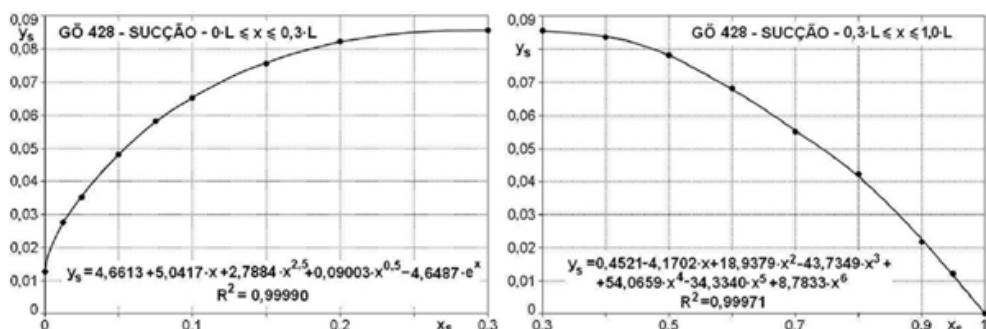
y_p - equação do perfil GO 428 ou GO 480 para determinação da linha de pressão.

y_s - equação do perfil GO 428 ou GO 480 para determinação da linha de succção.

f_e - coeficiente de afinamento ou engrossamento do perfil.

L - comprimento da corda do perfil.

Figura 6 - Equações para linha de succção, perfil GO 428.



Fonte: Souza (2011).

As coordenadas y_s e y_p dos perfis junto ao cubo, do meio e externo, fornecidas pelas equações 03 e 04, foram dispostas em tabelas (Figura 7), relacionadas ao comprimento da corda de cada perfil representado por x , cujo valor foi definido pela equação 05, e também à ordenada do centro de gravidade do perfil, definido por equação no próprio algoritmo.

$$xp = xs = 10 \cdot x \cdot L \quad (05)$$

Onde:

x_p – coordenada x da linha de pressão.

x_s – coordenada x da linha de sucção.

x – porcentagem da corda do perfil em que a coordenada se encontra.

L – comprimento da corda do perfil.

Figura 6 – Tabelas com coordenadas dos perfis.

| Tabela 4.3 – Características geométricas dos perfis da primeira aplicação | | | | | | | | |
|---|---------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
| GO 480 – cubo – $D_c=0,464$ (m) – $L_c=0,441$ (m) – $\beta_c=41,56^\circ$ – $f_{cc}=0,6695$ | | | | | | | | |
| x (mm) | 0 | 5,513 | 11,025 | 22,05 | 33,075 | 44,1 | 66,15 | 88,2 |
| cg: | 170,9 | 176,4 | 220,05 | 264,6 | 308,7 | 352,8 | 396,9 | 418,95 |
| y _p (mm) | 7,53 | 2,36 | 0,89 | 0,15 | 0 | 0,3 | 1,33 | 2,07 |
| cg: | 4,19 | 4,28 | 4,58 | 4,43 | 3,69 | 2,51 | 1,19 | 0,59 |
| y _s (mm) | 7,53 | 15,06 | 18,15 | 22,58 | 26,13 | 28,93 | 33,21 | 35,72 |
| cg: | 37,34 | 37,20 | 34,24 | 29,52 | 23,17 | 16,09 | 8,41 | 4,28 |
| | | | | | | | | 0 |
| GO 480 – médio – $D_m=0,781$ (m) – $L_m=0,575$ (m) – $\beta_m=19,92^\circ$ – $f_{cm}=0,3556$ | | | | | | | | |
| x (mm) | 0 | 7,188 | 14,375 | 28,75 | 43,125 | 57,50 | 86,25 | 115,00 |
| cg: | 222,8 | 230,0 | 287,5 | 345,0 | 402,5 | 460,0 | 517,5 | 546,25 |
| y _p (mm) | 5,21 | 1,64 | 0,61 | 0,10 | 0 | 0,20 | 0,92 | 1,43 |
| cg: | 2,902 | 2,96 | 3,17 | 3,07 | 2,56 | 1,74 | 0,82 | 0,41 |
| y _s (mm) | 5,21 | 10,42 | 12,57 | 15,64 | 18,09 | 20,03 | 23,00 | 24,73 |
| cg: | 25,86 | 25,75 | 23,71 | 29,44 | 16,05 | 11,14 | 5,83 | 2,96 |
| | | | | | | | | 0 |
| GO 428 – externo – $D=1,100$ (m) – $L=0,774$ (m) – $\beta=13,77^\circ$ – $f_{c3}=0,1841$ | | | | | | | | |
| x (mm) | 0 | 9,675 | 19,35 | 38,7 | 58,05 | 77,4 | 116,1 | 1154,8 |
| cg: | 299,925 | 309,6 | 387,0 | 464,4 | 541,8 | 619,2 | 696,6 | 735,4 |
| y _p (mm) | 1,78 | 0,43 | 0,29 | 0,14 | 0 | 0 | 0,07 | 0,21 |
| cg: | 0,54 | 0,57 | 0,57 | 0,50 | 0,36 | 0,21 | 0,07 | 0 |
| y _s (mm) | 1,78 | 3,92 | 4,99 | 6,97 | 8,62 | 9,26 | 10,76 | 11,69 |
| cg: | 11,94 | 11,90 | 11,12 | 9,69 | 7,84 | 5,99 | 3,06 | 1,71 |
| | | | | | | | | 0 |

Fonte: Souza, 2011.

