

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

TIAGO DE LIMA

**MODELAGEM VIRTUAL DE UM ROTOR DE TURBINA TIPO
FRANCIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2018

TIAGO DE LIMA

**MODELAGEM VIRTUAL DE UM ROTOR DE TURBINA TIPO
FRANCIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel, em
Engenharia Mecânica, da
Coordenação Do Curso De
Engenharia Mecânica, da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Henrique Ajuz
Holzmann.

GUARAPUAVA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

MODELAGEM VIRTUAL DE UM ROTOR DE TURBINA TIPO FRANCIS

POR

TIAGO DE LIMA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 24 de setembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Henrique Ajuz Holzmann
Prof.(a) Orientador(a)

Ricardo Vinicius Bibna Biscaia
Membro titular

Aldo Przybysz
Membro titular

Aldo Przybysz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo mostrar a viabilidade e as vantagens da implementação de PCH's através das vantagens que o Brasil tem com seu enorme número de rios que suportam esse tipo de empreendimento, e a necessidade de novas formas de gerar energia diante do atual cenário energético brasileiro. Com o objetivo de projetar e simular um rotor para Turbinas Francis que operam em PCH's, elaborou-se dois códigos em linguagem Python para realizar os cálculos das dimensões do rotor, para isso foi utilizado dados da Usina do Buricá I, do interior do Rio Grande do Sul. Com esses dados, projetou-se a geometria em um *software* CAD e realizou-se a simulação no *software* Solidworks, para analisar a pressão e a velocidade do fluido em contato com o rotor da Turbina Francis.

A simulação mostrou que a velocidade do fluido em contato com o rotor é de 6,2 m/s com uma pressão de 109,5 kPa. Como parâmetro para avaliar os resultados foi realizado uma comparação entre dados obtidos em uma simulação para uma Turbina Francis que possui os mesmos dados de entrada da turbina desenvolvida nesse trabalho, porém que partiu de decisões e *software* diferente. Essa comparação mostrou que o projeto desenvolvido neste trabalho possui um desempenho inferior mesmo sendo o modelo mais utilizado na indústria.

Palavras chaves: Dimensionamento, Simulação, Solidworks, CAD, Python, Pressão, Rotor, Turbina Francis. PCH..

ABSTRACT

That study have the objective show up the the feasibility and advantages of implementing Small Hydropower Plants through the advantages that Brazil has with its great number of rivers that support this type of enterprise, and need of news ways to generate energy in the current Brazilian energy scenario. With the objective design and simulate a Francis Turbines rotor which is used in Small Hydropower Plants, was made two codes in Python language to make the rotor dimensions calculations, for that was used data from Usina do Buricá I, in Rio Grande do Sul. With that datas, the geometry was designed in CAD software and was made the simulation in software Solidworks, to analyze the pressure and velocity of the fluid in contact with the rotor of the Francis Turbine.

The simulation showed that the velocity of the fluid in contact with the rotor is 6,2m/s with a pressure of 109,5 kPa. As a parameter to evaluate the results, was made a comparison between data obtained in a simulation for a Francis Turbine that has the same input data of the turbine developed in this study, but started from different decisions and different software. This comparison showed that the project developed in this study has inferior performance even though it is the most used model in the industry.

Palavras chaves: Software, Silulation, Solidworks, CAD, Python, Pressure, Rotor, Francis Turbine. Small Hydropower Plants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Turbinas Pelton (A), Francis (B) e Kaplan (C)	11
Figura 2 - Projeto de Usina hidrelétrica.	13
Figura 3 - Classificação das Turbinas Hidráulica.	15
Figura 4 – a) Turbinas Pelton, b) Rotor de Turbina Pelton.....	15
Figura 5 - Turbina Kaplan Vertical	16
Figura 6 - Turbina Francis.....	17
Figura 7 - Processo de simulação computacional.....	22
Figura 8 - Método de volumes finitos	23
Figura 9 - Dados de entrada para os cálculos	25
Figura 10 - Etapas da elaboração do projeto de simulação	25
Figura 11 - Processo de uma simulação CFD.....	26
Figura 12 - a) Projeção da Cinta Externa no eixo xy, b) Projeção da Coroa Interna no eixo xy	27
Figura 13 - Projeção da Pá no plano xy.....	27
Figura 14 - Projeção no plano xy com as arestas de entrada e saída da pá.	28
Figura 15 - Arestas de Pressão.....	28
Figura 16 - Projeção 3D das Arestas da Pá.....	31
Figura 17 - Perfil das arestas da pá.	31
Figura 18 – a) Modelagem da Pá, b) Rotor da Turbina Francis Montado.....	32
Figura 19 - Vista 3D da Turbina Francis.....	32
Figura 20 - Opções para Simulação no Software Solidworks	33
Figura 21 - Em Destaque os Lids Definindo as Regiões de Entrada e Saída.....	33
Figura 22 - Seleção das Unidades e do Fluido.....	33
Figura 23 - Definição da Malha	34
Figura 24 - Modelagem da Pá Desenvolvida por Cesár dos Santos.	34
Figura 25 - Turbina Francis Desenvolvida por Cesár dos Santos.....	35
Figura 26 - Turbina Utiliza na Usina de Buricá.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Empreendimentos em Operação no Brasil	10
Tabela 2 - Seleção de Turbina Francis	18
Tabela 3 - Resultados.....	27
Tabela 4 - Dados da Aresta de entrada da pá.....	28
Tabela 5 - Dados da Aresta de saída da pá.	29
Tabela 6 - Resultados para a Aresta de entrada da Pá	29
Tabela 7 - Resultados para a Aresta de entrada da Pá	29
Tabela 8 - Resultados para a Aresta de saída da Pá.....	30
Tabela 9 - Resultados para a Aresta de saída da Pá.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
EOL	Central Geradora Eólica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear

LISTA DE ACRÔNIMOS

CAD	Computer Aided Engineering
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo Geral.....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
1.3 Justificativa	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Usinas Hidrelétricas	13
2.2 Turbinas Hidráulicas	14
2.2.1 Turbina Pelton	15
2.2.2 Turbina Kaplan.....	16
2.2.3 Turbinas Francis	16
2.3 Projeto de Rotor das Turbinas Francis.....	17
2.3.1 Diâmetro Externo da Aresta de Saída e Largura do Distribuidor	19
2.3.2 Coroa Interna.....	19
2.3.3 Cinta Externa	20
2.3.4 Aresta de Entrada.....	20
2.3.5 Aresta de Saída	21
2.3.6 Interseção da Superfície Média da Pá Com a Cinta Externa e a Coroa	21
Interna.....	21
2.4 Modelagem Computacional	22
3. METODOLOGIA	24
3.2 Levantamento de Dados	24
4. RESULTADOS	27
4.1 Desenvolvimento da Geometria	27
4.2 Simulação.....	32
5. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	38
APÊNDICE A - Primeiro Código Python	40
Apendice B - Segundo Código Python.....	47

1. INTRODUÇÃO

No território brasileiro existe uma elevada quantidade de recursos hídricos, contribuindo para que a energia gerada pelas centrais hidrelétricas constitua a maior parte da energia elétrica gerada na matriz energética brasileira. O Atlas de Energia Elétrica do Brasil, divulgado pela ANEEL (2008) estipulou que o Brasil possui um potencial hidráulico para gerar algo em torno de 260GW.

A Tabela 1 mostra que a matriz energética brasileira é constituída por um total de 4.681 empreendimentos que totalizam 151.596.237KW de potência instalada, das quais segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 1262 dos empreendimentos em operação utilizam energia hidráulica na geração de energia elétrica, o qual resulta em 61% do potencial elétrico brasileiro.

Tabela 1 - Empreendimentos em Operação no Brasil

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (KW)	Potência Fiscalizada (KW)	%
CGH	607	522.839	523.510	0,35
EOL	424	10.393.738	10.393.742	6,86
PCH	436	4.963.487	4.952.203	3,27
UFV	44	27.761	23.761	0,02
UHE	219	101.138.278	92.605.229	61,09
UTE	2.949	42.833.841	41.107.792	27,12
UTN	2	1.990.00	1.990.00	1,31
Total	4.681	161.869.944	151.596.237	100

Fonte: ANEEL (2008).

A ANEEL através da Resolução Normativa N° 673, de 4 de agosto de 2015 define as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) como aqueles empreendimentos destinados a produção independente de energia elétrica, cuja potência esteja entre 3.000 KW e 30.000 KW. A ANEEL (2008) estima que após a publicação da Resolução Normativa N° 673, 176 novas PCH's devem agregar 2.064,72 MW ao sistema energético brasileiro à um custo de R\$16,5 bilhões.

Conforme denominação da ANEEL (2002) as hidrelétricas são sistemas que realizam o aproveitamento da energia das águas dos rios, convertendo-as em energia elétrica. Esta transformação ocorre em 3 etapas, sendo a primeira através da conversão da energia potencial da água do reservatório em energia cinética, em seguida esta energia da movimentação do fluido se transforma em energia mecânica ao girar as pás da turbina, a qual está acoplada em um gerador e pôr fim a conversão

em energia elétrica. A Figura 1 apresenta os três principais tipos de turbinas utilizadas no Brasil, sendo as mesmas (ANEEL, 2008):

- Turbinas Pelton: altas quedas e baixas vazões;
- Turbinas Kaplan: baixas quedas com grandes volumes de água;
- Turbinas Francis: alturas de quedas médias.

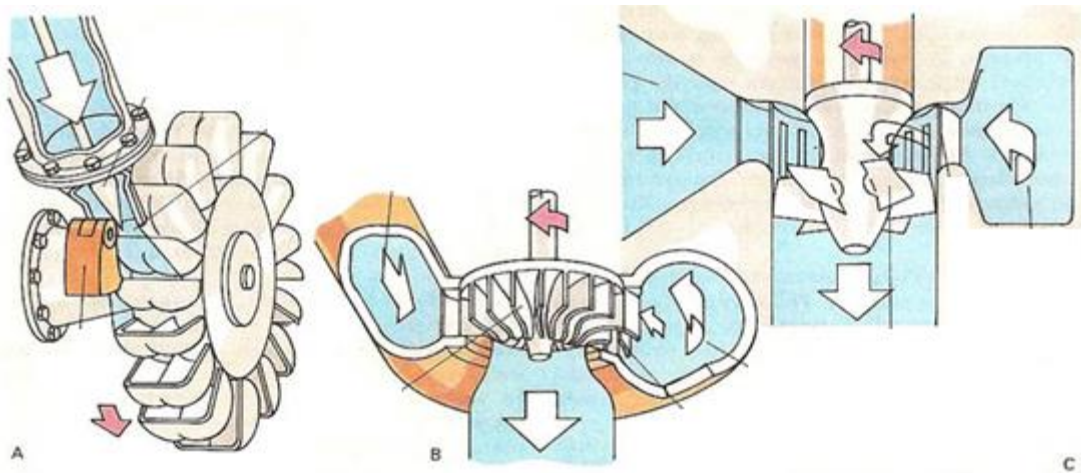


Figura 1- Turbinas Pelton (A), Francis (B) e Kaplan (C)
Fonte: River Engineering & Restoration at OSU (2006).