A partir do preenchimento da tabela com as coordenadas dos pontos pertencentes às linhas de pressão e sucção relacionados a cada seção do comprimento da corda do perfil, foi possível selecionar os dados e, por meio do recurso “Gráfico de Dispersão” disponível no Excel, gerar o perfil de cada seção da pá do rotor em estudo.

Após estarem definidas as dimensões de cada perfil, assim como outros dados fornecidos pelo algoritmo, foi possível criar um modelo 3D do rotor por meio do software SolidWorks.

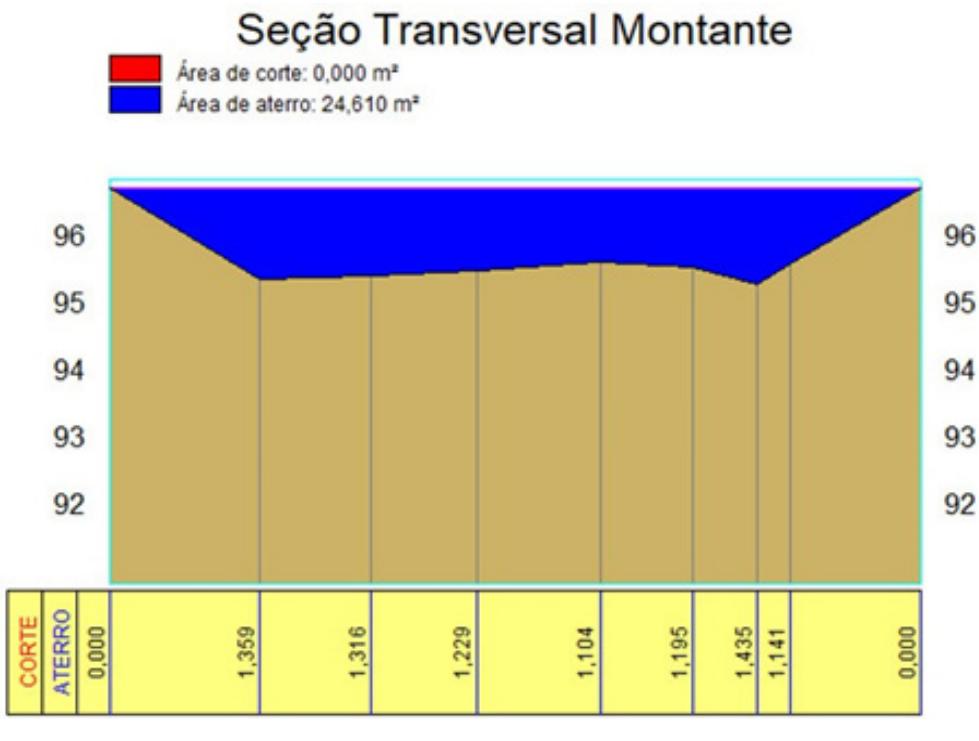
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados da queda

Vazão

Após serem realizadas as medições do leito do rio e a transferência dos dados recolhidos para o software de topografia TopoEvn Cad, foram possíveis a obtenção do esboço aproximado do leito e o valor da área ocupada pela água na seção transversal do canal, informado pelo software como “Área de aterro”, conforme a figura 7.

Figura 7 -Área da seção transversal do canal.



Fonte: autores.

Para determinação da velocidade de escoamento da água, foram registradas na tabela 1 as 5 amostras de tempo que o flutuador levou para percorrer o trajeto entre as estacas fixadas no leito do rio. Com média simples, obteve-se o tempo em segundos para cálculo da velocidade (v) para o percurso de 20 m, conforme equação 01.

Tabela 1 – Resultados das amostras de tempo obtidas no percurso de 20 metros.

| Amostras | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|----|----|------|----|----|
| Tempo (Segundos) | 75 | 78 | 74 | 79 | 74 |
| Média (Segundos) | | | 76 | | |
| Desvio Padrão | | | 2,34 | | |

Fonte: autores.

$$v = \frac{20m}{76s} = 0,263 \text{ m. s}^{-1} \quad (01)$$

Com os dados de vazão e área calculados, foi possível obter o valor da vazão do rio Jacaré por meio da equação 02.

$$Q = S \cdot v \quad (02)$$

$$Q = 24,610 \text{ m}^2 \cdot 0,263 \text{ m. s}^{-1}$$

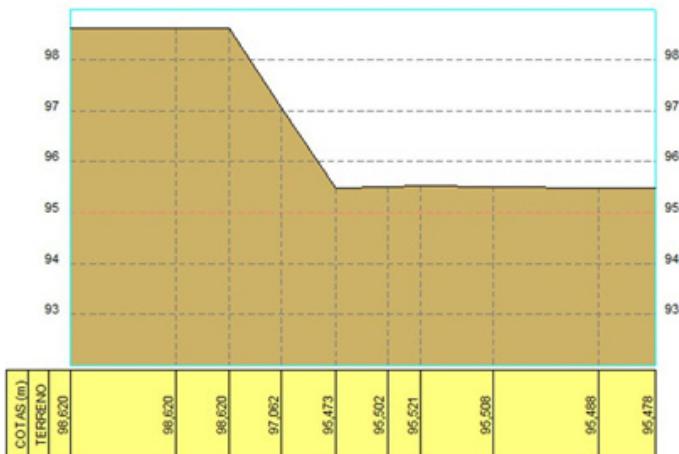
$$Q = 6,472 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Altura da queda

O valor da altura de queda foi encontrado a partir da análise do perfil longitudinal do local, conforme figura 8. As cotas do terreno foram observadas, verificando-se que no ponto mais alto, antes da queda, a lámina d'água se encontrava na cota 98,620, e após a queda, na cota 95,470, aproximadamente. Ao subtrair a cota inferior da superior, foi encontrado o valor da queda no local, de aproximadamente 3,15 metros.