Visto a grande variedade de tipos de turbinas, saber selecionar e projetar seus componentes de forma otimizada e eficiente se torna um diferencial para a competitividade e viabilidade de uma PCH. Uma alternativa economicamente atraente no desenvolvimento de seus equipamentos, é a utilização de *Softwares* que simulem o processo realizado pelo equipamento, sendo possível prever o seu comportamento, e realizar modificações de projeto antes de sua produção.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho busca modelar virtualmente o comportamento de uma Turbina do tipo Francis, construída a partir de um roteiro de cálculos em *Software* aberto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaboração de um roteiro de cálculo através da linguagem *Python* para determinar as dimensões do rotor de turbina do tipo Francis.
- Modelar geometricamente um rotor de turbina do tipo Francis, com auxílio do *Software* de CAD.
- Simular o rotor modelado em *Software* Solidworks;

- Realizar uma análise da velocidade e da pressão do fluido no rotor.

1.3 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui um dos maiores potenciais para geração de energia elétrica através das hidrelétricas, por isso as usinas hidrelétricas são responsáveis por uma grande parte da energia elétrica consumida no país. Porém devido ao auto custo e aos impactos ambientais gerados pela construção de uma usina hidrelétrica, a demanda pela eletricidade cresceu a um ritmo maior do que o crescimento da oferta, gerando com isso os eventos conhecidos como “apagões” e bandeiras tarifárias nas contas de luz, sendo essas tarifas acionadas principalmente em tempos de seca, quando as hidrelétricas não suportam fornecer a energia consumida, sendo necessário completar a energia da malha energética brasileira com energia proveniente das termoeletricas, as quais possuem um custo de produção maior, que é repassado ao consumidor final em forma das bandeiras tarifárias.

Uma alternativa viável para o problema energético brasileiro, é o investimento em pequenas centrais hidrelétricas (PCH), as quais possuem um baixo impacto ambiental e um custo muito menor quando comparado as grandes hidrelétricas. Esse estudo se focara em desenvolver um rotor para Turbinas Francis, os quais são um dos principais custos para se construir uma PCH, e também desenvolver um estudo através de métodos numéricos para se simular o funcionamento da turbina com esse rotor.

Para tentar amenizar custo, busca-se otimizar o projeto de seus componentes, atentando para sua vida útil, bem como para otimização do rendimento energético. Uma das ferramentas utilizadas nas fases de projeto são os métodos numéricos para simulação do funcionamento dos componentes integrantes em condições de operações. Com isso é possível prever as possíveis falhas e as suas eventuais soluções, eliminando muitas vezes a necessidade de se criar protótipos de teste, reduzindo os custos e o tempo de processo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USINAS HIDRELÉTRICAS

No decorrer do tempo o consumo de energia elétrica apresentou um elevado aumento, com isto a utilização de fontes renováveis para a produção de energia é de extrema importância. Devido a essa necessidade e com a realidade geográfica e fluvial brasileira o uso de hidroelétricas é extremamente viável, fazendo com que o país seja um dos líderes mundiais na produção de energia oriunda das usinas hidrelétricas. A energia produzida pelas hidrelétricas é gerada através da transformação da energia potencial da água em energia elétrica, esse processo ocorre com as águas de um rio e/ou reservatório passando por uma tubulação com uma energia cinética e assim realizando o movimento das turbinas, um gerador conectado as turbinas transformam essa energia mecânica em energia elétrica (ANEEL 2008).

Para que o processo de transformação seja eficiente, as barragens devem possuir uma certa altura, necessária para que a água adquira velocidade para girar as pás da turbina, esse processo transforma a energia potencial gravitacional em energia cinética, como mostra a Figura 2. Por fim o gerador converte o movimento rotatório da turbina em energia elétrica através do princípio de indução eletromagnética.

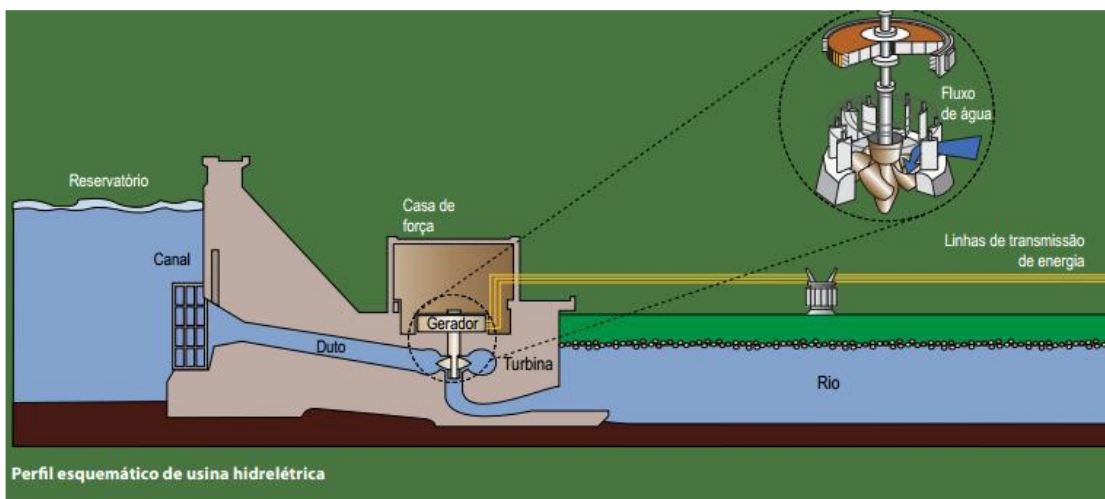


Figura 2 - Projeto de Usina hidrelétrica.
Fonte: ANEEL (2008).

O sistema de uma hidroelétrica é constituído de diversos elementos, sendo os principais:

- Reservatório: onde a água fica represada;

- Barragem: barreira construída para manter a água no reservatório;
- Vertedouro: permite o controle sobre o nível de água no reservatório;
- Tomada d'água: permite a conduzir a água do reservatório até a adução nas turbinas;
- Conduto forçado: região que leva a água sobre pressão até as turbinas, pode ser subterrâneo ou externo;
- Casa de força: região onde se encontra o grupo gerador/turbina e demais equipamentos auxiliares;
- Turbina: a água ao atingir a turbina a faz girar ocorrendo assim, a transformação da energia hidráulica em mecânica.
- Gerador: equipamento responsável pela transformação da energia mecânica contida no movimento das turbinas em energia elétrica;
- Canal de fuga: canal por onde a água sai após passar pelas turbinas;
- Subestação: responsável pela transformação da energia elétrica em alta tensão através de um transformador.

Apesar da utilização de uma fonte não poluente e de custo zero, como a água, as usinas hidrelétricas de grande porte causam um grande impacto ambiental e social nas regiões próximas a sua construção. A necessidade de um grande reservatório, faz com que uma região seja alagada, resultado em um deslocamento da população de suas residências, e uma perda da fauna e flora nativa. Por outro lado, uma pequena central geradora, por seu tamanho pode causar um impacto muito menor, o que transformar as PCH's uma opção ambientalmente mais favorável (NETO, 2010).

2.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas são projetadas para converter a energia potencial da água represada em energia cinética, que posteriormente é transformada em energia elétrica pelo gerador. As turbinas hidráulicas podem ser classificadas de duas maneiras, sendo a primeira quanto à variação da pressão estática, podendo ser de ação e de reação. Já a segunda forma de se classificar é segundo a direção do fluxo através do rotor, sendo as classificações: radial (Francis lenta), axial (Bulbo), tangencial (Pelton) e diagonal (Francis rápida), a Figura 3 mostra a esquemática de classificação.

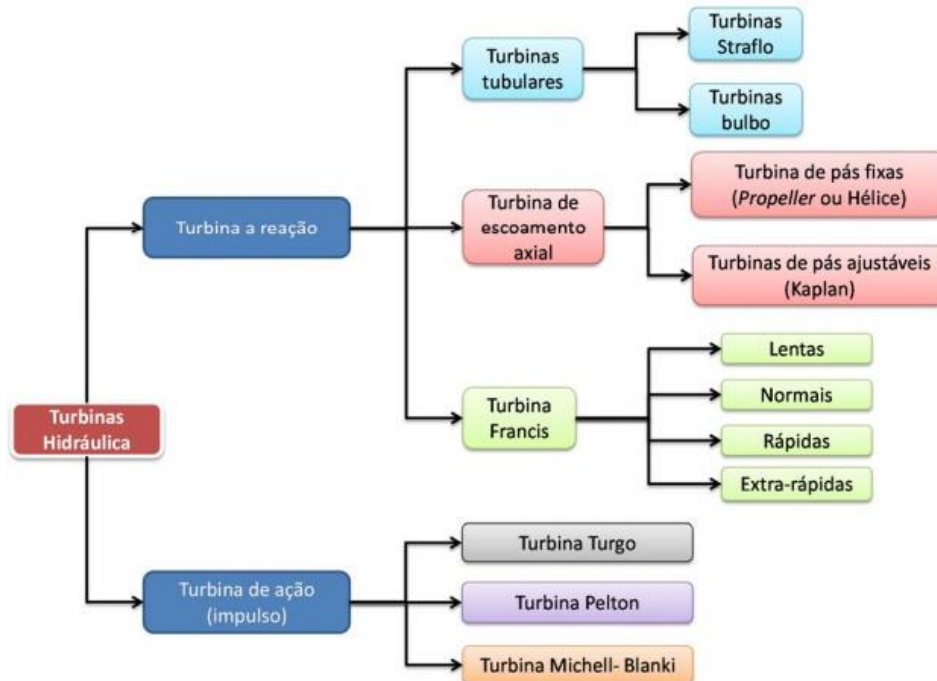


Figura 3 - Classificação das Turbinas Hidráulica.
Fonte: Macintyre (1983).