Figura 8 - Desnível do terreno.

Perfil Longitudinal



Fonte: autores.

Desenvolvimento do algoritmo

Aplicação das equações no programa

O cálculo das dimensões do rotor de forma manual, seguindo o roteiro proposto por Souza (2011) é possível, mas é demorado e extenuante, além de haver possibilidade significativa de um cálculo equivocado comprometer a integridade de todos os resultados obtidos, visto que uma equação depende do resultado das anteriores para ser executada. No entanto, com o auxílio do software Microsoft Excel, foi possível compilar o grande volume de equações descritas pelo autor em seu roteiro de cálculo e obter resultados instantâneos, o que se torna prático e eficiente, além de permitir o estudo do comportamento dos perfis em tempo real ao se trabalhar com diferentes variáveis.

Ao se aplicar os dados de entrada de Souza (2011) no algoritmo do Excel, foi possível observar resultados semelhantes ao do autor, com pequenos desvios decimais evidenciados devido aos arredondamentos, o que não alterou significativamente os resultados finais. O layout do algoritmo está representado na figura 9.

Figura 9 - Figura 22 – Layout do algoritmo.

| DADOS DO ROTOR | | | | | | | |
|----------------|--|---|--|-------------------|-------------|--|--|
| Equação 1 | Vazão mínima [m³/s] | $Q_t = 0,88 \times Q$ | | 5,69536 | | | |
| Equação 2 | Coeficiente de Thoma | $\sigma_{min} = \frac{10 - 0,00122 \cdot z_b - h_{su,máx}}{H}$ | | 2,878412698 | | | |
| Equação 3 | Rotação específica para o distribuidor todo aberto | $n_{qA_{1/1}} = 628,94 \cdot \sigma_{min}^{0,5714}$ | | 1150,718979 | | | |
| Equação 4 | Vazão através do rotor com distribuidor todo aberto [m³/s] | $Q_{r_{1/1}} = n_v \cdot Q$ | | 6,34256 | | | |
| Equação 5 | Rotação [rpm] | $n = \frac{n_{qA_{1/1}} \cdot H^{0,75}}{3 \cdot Q_{r_{1/1}}^{0,5}}$ | | 360,121 | | | |
| Equação 6.1 | Número pares de pólos do gerador | $Z_p = \frac{3600}{n}$ | 9,997 | Inteiro utilizado | 10 | | |
| Equação 6.2 | Rotação recalculada [rpm] | $n_r = \frac{3600}{z_{pr}}$ | 360 | | | | |
| Equação 7 | Rotação específica para distribuidor todo aberto | $n_{qA_{1/1}} = 3 \cdot n_r \cdot \frac{Q_{r_{1/1}}^{0,5}}{H^{0,75}}$ | 1150,331818 | | | | |
| Equação 8 | Coeficiente de Thoma recalculado | $\sigma_{min} = 0,1289 + 0,2901 \cdot 10^{-3} \cdot n_{qA_{r_{1/1}}} + 0,7298 \cdot 10^{-6} \cdot n_{qA_{r_{1/1}}}^2 + 1,1572 \cdot 10^{-9} \cdot n_{qA_{r_{1/1}}}^3$ | 3,19235087 | | | | |
| Equação 9 | Altura de sucção máxima [m] | $h_{su,m} = 10 - 0,00122 \cdot z_b - \sigma_{min} \cdot H$ | | -0,360905241 | | | |
| Equação 10.1 | Vazão através do rotor [m³/s] | Hélice com distribuidor fixo | $Q_r = Q_{r_{1/1}}$ | | | | |
| Equação 10.2 | | Hélice com distribuidor móvel ou Kaplan com distribuidor fixo | $Q_r = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{qA_{r_{1/1}}} + 0,8) \cdot Q_{r_{1/1}}$ | | | | |
| Equação 10.3 | | Kaplan com distribuidor móvel $n_{qA_{r_{1/1}}} > 600$ | $Q_r = 0,62 \cdot Q_{r_{1/1}}$ | | | | |
| Equação 10.4 | | Kaplan com distribuidor móvel $300 \leq n_{qA_{r_{1/1}}} \leq 600$ | $Q_r = (0,01 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA_{r_{1/1}}}^2 - 0,12 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA_{r_{1/1}}} + 0,98) \cdot Q_{r_{1/1}}$ | | | | |
| Equação 11 | Rotação específica de projeto | $n_{qA_r} = 3 \cdot n_r \cdot \frac{Q_r^{0,5}}{H^{0,75}}$ | 1167,496897 | | | | |
| Equação 12 | Diâmetro externo da pá para THA [m] | $D = 71,348 \cdot \frac{\sqrt{H}}{n_r} + 0,388 \cdot \frac{\sqrt{Q_r}}{H^{0,25}}$ | | 1,10 | | | |
| Equação 13 | Diâmetro do cubo [m] | $D_c = \left(0,297 + \frac{68,19}{n_{qA_r}} \right) \cdot D;$ | | 0,390947708 | | | |
| Equação 14 | Altura do distribuidor [m] | $b_0 = \left(0,449 - \frac{34,026}{n_{qA_r}} \right) \cdot D;$ | | 0,461841157 | | | |
| Equação 15 | Potência no eixo [kW] | $P_{e,máx} = 9,81 \cdot Q_{r_{1/1}} \cdot H_{máx} \cdot \eta_i \cdot \eta_m;$ | | 170,554529 | | | |
| Equação 16.1 | Diâmetro do eixo [m] | Maciço | $d = 0,7914 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{e,máx}}{\tau_{fad} \cdot n_r}};$ | | 0,092160017 | | |
| Equação 16.2 | | Vazado | $\frac{d^4 - d_0^4}{d} = 0,4957 \cdot \frac{P_{e,máx}}{\tau_{fad} \cdot n_r};$ | | | | |
| Equação 17 | Numero de pás do rotor | $Z_r = 19,993 - 4,932 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA_r} + 4,65 \cdot 10^{-5} \cdot n_{qA_r}^2 - 1,412 \cdot 10^{-8} \cdot n_{qA_r}^3$ | 4 | | | | |

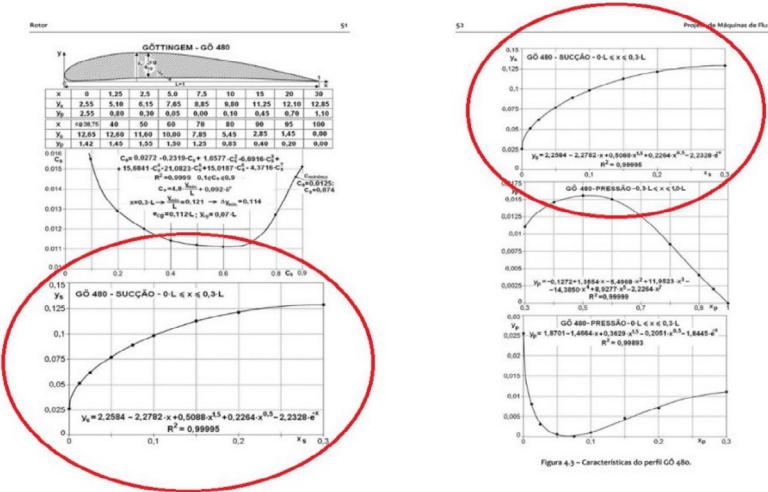
| | | | | | | | | | |
|---------------------|---|---|---------------------|---|---------------------|---|--|---|--|
| Equação 18 | Velocidade meridional teórica [m/s] | $c_m = \frac{4 \cdot Q_r}{\pi \cdot (D^2 - D_c^2)};$ | 7,868631946 | | | | | | |
| Equação 19 | Velocidade tangencial no cubo [m/s] | $u_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n_r}{60};$ | 7,369190688 | | | | | | |
| Equação 20 | Metade da diferença das projeções da velocidade absoluta na direção tangencial no cubo [m/s] | $U_c = 0,5 \cdot \Delta C_{u_c} = \frac{g \cdot H \cdot \eta_i}{2 \cdot u_c};$ | 1,845068282 | | | | | | |
| Equação 21 | Ângulo entre a direção da velocidade relativa do escoamento não perturbado W _∞ e a direção u no cubo | $\beta_{\infty c} = \arctg \frac{c_m}{u_c - U_c};$ | 54,92947299 | | | | | | |
| Equação 22 | Velocidade relativa do escoamento não perturbado no rotor junto ao cubo [m/s] | $W_{\infty c} = \frac{c_m}{\sin \beta_{\infty c}};$ | 9,614119672 | | | | | | |
| Equação 23 | Comprimento da corda do perfil junto ao cubo [m]; | $L_c = 3,173 \cdot (1,689 + 2,368 \cdot 10^{-3} \cdot n_{q_{Ar}} - 7,235 \cdot 10^{-6} \cdot n_{q_{Ar}}^2 + 4,302 \cdot 10^{-9} \cdot n_{q_{Ar}}^3) \cdot \frac{D_c}{Z_r};$ | 0,44594667 | | | | | | |
| Equação 24 | Coeficiente de sustentação do perfil junto ao cubo, sem considerar o arrasto | $C_{sc} \cong \frac{1172 \cdot 2 \cdot H \cdot \eta_i}{z_r \cdot n_r \cdot W_{\infty} \cdot L_c}$ Caso $Csc < 1,20$, prosseguir. Caso $Csc \geq 1,20$, recalcular L_c | 0,526308037 | | | | | | |
| Equação 26 | Diâmetros das seções cilíndricas [m]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $D_j = D_{j-1} + (j - 1) \frac{D - D_c}{i-1}$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 0,390947708 0,745473854 1,1 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 27 | Velocidades tangenciais [m/s] | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $u_j = \frac{\pi \cdot n_r \cdot D_j}{60};$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 7,369190688 14,0518511 20,73451151 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 28 | Componentes resultantes dos cj na direção u [m/s] | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $U_j = \frac{4,905 \cdot H}{u_j \cdot \eta_i};$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 1,845068282 0,967606325 0,655750197 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 29 | Ângulos entre as velocidades W _∞ e u _j [graus]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $\beta_{\infty j} = \arctg \frac{c_m}{(u - U)_j};$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 54,92947299 31,02195219 21,39963249 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 30 | Velocidades relativas do escoamento no rotor [m/s]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $W_{\infty j} = \frac{c_m}{\sin \beta_{\infty j}}$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 9,614119672 15,26803295 21,56552862 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 31 | Passos [m]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $t_j = \frac{\pi \cdot D_j}{z_r};$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 0,307049612 0,585493796 0,86393798 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 32 | Comprimento das cordas dos perfis [m]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $L_j = \frac{L_c \cdot D_j \cdot \cos \beta_{\infty c}}{D_c \cdot \cos \beta_{\infty j}}$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 0,44594667 0,570144406 0,774343932 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 33 | Espessura do perfil junto ao cubo em seu centro de gravidade para rotor hélice fundido em peça única [m]; | $e_{cg_c} = 0,22 \cdot (D - D_c) \cdot \sqrt{\frac{H}{\sigma_{fad}} \left(1 + \frac{L_c}{L_c}\right)}$ | 0,021589378 | | | | | | |
| Equação 34 | Espessuras dos demais perfis [m]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $e_{cg_j} = (D - 0,33 \cdot D_c - 0,67 \cdot D_j) \cdot \frac{e_{cg_c}}{D - D_c};$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 0,021589378 0,014356937 0,007124495 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 35.1 | Coeficiente de engrossamento ou afinamento do perfil junto ao cubo; | $f_{e_c} = \frac{(e_{cg}/L)_c}{0,112}$ | 0,432254167 | | | | | | |
| Equação 35.1 | Coeficiente de engrossamento ou afinamento do perfil junto ao diâmetro externo; | $f_{e_e} = \frac{(e_{cg}/L)_e}{0,08}$ | 0,115008566 | | | | | | |
| Equação 36 | Coeficientes de engrossamento ou afinamento para os perfis | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $f_{e_{480}} = \frac{(e_{cg}/L)_m}{0,112};$ $f_{e_{420}} = \frac{(e_{cg}/L)_m}{0,08};$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 0,432254167 0,224832397 0,115008566 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |
| Equação 37 | Ordenada do perfil [m]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>junto ao cubo</td><td></td></tr> <tr><td>junto a extremidade</td><td></td></tr> </table> $y_{cg_c} = 0,5 \cdot e_{cg_c} + 0,0088 \cdot f_{e_c} \cdot L_c$ $y_{cg_e} = 0,5 \cdot e_{cg_e} + 0,0038 \cdot f_{e_e} \cdot L_e$ | junto ao cubo | | junto a extremidade | | 0,012490997 0,003900661 | | |
| junto ao cubo | | | | | | | | | |
| junto a extremidade | | | | | | | | | |
| Equação 38 | Ordenadas dos demais perfis em seus centros de gravidade [m]; | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>seção junto ao cubo</td><td>1</td></tr> <tr><td>seção média</td><td>2</td></tr> <tr><td>seção externa</td><td>3</td></tr> </table> $y_{cg_j} = \frac{y_{cg_c} \cdot D - y_{cg_e} \cdot D_c - (y_{cg_c} - y_{cg_e}) \cdot D_j}{D - D_c}$ | seção junto ao cubo | 1 | seção média | 2 | seção externa | 3 | 0,012490997 0,008195829 0,003900661 |
| seção junto ao cubo | 1 | | | | | | | | |
| seção média | 2 | | | | | | | | |
| seção externa | 3 | | | | | | | | |