2.2.1 Turbina Pelton

As Turbinas Pelton, conforme Figura 4a, foram idealizadas em 1880 pelo americano Lester Allan Pelton, do qual recebeu seu nome, são projetadas para altas quedas e baixas vazões (ANEEL, 2008).

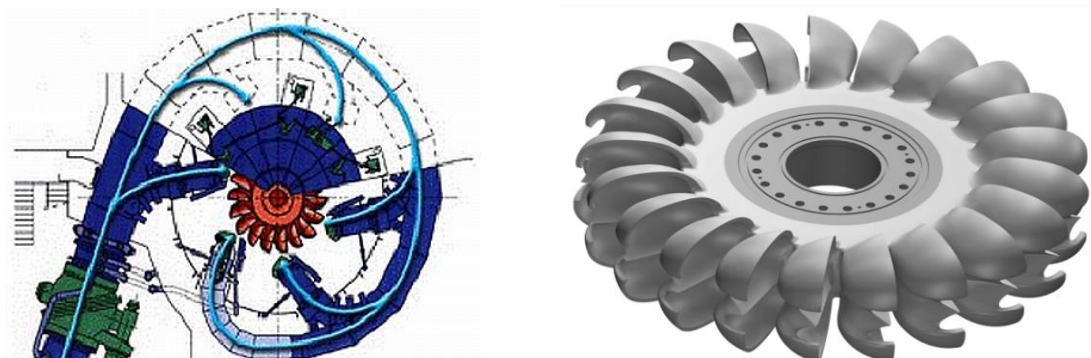


Figura 4 – a) Turbinas Pelton, b) Rotor de Turbina Pelton.
Fonte: Leão (2009) e Voith (2015).

Uma das desvantagens das Turbinas Pelton é a erosão provocada pelo efeito abrasivo, ocasionado devido a altas velocidades da água ao se chocar com o rotor (ALTERIMA, 2012). Os componentes que constituem uma Turbina Pelton são: o rotor

mostrado na Figura 4b, o injetor, o funcionamento do injetor e o servomotor do injetor. (SIMONE, 2000).

2.2.2 Turbina Kaplan

As Turbinas Kaplan foram desenvolvidas por volta de 1912 e recebem esse nome do seu criador austríaco Viktor Kaplan, elas são utilizadas quando são necessárias turbinas para baixas quedas com grandes volumes de água (ANEEL 2006). As Turbinas Kaplan podem ser verticais ou horizontais, a Figura 5 representa uma Turbina Kaplan Vertical.

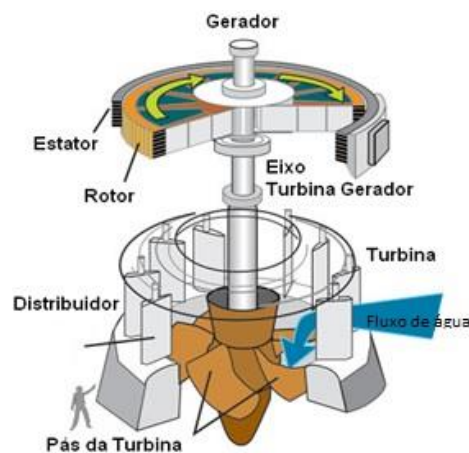


Figura 5 - Turbina Kaplan Vertical
Fonte: Leão (2009).

As Turbinas Kaplan são formadas pelos componentes: o distribuidor, pás que são chamadas de diretrizes, rotor, tubo de sucção e caixa espiral. (MACINTYRE 1983). Os Rotores de Turbinas Kaplan possuem aletas que se vinculam ao cubo hidrodinâmico, além de se abrirem radialmente como se fossem hélices de um avião (SIMONE, 2000).

2.2.3 Turbinas Francis

As Turbinas Francis foram desenvolvidas pelo engenheiro inglês James Bicheno Francis e são projetadas para alturas de quedas médias, geralmente entre 10 m a 200 m (ANEEL, 2008).

São turbinas desenvolvidas com rotor duplo para os eixos verticais e rotores simples para eixo vertical ou horizontal. É o modelo de turbina que permite ser instalado na maioria das aplicações relacionadas à queda/vazão. (Leão, 2009).

Os rotores das Turbinas Francis são definidos como elemento rotativo que estão fixados ao eixo e, constituído por um número de pás de curvatura adequada, fixada a cubo e a cinta. (NBR 6445, 1987). A Figura 6 apresenta um modelo de turbina Francis.

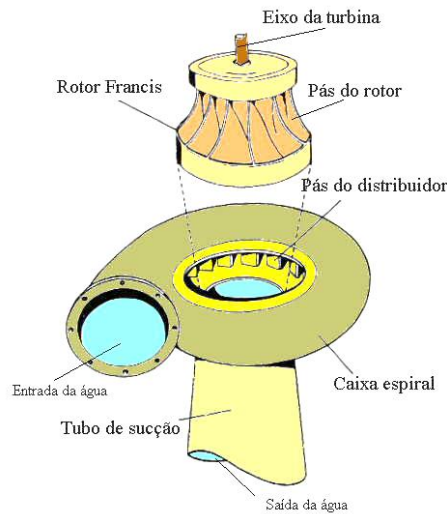


Figura 6 - Turbina Francis
Fonte: Leão (2009).

As Turbinas Francis sofrem um elevado desgaste por erosão quando se utilizada em usinas implantadas em rios com altos teor de sólidos, isso ocorre devido ao grande contato com as águas que correm por seus canais. Esses modelos de turbina são centrípetos com tubos de sucção utilizado com o objetivo de conduzir a água da saída do rotor.

2.3 PROJETO DE ROTOR DAS TURBINAS FRANCIS

Souza (2011) descreve as seguintes etapas para o desenvolvimento de um Projeto de Turbina Francis:

- Dimensionamento preliminar: estabelece os limites físicos do escoamento;
- Dimensionamento básico: elaboração dos esboços em corte e escala das Turbinas Francis;
- Projeto e fabricação do protótipo: apresentação dos elementos que permitem elaborar o projeto e realizar a fabricação do modelo de turbina Francis;
- Testes e projeto para fabricação;
- Fabricação: realização física das etapas anteriores.

Para o dimensionamento do rotor para uma Turbina Francis, é necessário conhecimento prévio sobre as condições de operação da turbina, como a altura de queda da água e sua vazão ao chegar na turbina. Com esses dados de entrada, é possível determinar as dimensões dos componentes de uma Turbina Francis através das equações a seguir (Souza, 2011).

O primeiro passo para a realização dos cálculos é determinar o tipo da Turbina Francis, esse processo é realizado através da velocidade de rotação específica, n_{qA} , a qual segue o seguinte padrão mostrado na Tabela 2. (Souza, 2011).

Os cálculos para a obtenção das dimensões da Turbina Francis foram baseados nas formulas apresentadas por Souza (2011), no livro Projeto de Máquinas de Fluxo.

Tabela 2 - Seleção de Turbina Francis	
n_{qA}	Tipo de Turbina
60 a 119	Turbina Francis Lenta
120 a 219	Turbina Francis Normal
220 a 350	Turbina Francis Rápida

Fonte: Autoria Própria (2018).

A velocidade de rotação específica é dada por:

$$n_{qA} = 10^3 * \frac{n}{60} * \frac{Q^{0.5}}{Y^{0.75}} \quad (1)$$

Onde:

n_{qA} = adimensional;

n = rotação do rotor (rpm);

Q = vazão de projeto (m^3/s);

Y = salto energético específico (J/kg).

$$Y = G * H \quad (2)$$

Onde:

g = gravidade ($9.81m/s^2$);

H = altura da barragem (m).

2.3.1 Diâmetro Externo da Aresta de Saída e Largura do Distribuidor

Para o cálculo dos diâmetros do rotor é necessária calcular uma nova velocidade de rotação específica que seja medido em rpm.

$$n_{qAr1} = 3 * n * \left(\frac{Q_r^{0.5}}{H^{0.75}}\right) \quad (3)$$

Onde:

Q_r = vazão regular (m³/s).

$$Q_r = 0.731 * (1 + 0.01 * (n_{qAr1}^{0.5})) * Q_{r1} \quad (4)$$

Onde:

Q_{r1} = vazão considerando rendimento volumétrico (m²/s).

$$Q_{r1} = nv * Q \quad (5)$$

Onde:

nv = rendimento volumétrico.

O diâmetro externo da aresta de saída e a largura do distribuidor são dados pelas relações:

$$D_{5e} = 24,786 * \frac{H^{0,5}}{n} + 0,685 * \frac{Q_r^{0,5}}{H^{0,25}} \quad (6)$$

$$b_o = (0,168 * 10^{-2} * n_{qAr} - 0,018 * 10^{-4} * n_{qAr}^2) * D_{5e} \quad (7)$$

2.3.2 Coroa Interna

O diâmetro externo da coroa interna são dados conforme a rotação específica.

Para $60 \leq n_{qAr} \leq 100$ tem se:

$$D_{3I} = (2,32 - 0975 * 10^{-2} * n_{qAr}) * D_{5e} \quad (8)$$

Para $100 \leq n_{qA_r} \leq 350$ tem se:

$$D_{3i} = \left(0,7 + \frac{0,16}{2,11 * 10^{-3} * n_{qA_r} + 0,08} \right) * D_{5e} \quad (9)$$

2.3.3 Cinta Externa

O diâmetro externo da cinta externa é dado conforme a rotação específica.

Para $60 \leq n_{qA_r} \leq 100$ tem se:

$$D_{3e} = (2,32 * -0,975 * 10^{-2} * n_{qA_r}) * D_{5e} \quad (10)$$

Para $100 \leq n_{qA_r} \leq 350$ tem se:

$$D_{3e} = (1,255 - 0,633 * 10^{-2} * n_{qA_r}) * D_{5e} \quad (11)$$

2.3.4 Aresta de Entrada

O diâmetro interno da aresta de entrada é dado por:

Para $60 \leq n_{qA_r} \leq 100$ tem se:

$$D_{4i} = (2,32 - 0,975 * 10^{-2} * n_{qA_r}) * D_{5e} \quad (12)$$

Para $100 \leq n_{qA_r} \leq 350$ tem se:

$$D_{4i} = (0,5 + 84,5 * n_{qA_r}^{-1}) * D_{5e} \quad (13)$$

O diâmetro externo da aresta de entrada é dado por:

Para $60 \leq n_{qA_r} \leq 100$ tem se:

$$D_{4e} = (2,32 - 0,975 * 10^{-2} * n_{qA_r}) * D_{5e} \quad (14)$$

Para $100 \leq n_{qA_r} \leq 250$ tem se:

$$D_{4e} = (0,165 * 10^{-4} * n_{qA_r}^2 - 0,835 * 10^{-2} * n_{qA_r} + 2,017) * D_{5e} \quad (15)$$

Para $250 \leq n_{qA_r} \leq 350$ tem se:

$$D_{4e} = (1,025 - 0,03 * 10^{-2} n_{qAr}) * D_{5e} \quad (16)$$

2.3.5 Aresta de Saída

O diâmetro interno da aresta de saída é dado por:

$$D_{5i} = (0,86 - 2,18 * 10^{-3} n_{qAr}) * D_{5e} \quad (17)$$

2.3.6 Interseção da Superfície Média da Pá com a Cinta Externa e a Coroa Interna

Coroa interna:

Para $50 \leq n_{qAr} \leq 210$ tem se:

$$L_{4i} = (3,785 * 10^{-6} * n_{qAr}^2 - 1,673 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,436) D_{4e} \quad (18)$$

Para $210 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$L_{4i} = (2,353 * 10^{-6} * n_{qAr}^2 - 8,667 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,328) * D_{4e} \quad (19)$$

Cinta externa:

Para $50 \leq n_{qAr} \leq 210$ tem se:

$$L_{4e} = (3,713 * 10^{-6} * n_{qAr}^2 - 1,907 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,328) * D_{4e} \quad (20)$$

Para $210 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$L_{4e} = (2,222 * 10^{-4} * n_{qAr} + 0,0833) * D_{4e} \quad (21)$$

2.3.7 Equação da curva da Cinta Externa e da Coroa Interna

$$Yi = 1,54 * D3i * \sqrt{\frac{X}{Li} * (1 - \frac{X}{Li})^3} \quad (22)$$

$$Ye = 3,08 * \left(\frac{0,162 * (D3e - D5e)}{\sqrt{\frac{L5e}{Le} * (1 - \frac{L5e}{Le})^3}} \right) * \sqrt{\frac{X}{Le} * (1 - \frac{X}{Le})^3} \quad (23)$$

Onde:

Y_i = equação da curva da Coroa Interna e, Y_e a curva para a Cinta Externa.

2.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional consiste na utilização de conjuntos de métodos e formulações para a resolução de problemas complexos, o qual envolve um grande número de variáveis, com destaque para o desenvolvimento dos métodos numéricos e de modelos matemáticos (SOUZA, 2011).

Para se desenvolver um projeto de simulação computacional é necessário um conhecimento das condições iniciais e de contorno, a Figura 7, detalha o desenvolvimento de projetos de simulação.

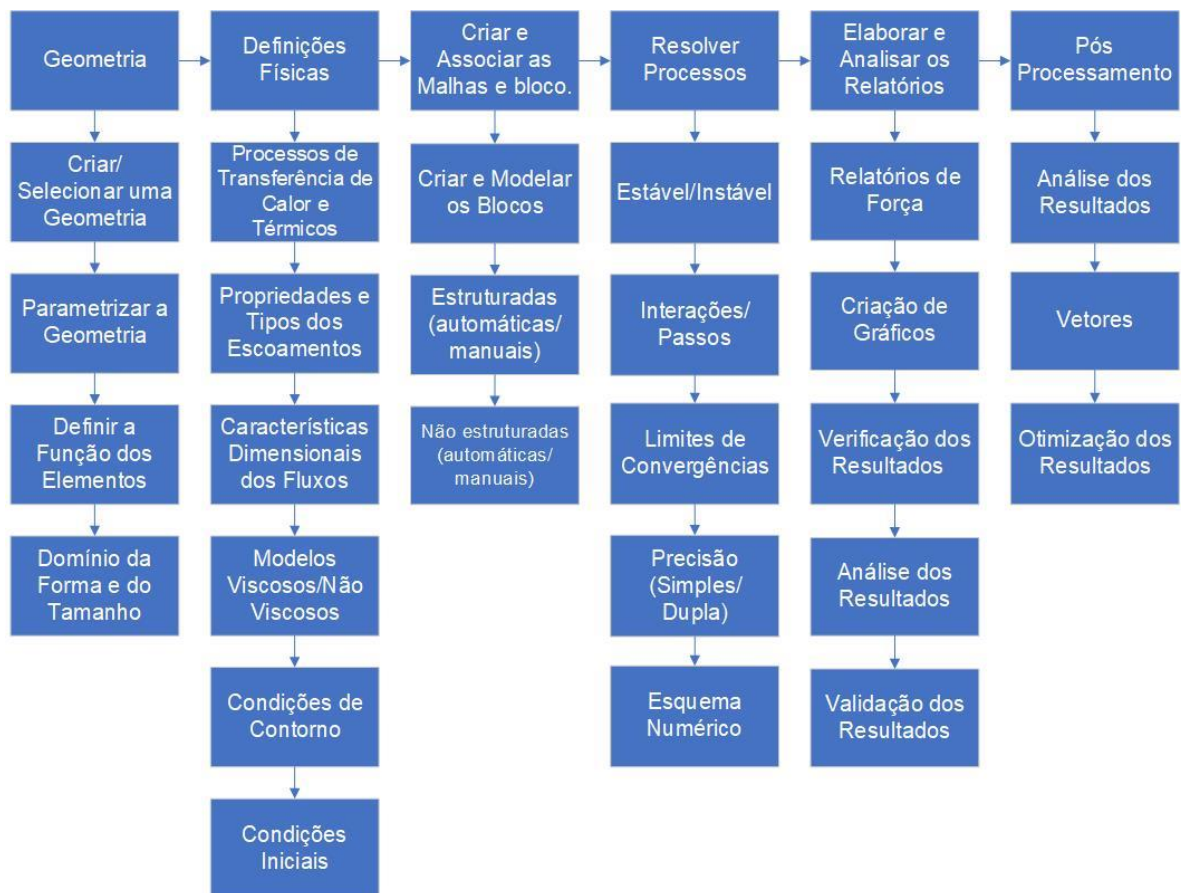


Figura 7 - Processo de simulação computacional
 Fonte: Souza (2011).

O Método de Volumes Finitos é um método numérico que consiste na transformação de uma equação diferencial que é definido em um domínio D em um

sistema de equações, como mostra a Figura 8. O Método de Volumes Finitos envolve as seguintes etapas em seu processamento:

- Decompor o domínio D em um volume de controle;
- Para cada volume de controle será formulada suas equações integrais de conservação (massa, momento e energia);
- As integrais são numericamente aproximadas;
- Aproximar os valores das variáveis nas faces e as derivadas com as informações das variáveis nodais;
- Montar e solucionar o sistema algébrico criado.

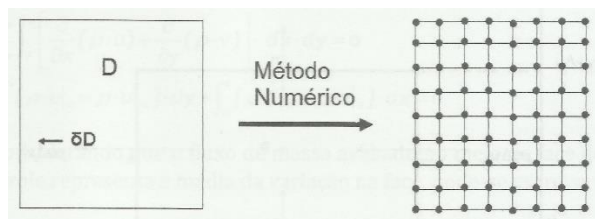


Figura 8 - Método de volumes finitos
Fonte: Souza (2011).

A quantidade de pontos inseridos na malha numérica necessária para fornecer uma solução precisa e a forma como esses pontos são distribuídos no domínio de cálculo são fatores que dependem da natureza do problema a ser resolvido (SOUZA, 2011).

3. METODOLOGIA

3.1 IMPLEMENTAÇÃO DE ROTEIRO DE CÁLCULOS

Para realização do presente trabalho buscou-se realizar inicialmente os cálculos para obtenção das dimensões dos elementos constituintes do conjunto da turbina do tipo Francis. Nesta etapa foi desenvolvido dois códigos em *Software Python* (Apêndices 1 e 2), os mesmos são baseados no roteiro de cálculo descrito no item 2.3 propostos por Souza (2011).

O primeiro código (Apêndice 1) gera uma equação para a curva da Coroa Interna e para a curva da Cinta Externa projetadas no plano xy, essas equações serão utilizadas no *software CAD*, a fim de realizar o modelamento pás da turbina. Este código proposto corrige diretamente os valores em função do ângulo de entrada da turbina. Neste código também foi calculado qual o tipo de turbina seria mais adequado para a PCH utilizada neste estudo, sendo a Turbina Francis a mais apta ao projeto.

O segundo código (Apêndice 2) foi utilizado a fim de calcular o ângulo de projeção horizontal para as linhas de correntes, estes ângulos servem para determinar a curvatura da pá da turbina, visto que a mesma segue um padrão em forma de curva côncava não linear.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Com o código implementado passou-se a etapa de definição das variáveis de entrada do sistema, sendo as mesmas definidas a partir de dados presentes no sistema hidroelétrico, sendo as mesmas: vazão no rotor, vazão mínima no rotor, altura da barragem, altura máxima da barragem, rotação do rotor, rendimento volumétrico e rendimento interno.

Os dados de entrada utilizados neste trabalho são os pertencentes a Usina BURICA I, a qual pertence a Cooperativa de distribuição de Energia Entre Rios Ltda. (CERTHIL), os dados estão mostrados na Figura 9.


```

#Dados de entrada
Q = 3.82 #m³/s vazão no rotor
Q = 3.82 #m³/s vazão mínima no rotor
H = 21.70 #m altura da barragem
Hmax = 25.00 #m altura máxima da barragem
g = 9.81 #gravidade
n = 450.00 #rpm rotação do rotor
nv = 0.96 #rendimento volumétrico
ni = 0.910 #rendimento interno

```

Figura 9 - Dados de entrada para os cálculos
Fonte: Autoria Própria (2017).