| | | | | | | |
|------------|---|--|---|--|-------------|--|
| Equação 39 | Distância do bordo de ataque de cada perfil até seu centro de gravidade [m]; | seção junto ao cubo | 1 | $L_{cgj} = 0,3875 \cdot L_j$ | 0,172804335 | |
| | | seção média | 2 | | 0,220930957 | |
| | | seção externa | 3 | | 0,300058274 | |
| Equação 40 | Distância do bordo de ataque de cada perfil até sua ordenada máxima [m]; | seção junto ao cubo | 1 | $L_{máxj} = 0,3 \cdot L_j$ | 0,133784001 | |
| | | seção média | 2 | | 0,171043322 | |
| | | seção externa | 3 | | 0,23230318 | |
| Equação 41 | Ordenada máxima do perfil [m]; | Junto ao cubo | | $y_{máx_c} = 1,0463 \cdot e_{cg_c} + 0,011 \cdot f_{e_c} \cdot L_c$ | 0,024709352 | |
| | | Junto a extremidade | | $y_{máx_e} = 1,0313 \cdot e_{cg_e} + 0,003 \cdot f_{e_e} \cdot L_e$ | 0,00761466 | |
| | | | | | | |
| Equação 42 | Ordenadas máximas dos demais perfis [m]; | seção junto ao cubo | 1 | $y_{máx_j} = \frac{y_{máx_c} \cdot D - y_{máx_e} \cdot D_c - (y_{máx_c} - y_{máx_e}) \cdot D_j}{D - D_c}$ | 0,024709352 | |
| | | seção média | 2 | | 0,016162006 | |
| | | seção externa | 3 | | 0,00761466 | |
| Equação 43 | reas ordenadas e o comprime | seção junto ao cubo | 1 | $(y_{máx}/L)_j$ | 0,05540876 | |
| | | seção média | 2 | | 0,028347215 | |
| | | seção externa | 3 | | 0,009833692 | |
| Equação 44 | Coeficientes de sustentação não considerando o arrasto; | seção junto ao cubo | 1 | $C_{sj} = \frac{120 \cdot g \cdot H \cdot n_i}{z_r \cdot n_r \cdot L_j \cdot W_\infty}$ | 0,528552995 | |
| | | seção média | 2 | | 0,260323294 | |
| | | seção externa | 3 | | 0,135702228 | |
| Equação 45 | elação entre o passo e as cord | seção junto ao cubo | 1 | $(t/L)_j;$ | 0,688534376 | |
| | | seção média | 2 | | 0,126921933 | |
| | | seção externa | 3 | | 1,11570317 | |
| Equação 46 | Relações entre os coeficientes de sustentação dos perfis considerando o arrasto e a influência de uma pá sobre e outra e considerando somente o arrasto; | seção junto ao cubo | 1 | $\left(\frac{C_s}{C_s}\right) = 1 + \left(1,34 - \frac{t}{l}\right)_j \cdot [tg(55,131 - 0,29 \cdot \beta_\infty - 0,0881 \cdot \beta_\infty^2 + 0,00122 \cdot \beta_\infty^3)]_j$ | 0,704203086 | |
| | | seção média | 2 | | 0,98782429 | |
| | | seção externa | 3 | | 1,084021906 | |
| Equação 47 | Coeficientes de sustentação | seção junto ao cubo | 1 | $C_{sj}^* = \left[\left(\frac{C_s}{C_s} \right) \cdot C_s \right]_j$ | 0,37220865 | |
| | | seção média | 2 | | 0,257153673 | |
| | | seção externa | 3 | | 0,147104188 | |
| Equação 48 | Ângulos de ataque [graus]; | seção junto ao cubo | 1 | $\delta_j = 10,8696 \cdot [C_s^* - 4,8 \cdot (y_{máx}/L)_j]$ | 1,154858079 | |
| | | seção média | 2 | | 1,316167708 | |
| | | seção externa | 3 | | 1,085899828 | |
| Equação 49 | Ângulos que as cordas dos perfis formam com a horizontal [graus]; | seção junto ao cubo | 1 | $\beta_j = (\beta_\infty - \delta)_j;$ | 53,77461491 | |
| | | seção média | 2 | | 29,70578449 | |
| | | seção externa | 3 | | 20,31373266 | |
| Equação 50 | Ângulos de escoamento não perturbado na entrada do rotor que serão utilizados para fixação do ângulo de saída das aletas do distribuidor no ponto de projeto [graus]; | seção junto ao cubo | 1 | $\alpha_{\infty j} = \arctg \left(\frac{c_m}{U_j} \right)$ | 76,80346947 | |
| | | seção média | 2 | | 82,98952847 | |
| | | seção externa | 3 | | 85,23613509 | |
| Equação 51 | Coeficiente médio de velocidade; | $\varphi_m = \frac{2 \cdot c_m}{u_c + u}$ | | | | |
| | | | | | | |
| Equação 52 | Rendimento médio do rotor; | $\eta_r \cong \frac{1 - \frac{0,01 \alpha 0,04}{\varphi_m}}{1 + (0,01 \alpha 0,04) \cdot \varphi_m}$ | | | | |
| | | | | | | |