3.3 MODELAMENTO GEOMÉTRICO DOS COMPONENTES

Após a execução dos cálculos em código *Python*, os resultados obtidos foram utilizados para a elaboração da geometria do rotor (componentes individuais) com o *Software Solidworks*. Com todos os elementos modelados, realizou-se a montagem do conjunto com a inserção das restrições necessárias para o funcionamento do rotor.

3.4 SIMULAÇÃO DO CONJUNTO DO ROTOR

Com auxílio do *Software Solidworks* e de seu comando *Flow Simulation*, foi realizada a geração da malha e a simulação, definido as condições de contorno e por fim, a obtenção dos resultados. A simulação ocorreu através do método de Dinâmica dos Fluidos Computacional, CFD, o qual é um método de simulação para a resolução de problemas que envolvam o efeito de forças em fluidos (SOUZA, 2011). As etapas do processo são mostradas na Figura 10.



Figura 10 - Etapas da elaboração do projeto de simulação
Fonte – Souza (2011).

O processo de simulação em CFD se deu conforme os passos presentes na Figura 11, obtendo assim os resultados referentes ao projeto, bem como características da velocidade máxima do fluido em contato com o rotor e da pressão máxima atingida.

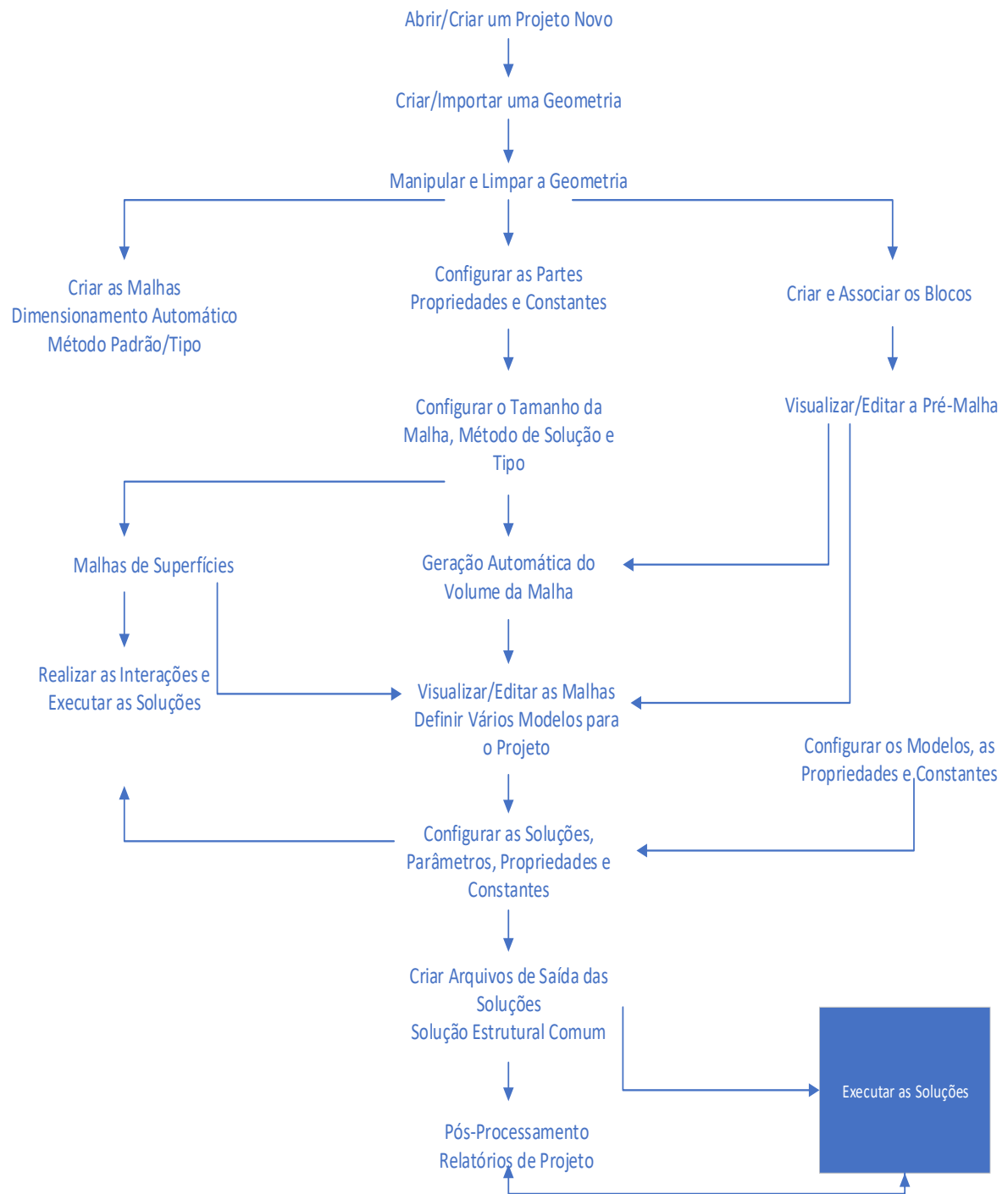


Figura 11 - Processo de uma simulação CFD
Fonte: Souza (2011).

4. RESULTADOS

4.1 DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA

Os resultados encontrados a partir da aplicação do primeiro código em *Python*, com os dados de entrada, estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados

B4m	D5e	b0	D4i	D4e	D4m	D3e	D3i	D5i
71.07	0.697	0.207	0.598	0.665	0.631	0.865	0.664	0.239

Fonte: Autoria Própria (2018).

A projeção das curvas da Coroa Interna e da curva da Cinta Externa projetadas no plano xy , são mostradas na Figura 12a e 12b. A Figura 13 mostra as projeções juntamente com os resultados obtidos nas medições realizadas no *Software Solidworks*. Após os traçados das curvas, desenhou-se as arestas de entrada e saída da pá, mostradas na Figura 14.

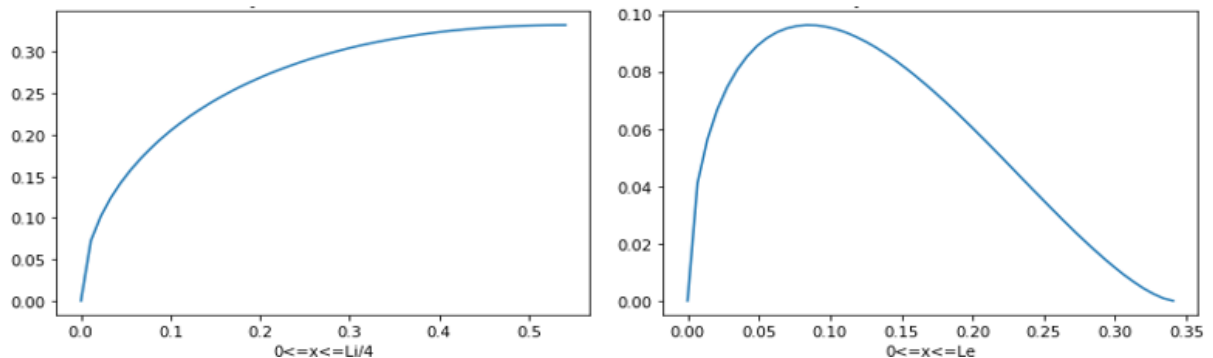


Figura 12 - a) Projeção da Cinta Externa no eixo xy , b) Projeção da Coroa Interna no eixo xy
Fonte: Autoria Própria (2018).

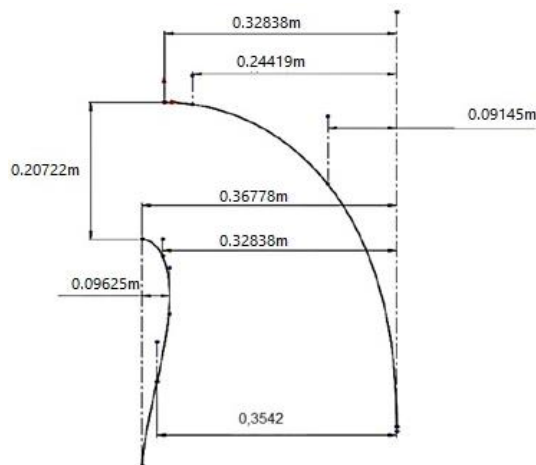


Figura 13 - Projeção da Pá no plano xy
Fonte: Autoria Própria (2018).

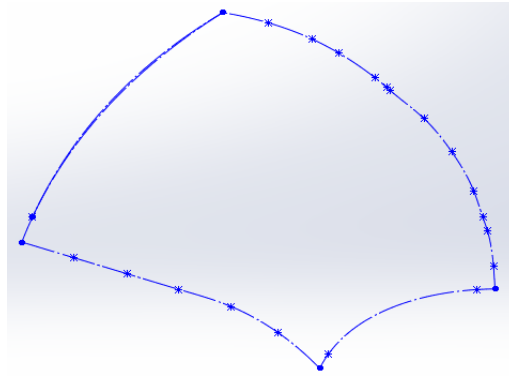


Figura 14 - Projeção no plano xy com as arestas de entrada e saída da pá.
Fonte: Aatoria Própria (2018).

Com a projeção da pá do rotor modelada em CAD, as arestas de entradas e saída foram divididas em 6 segmentos iguais, S_j , e medido o diâmetro de cada ponto. A partir desses dados de entrada mostrados nas Tabelas 4 e 5, foi gerado um segundo código em *Software Python*, onde se obteve os seguintes resultados mostrados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Obteve-se também os diâmetros b_m , mostrados, na Figura 15, os quais foram utilizados como referência para as linhas de pressão provisórias.

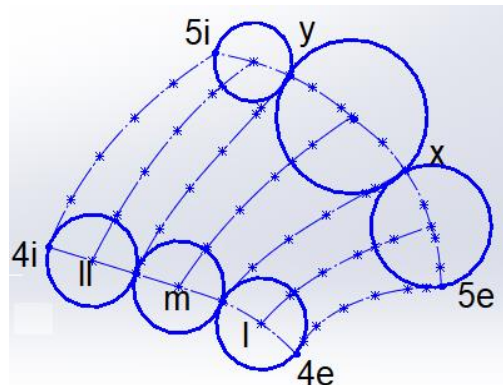


Figura 15 - Arestas de Pressão
Fonte: Aatoria Própria (2017).

Tabela 4 - Dados da Aresta de entrada da pá.

Pts	S_j	C_{mj^*}/C_{m4i}	D_j	K_j
-	m	-	m	m
4i	0	1,0000000	0,32823328	0,32823328
1	0,033127275	1,0342212	0,30054135	0,31082624
2	0,06625455	1,0914553	0,28432198	0,31032473
3	0,099381825	1,1753779	0,27407737	0,32214449
4	0,1325091	1,2916004	0,26411586	0,34113215
5	0,165636375	1,4482978	0,25415435	0,38251842
4e	0,19876365	1,6571684	0,24419284	0,40466866

Fonte: Aatoria Própria (2018)

Tabela 5 - Dados da Aresta de saída da pá.

Pts	Sj	Cmj*/Cm4i	Dj	Kj
-	m	-	m	m
5i	0	1,0000000	0,27534827	0,27534827
1	0,030220742	1,0311724	0,18176537	0,18743143
2	0,060441483	1,0831072	0,15009391	0,16256776
3	0,090662225	1,1588314	0,12679365	0,14693246
4	0,120882967	1,2629261	0,10948044	0,13826571
5	0,151103708	1,4019885	0,09801941	0,15349032
5e	0,18132445	1,5853303	0,0914555	0,14498717

Fonte: Autoria Própria (2018).

Onde:

Cmj^* = velocidade meridional (m/s);

$Cm4i^*$ e $Cm5i^*$ = velocidades meridionais nos pontos 4i e 5i, respectivamente.

Tabela 6 - Resultados para a Aresta de entrada da Pá

Pts	θ_j	ζ_j	Cmj^*	u_j	Cuj	β_j^*
-	graus	graus	m/s	m/s	m/s	graus
4e	93,1600086	46	14,35926766	7,7338144	25,0481920	12,46621119
4l	90	75	14,3198137	7,1770944	26,9911550	13,46954603
4x	82,1681844	85	14,2907477	6,7592905	28,6595270	14,33753133
4m	73,308842	86	14,27262827	6,4954052	29,8238621	14,94701961
4y	91,3204217	88	14,25593607	6,2498991	30,9953911	15,56351097
4ll	90	87	14,23922741	6,0017787	32,2767764	16,24167452
4i	86,0630384	89	14,22268038	5,7536582	33,6686785	16,98308145

Fonte: Autoria Própria (2018).

Tabela 7 - Resultados para a Aresta de entrada da Pá

Pts	t_j	e_j	Fes_j	Cmj	β_j	β_{hj}
-	m	m	-	m/s	graus	graus
4e	0,85931271	0,0020417	0,98749915	15,085543	11,3974233	81,749013
4l	0,79745494	0,0020646	0,98730764	14,970436	12,2289835	78,175780
4x	0,75103228	0,0020818	0,98700363	14,891263	12,9561814	77,091466
4m	0,72171169	0,0020926	0,98664712	14,845807	13,4717844	76,559840
4y	0,69443324	0,0021027	0,99785056	14,633786	13,8399124	76,168194
4ll	0,66686430	0,0021129	0,98710206	14,748213	14,5579467	75,461158
4i	0,6392953	0,0021231	0,98695872	14,706826	15,1894012	74,812805

Fonte: Autoria Própria (2018).

Tabela 8 - Resultados para a Aresta de saída da Pá

Pts	θ_j	ζ_j	C_{mj}^*	u_j	W_j	rg_j
-	graus	graus	m/s	m/s	-	m
5e	89,33825	44,6691	15,46325	6,48056	0,497626	0,087458
5l	90,17451	45,0872	14,28693	5,36517	0,484964	0,124118
5x	81,71205	40,8560	14,18900	4,33809	0,455561	0,157650
5m	74,71059	37,3552	14,06977	3,37765	0,442351	0,201638
5y	74,52508	37,2625	13,96972	2,31531	0,417137	0,241762
5ll	49,93813	24,9690	13,92374	2,57166	0,423619	0,276967
5i	42,11520	21,0576	13,88315	2,15486	0,413427	0,310506

Fonte: Autoria Própria (2018).

Tabela 9 - Resultados para a Aresta de saída da Pá

Pts	L_{gj}	S_j	$\cotg \beta_{rj}$	β_{rj}	β_{rhj}
-	m	-	-	graus	graus
5e	0,13425275	0,01174156	0,537839587	61,7268768	52,5821756
5l	0,15860173	0,01968535	0,431481769	66,6606829	58,45998151
5x	0,18117271	0,02856206	0,306808158	72,9435593	66,42259249
5m	0,19457352	0,03923351	0,252769321	75,8145173	70,22384381
5y	0,20013064	0,0483841	0,170688369	80,3136262	76,35289188
5ll	0,20535178	0,0568757	0,188942297	79,3005346	74,95659666
5i	0,20682484	0,06422048	0,1571756	81,0675791	77,3973696

Fonte: Autoria Própria (2018).

Onde:

θ_j = ângulo entre as tangentes às linhas de corrente e cada ponto da aresta;

ζ_j = ângulo entre as tangentes às linhas de correntes e as linhas paralelas ao eixo nos pontos;

U_j = velocidade tangencial;

β_j^* = ângulo entre as velocidades tangenciais e relativas;

t_j = número de passos;

F_{esj} = coeficiente de estrangulamento;

C_{mj} = velocidade meridional;

β_j = ângulo entre a velocidade tangencial e relativas, levando em conta o estrangulamento variável;

β_{hj} = ângulo na projeção horizontal correspondente a aresta de entrada da pá;

W_j = coeficiente empírico de correção no desvio da saída da pá do rotor;

rg_j e L_{g_j} = raio de centro de gravidade e o comprimento das linhas de corrente, respectivamente;

S_j = momento estático das linhas de corrente rebatidas no plano vertical;

β_{rj} = ângulo da pá do rotor na aresta de saída;

β_{rhj} = ângulo na projeção horizontal correspondentes à aresta de saída da pá.

Com os resultados dos ângulos das projeções horizontais das arestas de saída e de entrada, projetou-se a curvatura das arestas, como mostra a Figura 16.

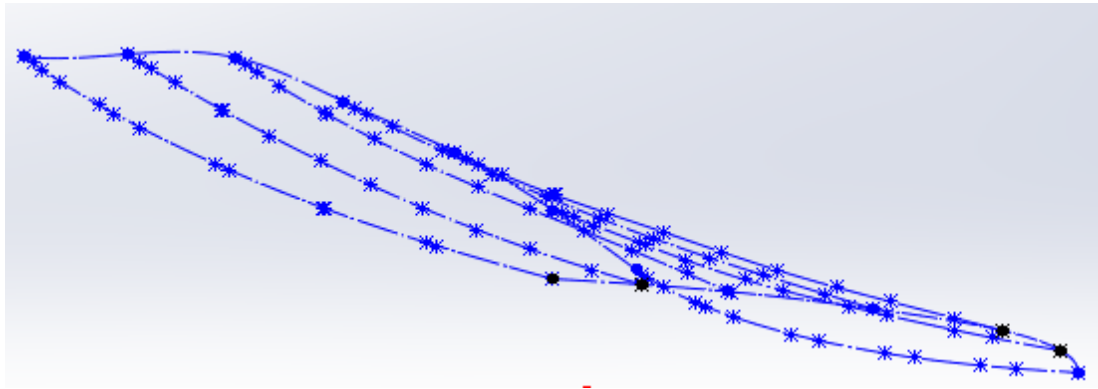


Figura 16 - Projeção 3D das Arestas da Pá.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Para modelagem das superfícies de cada aresta de preção, utilizou-se o perfil padronizado Go 428, o que resultou na Figura 17. E por fim com auxílio da ferramenta Superfície por Loft no *Software* CAD, gerou-se a geometria da pá da turbina, mostrada na Figura 18a e na Figura 18b a mesma montada no conjunto do rotor.

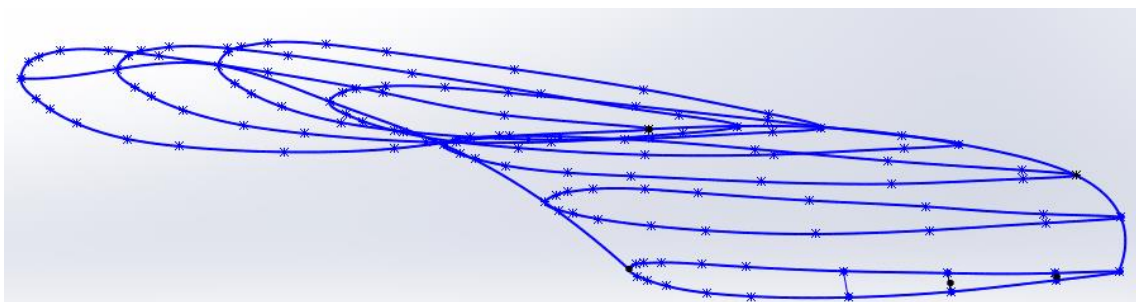


Figura 17 - Perfil das arestas da pá.
Fonte: Autoria Própria (2018)

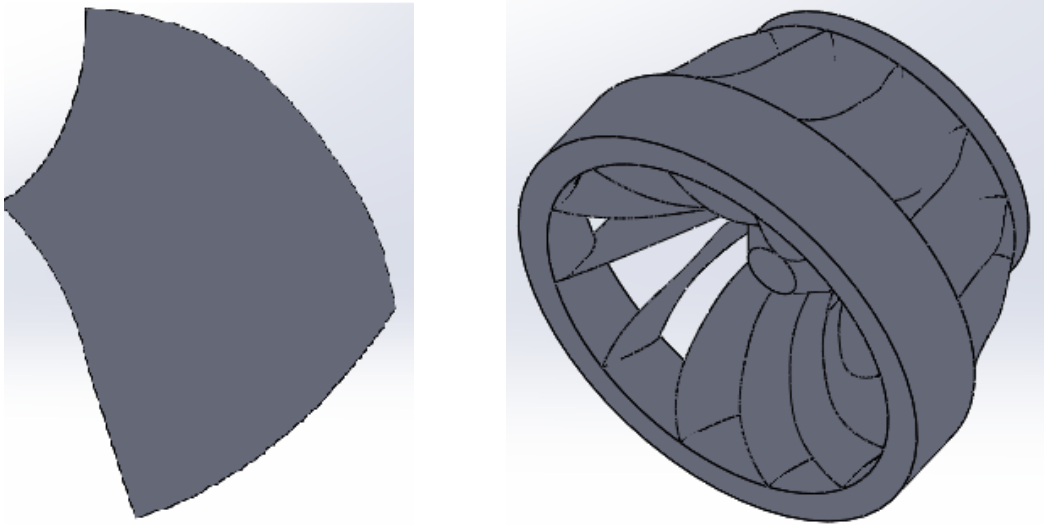


Figura 18 – a) Modelagem da Pá, b) Rotor da Turbina Francis Montado
Fonte: Autoria Própria (2018).