Fonte: autores.

Determinação dos perfis

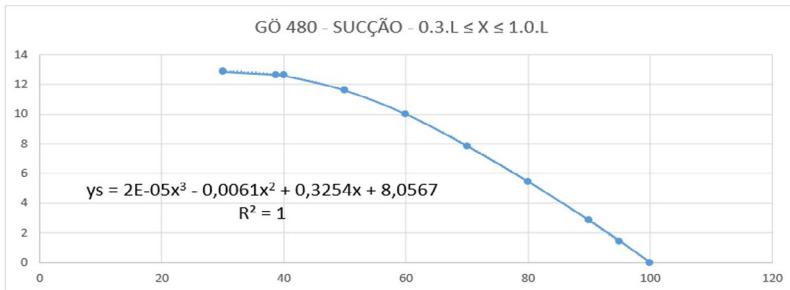
Para determinação das ordenadas Y_s e Y_p de cada perfil, sendo junto ao cubo, no meio, ou na extremidade, foram utilizadas equações determinadas pelos perfis GÖ 480 e GÖ 428, como pode ser visualizado na figura 15, disponíveis em Souza (2011). A equação para a linha de sucção do Perfil GÖ 480 para o intervalo de $0,3 \cdot L \leq x \leq 1,0 \cdot L$ não consta na referência supracitada. Em seu lugar encontra-se repetido o gráfico e a equação da seção anterior, conforme figura 10.

Figura 10 - Repetição de equações.**Fonte: autores.**

Como forma de solucionar o problema, foi gerada uma nova equação substituta que descrevesse com a maior fidelidade possível a curva da equação original a partir dos valores de x e ys da seção $0,3.L \leq x \leq 1,0.L$ do perfil GÖ 480, conforme figura 11.

Figura 11 - Curva e equação gerado pelo perfil GÖ 480 com recurso do Excel.