Após o desenvolvimento do rotor, foi projetado a espiral da Turbina Francis, seu cálculo para as dimensões encontrasse no Apêndice B, e é mostrado com o rotor montado na Figura 19.

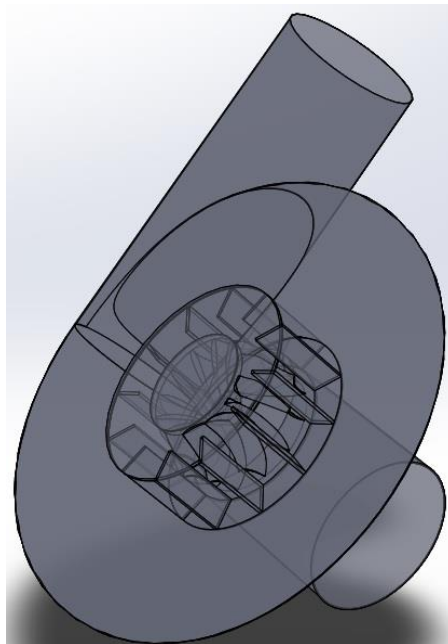


Figura 19 - Vista 3D da Turbina Francis
Fonte: Autoria Própria (2018).

4.2 SIMULAÇÃO

A simulação foi realizada pelo método CFD do *Software Solidworks*, utilizando seu comando *Flow Simulation*, mostrado na Figura 20. Para a realização desse comando é necessário fornecer uma condição de entrada e uma de saída do fluido,

as quais foram consideradas as da Usina BURICA I, sendo elas a entrada do fluido na turbina à uma velocidade de 4,12 m/s e a saída a uma pressão atmosférica.



Figura 20 - Opções para Simulação no Software Solidworks
Fonte: Autoria Própria (2018).

Para realizar os cálculos o *Software* necessita que a geometria seja fechada, para isso utiliza-se o comando *Cread Lids*, mostrados na Figura 21, para definir as regiões de entrada e saída e deixar a geometria utilizada na simulação fechada.

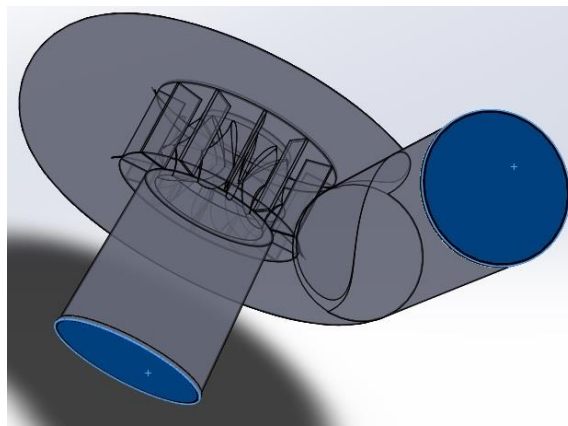


Figura 21 - Em Destaque os Lids Definindo as Regiões de Entrada e Saída
Fonte: Autoria Própria (2018).

Após definir as regiões de entrada e saída, na aba *Wizard*, mostrada na Figuras 22, definiu-se as configurações de unidades, sendo as mesmas no Sistema Internacional, e o tipo de fluido.

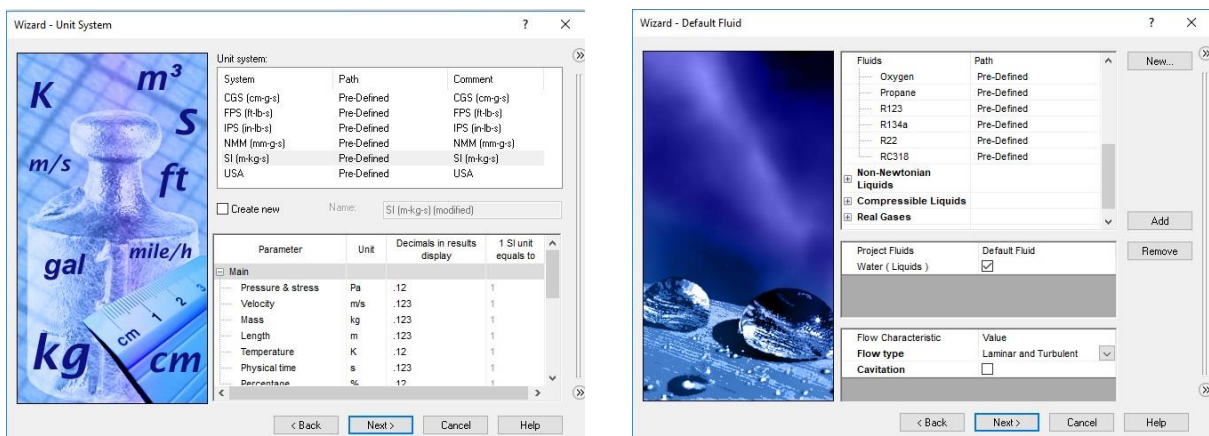


Figura 22 - Seleção das Unidades e do Fluido
Fonte: Autoria Própria (2018).

No Solidworks o refinamento da malha varia de 1 a 7, como mostrado na Figura 23, sendo 7 a malha mais refinada, a qual apresenta um resultado com um menor erro, para essa simulação a malha utilizada foi a de grau 7.

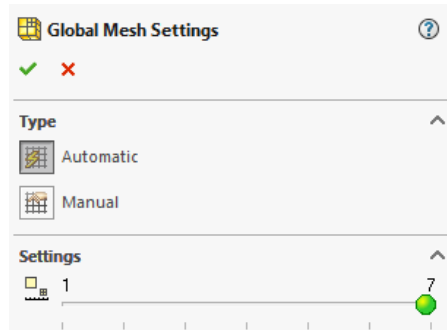


Figura 23 - Definição da Malha
Fonte: Autoria Própria (2018).

Após a realização das etapas para configurar a simulação, os resultados obtidos mostraram uma velocidade máxima do fluido em contato com o rotor de 6,2 m/s, também mostrou que a pressão máxima atingida foi de 109,5 kPa e uma força 9,02 KN.

Para avaliar os resultados obtidos, tomou-se como comparativo os resultados da simulação feita no trabalho de conclusão de curso do acadêmico Cesár Gabriel dos Santos, o qual desenvolveu um rotor de Turbina Francis para a mesma hidrelétrica, porém com métodos para realizar os cálculos e tomadas de decisões diferentes no projeto das arestas de saída e de entrada das pás, a Figura 25 mostra a pá da turbina desenvolvida, além de um outro formato para o caracol da turbina, mostrado na Figura 26. O processo de simulação adotado por Cesár foi desenvolvido no *software* Ansys.



Figura 24 - Modelagem da Pá Desenvolvida por Cesár dos Santos.
Fonte: Santos (2012).



**Figura 25 - Turbina Francis Desenvolvida por Cesár dos Santos.
Fonte: Santos (2012).**

Os resultados obtidos pelo Solidworks mostraram que o fluido em contato com o rotor tem uma velocidade máxima de 6,2 m/s e uma pressão máxima de 109,5kPa, um valor menor que o obtido pelo Ansys, os quais foram de 10,72 m/s e 308,5kPa.

5. CONCLUSÃO

Com os dados referentes a usina hidrelétrica, foi possível realizar os cálculos, dimensionamento e a simulação do rotor da Turbina Francis. Os cálculos foram realizados em uma linguagem Python e o dimensionamento e a simulação no *software* CAD Solidworks.

Os códigos desenvolvidos em linguagem Python possibilitaram a obtenção de dados para o dimensionamento dos componentes da Turbina Francis com um grau de precisão alto, devido aos seus cálculos serem realizados sem ocorrerem grandes erros de arredondamentos, pois ele trabalha com 16 casas decimais. E também proporcionou uma facilidade para a realização dos cálculos, visto que os mesmos são resolvidos em segundos.

Para o desenvolvimento da geometria foram tomadas algumas decisões que influenciaram nos resultados da simulação. A primeira foi no desenvolvimento das arestas de saída e de entrada das pás, as quais influenciam nas espessuras e nos ângulos de entrada e saída de cada aresta da pá do rotor. Um outro fato que influenciou foi o formato da turbina, o comando ressalto por loft do Solidworks não é capaz de realizar o caracol da turbina quando os valores da circunferência variam, isso influencia na velocidade e na pressão do fluido. Esses fatores influenciaram na diferença entre os resultados obtidos através do solidworks e do obtido por Cesar no Ansys, além da diferença que ocorre por ser resultados obtidos de diferentes *softwares*.

A menor pressão do fluido em contato com o rotor gera uma menor rotação, ocasionando em um menor desempenho da turbina apresentada nesse estudo em comparação a desenvolvida pelo Santos (2012), porem devido a sua maior facilidade na produção, esse modelo é mais utilizado, sendo inclusive utilizado na usina estudada, como mostrado na Figura 27.



Figura 26 - Turbina Utiliza na Usina de Buricá
Fonte: Certhil (2013)

REFERÊNCIAS

MACINTYRE, A. J., **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983.

Leão, R.P.S., **Apostila de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**, DEE-UFC, 2009

SIMONE, G.A. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos – Uma Introdução ao Estudo**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2000.

Turbine Selection. Disponível em:

<<http://rivers.bee.oregonstate.edu/book/export/html/35>> Acesso em: 08 de Jun de 2017

Energia hidráulica: Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/energia-hidraulica>> 08 de Jun de 2017

ANEEL, **Gerando Evolução e Diversidade**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Fontes+de+Energia+no+Brasil/2eb48f5c-cc7f-4f63-867e-b2a4f3603418?version=1.0>> Acesso em: 04 de Jun de 2017

ANELL, **Fontes de Energia Exploradas no Brasil**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso em: 04 de Jun de 2017

ANELL, **Energia Hidraulica**, Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_hidraulica/4_3.htm> Acesso em: 04 de Jun de 2017

ANELL, **Resolução nº 394**, Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>> Acesso em: 01 de Jun de 2017

Voith, **Pequenas Centrais Hidrelétricas**, Disponível em:

<<http://voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/pequenas-centrais-hidreletricas-552.html>> Acesso em: 10 de Jun de 2017

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. 1 ed. Brasília, Brasil, 2002.