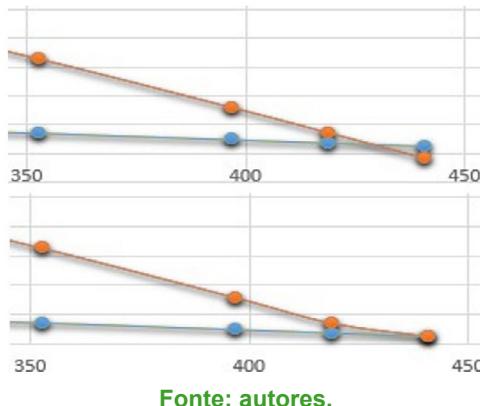
| x | 30 | 38,75 | 40,00 | 50,00 | 60,00 | 70,00 | 80,00 | 90,00 | 95,00 | 100,00 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| ys | 12,85 | 12,65 | 12,60 | 11,60 | 10,00 | 7,85 | 5,45 | 2,85 | 1,45 | 0,00 |

**Fonte: autores.**

Para que os perfis das pás do rotor se apresentassem completamente fechados, os pontos iniciais ($x=0$) e finais ($x=100$) das linhas de pressão e sucção geradas pelas tabelas correspondentes evidenciadas deveriam ser obrigatoriamente iguais. A equação gerada apresentou resultado, no entanto, com pequena variação. Para resolver o problema, o primeiro e último ponto da linha de sucção foram condicionados no programa a permanecerem com o mesmo valor dos pontos correspondentes da curva de pressão, quando os mesmos apresentassem

valores com pequenas variações. Tal condicionamento não representou diferença significativa no resultado final do perfil, conforme figura 12, e garantiu que o mesmo fosse completamente fechado, possibilitando fácil importação de suas coordenadas para o programa SolidWorks e sua modelagem em 3D.

Figura 12 - Condicionamento dos pontos finais para fechamento do perfil.

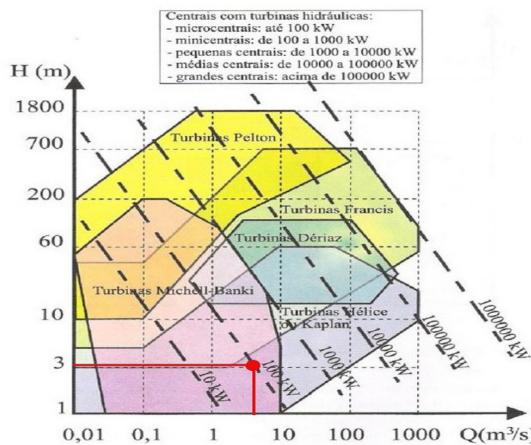


Fonte: autores.

Criação do modelo 3D da turbina hidráulica e demais discussões

Os dados de queda e vazão, 3.147 m e 6,472 m³.s⁻¹ respectivamente, coletados no local teórico de instalação da MCH puderam ser confrontados com o gráfico de seleção de turbina, conforme figura 13, proposto por Henn (2006), encaixando-se no campo de atuação de uma turbina Hélice ou Kaplan. Portanto, o algoritmo que tem a finalidade de dimensionar um rotor para turbina axial se tornou válido para o estudo.

Figura 13 - Campo de aplicação das turbinas Hidráulicas.



Fonte: Henn (2006).

Aplicando os dados de entrada coletados *in loco* no algoritmo, conforme figura 14, foi possível obter todos os dados necessários para modelagem 3D e construção do rotor, sendo que suas principais características podem ser visualizadas na figura 15.

Figura 14 - Dados de entrada aplicados ao algoritmo.

| DADOS DE ENTRADA DO ALGORITMO | | |
|--|---|-------------|
| Dados do local da instalação | | |
| Vazão Turbinada [m ³ /s] | 6,472 | |
| Altura de Queda Disponível [m] | 3,15 | |
| Altura de sucção máxima [m] | 0,628 | |
| Altura do canal de fuga em relação ao nível do mar [m] | 250 | |
| Dados de projeto | | |
| Rendimento interno [%] | 88 | |
| Rendimento do distribuidor [%] | 98 | |
| Tensão de torção admissível no eixo [kgf/cm ²] | 300 | |
| Tensão de flexão admissível na pá [[kgf/cm ²]] | 450 | |
| Selecione o tipo de distribuidor | | |
| HF | Hélice com distribuidor fixo | HM OU KF |
| HM OU KF | Hélice com distribuidor móvel ou Kaplan com distribuidor fixo | |
| KM | Kaplan com distribuidor móvel | |

Fonte: autores.

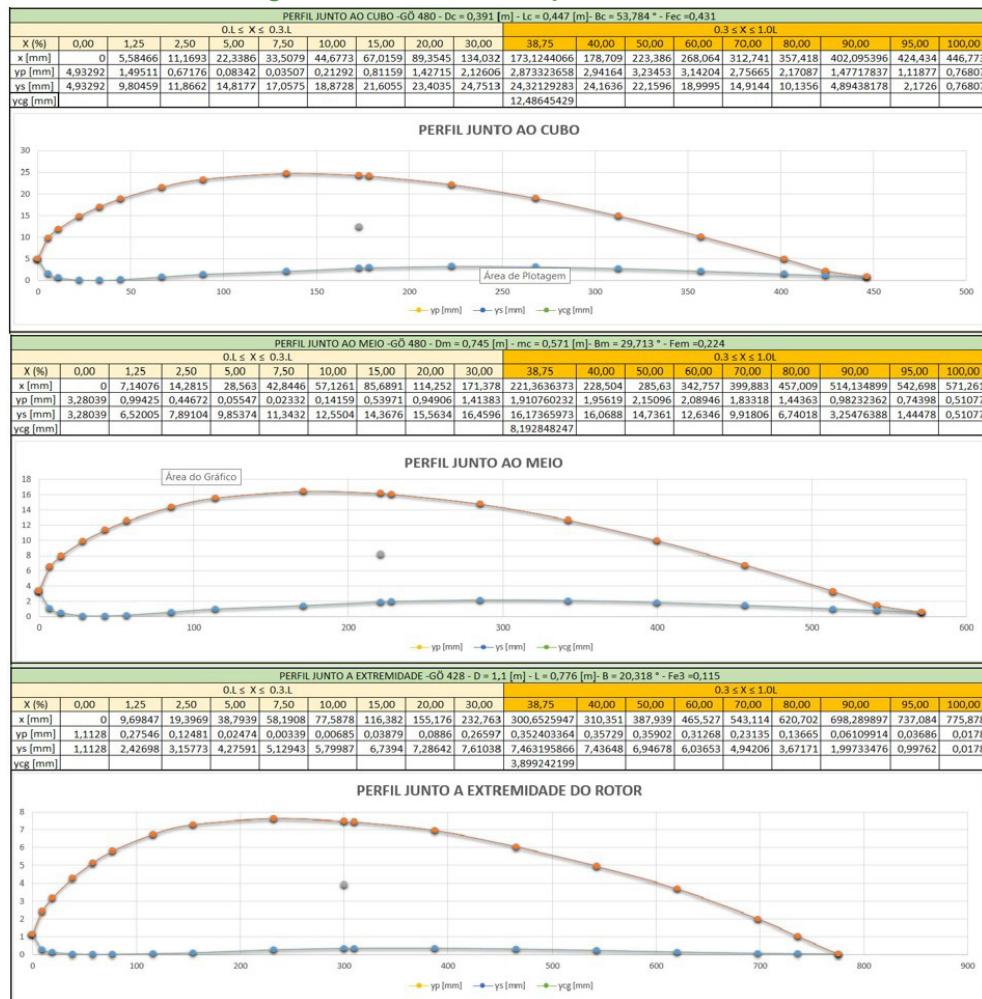
Figura 15 – Resultados das amostras de tempo obtidas no percurso de 20 metros.

| | |
|---|----------------|
| Diâmetro externo da pá para THA [mm] | 1100,00 |
| Diâmetro do cubo [mm] | 390,897 |
| Diâmetro do eixo [mm] | 92,1357 |
| Número de pás do rotor | 4 |
| Potência no eixo [kW] | 170,419 |
| Potência no eixo [cv] | 231,705 |

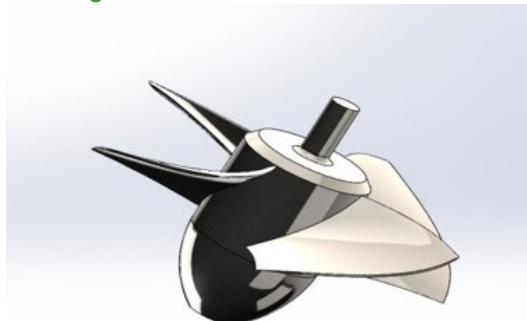
Fonte: autores.

Nota-se que a potência teórica fornecida pelo rotor, 170,419 kW, extrapola os 100kW da faixa de operação de turbinas hélice, indicado no gráfico da figura 26, o que é aceitável, visto não terem sido consideradas nesse trabalho as perdas energéticas de carcaça, mancais e gerador, que são meios de dissipação da potência do rotor envolvidos na transformação da energia mecânica em elétrica.

Os perfis gerados pelo algoritmo para as seções cilíndricas junto ao cubo, ao meio e à extremidade do rotor tomaram dimensões (conforme figura 16) que o tornam executável em uma implantação de MCH para o trecho estudado do Rio Jacaré.

Figura 16 – Perfis do rotor para o rio Jacaré.**Fonte: autores.**

Com os dados fornecidos pelo algoritmo do rotor executado no Excel foi possível, então, a criação do modelo 3D no software SolidWorks, conforme figura 17.

Figura 17 – Rotor modelado em 3D.

Fonte: autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aplicando-se os dados de entrada coletados no local teórico da instalação da turbina hidráulica com vazão de 6,472 m³.s⁻¹ e altura da queda de água de 3,15 m no algoritmo, foi possível obter as dimensões de um rotor hélice com diâmetro de 1100 mm, 4 pás, e perfis devidamente definidos, capaz de fornecer uma potência teórica de 170 kW pelo eixo à um possível gerador elétrico. Dessa forma, o objetivo pretendido nesse trabalho foi alcançado, confirmando a possibilidade de que o público interessado consiga utilizar o algoritmo desenvolvido no software Microsoft Office Excel de forma simplificada para verificar a possibilidade da implantação de uma central geradora em sua propriedade.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil.** 1 ed. Brasília, Brasil, 2002. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil.** 2 ed. Brasília, Brasil, 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao(3).pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil.** 3 ed. Brasília, Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- HENN, É. A. L. **Máquinas de Fluido.** 2. ed. Santa Maria: Editora Ufsm, 2006.
- MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

OST, A. P.; KRAULICH, C. V. **Dimensionamento e modelagem de um rotor de turbina pelton para ser aplicado em uma bancada didática.** 2013. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2013. Disponível em:http://www.fahor.com.br/images/Documentos/Biblioteca/TFCs/Eng_Mecanica/2013/Mec_AnA_Claudia.pdf. Acesso em: 24 jun. 2019.

SOUZA, Zulcy de. **Projeto de Máquinas de Fluxo: Tomo IV, Turbinas Hidráulicas com Rotores Axiais.** Rio de Janeiro: Editora Interciênciac; Minas Gerais: Editora Acta, 2011.