SOUZA, Z. **Projetos de Máquinas de Fluxo: tomo III, Turbinas Hidráulicas com Rotores Tipo Francis**. Rio de Janeiro: Editora Interciência: Minas Gerais: Editora Acta, 2011.

SOUZA, Z. **Projetos de Máquinas de Fluxo: tomo I, Base teórica e Experimental**. Rio de Janeiro: Editora Interciência: Minas Gerais: Editora Acta, 2011.

Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas. Disponível em:

<<http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%E1ulicas/CAP%CDTULO%203REV.htm>> Acesso em 18 set. 2017.

Neto, Alberto Baldissin. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos - Uma Introdução ao Estudo**. Disponível em < <http://www.iee.usp.br>>. Acesso em 18 set. 2017.

Osses, Jean. **O Método De Volumes Finitos**. Disponível em <<http://www.esss.com.br>>. Acesso em 18 set. 2017.

Types of turbine. Disponível em < <http://rivers.bee.oregonstate.edu/turbine-sizing>>. Acesso em 13 out.. 2018.

Santos, César Gabriel dos, **Dimensionamento e Simulação Computacional de um Rotor Hidráulico do Tipo Francis**. Horizontina, Faculdade Horizontina, 2012.

Alterima, **Informações Turbinas Pelton, Hidreletrica, Eólica e Roda d'agua**,

Disponível em:

<<http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=20&InCdEditoria=3&InCdMateria=217&pagina=&Infor%E7a%E7%F5es+turbinas+pelton,+hidreletrica,+e%F3lica+e+roda+d%27agua>> Acesso em: 01 de Jun de 2017

APÊNDICE A - Primeiro Código Python

#Algoritmo Para Projeção Vertical Rebatida da Superfície Média da Pá do Rotor

In [1]:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
```

In [2]:

```
#Dados de entrada
Q = 3.82 #m³/s vazão mínima no rotor
H = 21.70 #m altura da barragem
Hmax = 25.00 #m altura máxima da barragem
g = 9.81 #gravidade
n = 450.00 #rpm rotação do rotor
nv = 0.96 #rendimento volumétrico
ni = 0.910 #rendimento interno
```

1. ROTOR

1.2 Algoritmo para projeção vertical rebatida da superfície média de pá do rotor

Elementos para o projeto

In [3]:

```
Y = g*H # J/Kg salto energético específico
nqA = 10**3*((n/60)*(Q**0.5)/Y**0.75) #velocidade de rotação específica
(adimensional)
print (nqA)
print (Y)
263.02461218216143
212.877
```

In [4]:

```
if 60 <= nqA < 120:
    print ("Turbina Francis Lenta")
if 120 <= nqA < 220:
    print ("Turbina Francis Normal")
if 220 <= nqA < 350:
    print ("Turbina Francis Rapida")
if nqA < 45 or nqA >=350:
    print ("nqA não compatível com os modelos de Turbinas Francis")
Turbina Francis Rapida
```

Cálculos Iniciais

In [5]:

```
Qr1 = nv*Q #Vazão considerando rendimento volumétrico (m³/s)
nqAr1 = 3*n*((Qr1**0.5)/H**0.75) #velocidade de rotação específica com
vazão corrigida (rpm)
```



```

Qr = 0.731*(1+0.01*(nqAr1**0.5))*Qr1 #vazão regular (m³/s)
nqAr = 3*n*((Qr**0.5)/H**0.75) #velocidade de rotação específica (rpm)
print ("Qr1 =",Qr1, " nqAr1 =",nqAr1, "Qr =",Qr, "nqAr =",nqAr)
Qr1 = 3.6672 nqAr1 = 257.1320818596416 Qr = 3.1105862402457554 nqAr =
236.81548203298013

```

In [6]:

```

D5e = 24.786*((H**0.5)/n)+0.685*((Qr**0.5)/(H**0.25)) #Diâmetro externo da
aresta de saída (m)
b0 = (0.168*(10**-2)*nqAr-0.018*(10**-4)*(nqAr**2))*D5e #Largura do
Distribuidor (m)
if 45 <= nqAr < 100:
    D4i = (2.32-0.975*(10**-2)*nqAr)*D5e #Diâmetro interno da aresta de
entrada (m)
if 100 <= nqAr < 350:
    D4i = (0.5+84.5*(nqAr**-1))*D5e #Diâmetro interno da aresta de entrada
(m)
if 45 <= nqAr < 100:
    D4e = (2.32-0.975*(10**-2)*nqAr)*D5e #Diâmetro interno da aresta de
entrada (m)
if 100 <= nqAr < 250:
    D4e = (0.165*(10**-4)*(nqAr**2)-0.835*(10**-2)*nqAr+2.017)*D5e
#Diâmetro interno da aresta de entrada (m)
if 250 <= nqAr < 350:
    D4e = (1.025-0.03*(10**-2)*nqAr)*D5e #Diâmetro interno da aresta de
entrada (m)
D4m = 0.5*(D4i+D4e) #Diâmetro médio entre D4e e D4i (m)
if 45 <= nqAr < 100:
    D3e = (2.32-0.975*(10**-2)*nqAr)*D5e #Diâmetro externo da coroa externa
(m)
if 100 <= nqAr < 350:
    D3e = (1.255-(0.0633*(10**-3)*nqAr))*D5e #Diâmetro externo da coroa
externa (m)
print ("D5e =", D5e, "b0 =",b0, "D4i =",D4i, "D4e =",D4e, "D4m =",D4m, "D3e
=",D3e)
D5e = 0.8163340166389377 b0 = 0.2423721648785812 D4i = 0.6994495875402973
D4e = 0.7787462069598304 D4m = 0.7390978972500639 D3e = 1.0122620011018046

```

In [7]:

```

u4m = (3.14159265359*D4m*n)/60 #velocidade média na aresta de entrada (m/s)
cm = Qr/(3.14159265359*b0*D3e) #velocidade no tubo de admissão (m/s)
cu4m = (9.8*ni*H)/u4m #velocidade na aresta de entrada (m/s)
print ("u4m =",u4m, "cm =",cm, "cu4m =",cu4m)
u4m = 17.414583932134633 cm = 4.0356797673458225 cu4m = 11.112559493477304

```

In [8]:

```

B4m = np.arctan(cm/(u4m-cu4m))*(180/3.14159265359) #Ângulo de direção da pá
na entrada do rotor (graus)
print ("B4m =",B4m)
if 70 > B4m or B4m > 90:

```

```

print ("B4m não satisfaz a condição  $70 < B4m < 90$  necessária para se
guir o dimensionamento, necessário realizar correção em porcentagem no
D5e")

print ("\nSe B4m for menor que  $70^\circ$ , deve se reduzir D5e em porcentagem
de 5,10,15,... Se B4m for maior que  $90^\circ$  deve se aumentar D5e em
porcentagem de 5,10,15,...")

w = 0.0
f = 0.05
if w == 0.0:
    if B4m >= 90:
        while w == 0:
            D5e = D5e+(D5e*f)
            b0 = (0.168*(10**(-2))*nqAr-0.018*(10**(-4))*(nqAr**2))*D5e
            #Largura do Distribuidor (m)
            if 45 <= nqAr < 100:
                D4i = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno
da aresta de entrada (m)
            if 100 <= nqAr < 350:
                D4i = (0.5+84.5*(nqAr**(-1)))*D5e #Diâmetro interno da
aresta de entrada (m)
            if 45 <= nqAr < 100:
                D4e = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno
da aresta de entrada (m)
            if 100 <= nqAr < 250:
                D4e = (0.165*(10**(-4))*(nqAr**2)-0.835*(10**(-
2))*nqAr+2.017)*D5e #Diâmetro interno da aresta de entrada (m)
            if 250 <= nqAr < 350:
                D4e = (1.025-0.03*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno
da aresta de entrada (m)
            D4m = 0.5*(D4i+D4e) #Diâmetro médio entre D4e e D4i (m)
            if 45 <= nqAr < 100:
                D3e = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro externo
da coroa externa (m)
            if 100 <= nqAr < 350:
                D3e = (1.255-(0.0633*(10**(-3))*nqAr))*D5e #Diâmetro
externo da coroa externa (m)
            u4m = (3.14159265359*D4m*nr)/60 #velocidade média na aresta
de entrada (m/s)
            cm = Qr/(3.14159265359*b0*D3e) #velocidade no tubo de
admissão (m/s)
            cu4m = (9.8*ni*H)/u4m #velocidade na aresta de entrada
(m/s)
            B4m = np.arctan(cm/(u4m-cu4m))*(180/3.14159265359) #Ângulo
de direção da pá na entrada do rotor corrigido (graus)
            f = f+0.05
            if 70 < B4m < 90:
                print ("D5e foi aumentado em ", "%.2f" %(f*100), "%")
                w = 1
        if B4m <= 70:
            while w == 0:
                D5e = D5e-(D5e*f)

```

```

        b0 = (0.168*(10**(-2))*nqAr-0.018*(10**(-4))*(nqAr**2))*D5e
#Largura do Distribuidor (m)
        if 45 <= nqAr < 100:
            D4i = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno
da aresta de entrada (m)
        if 100 <= nqAr < 350:
            D4i = (0.5+(84.5/nqAr))*D5e #Diâmetro interno da aresta
de entrada (m)
        if 45 <= nqAr < 100:
            D4e = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno
da aresta de entrada (m)
        if 100 <= nqAr < 250:
            D4e = (0.165*(10**(-4))*(nqAr**2)-0.835*(10**(-
2))*nqAr+2.017)*D5e #Diâmetro interno da aresta de entrada (m)
        if 250 <= nqAr < 350:
            D4e = (1.025-0.03*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno
da aresta de entrada (m)
            D4m = 0.5*(D4i+D4e) #Diâmetro médio entre D4e e D4i (m)
        if 45 <= nqAr < 100:
            D3e = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqAr)*D5e #Diâmetro externo
da coroa externa (m)
        if 100 <= nqAr < 350:
            D3e = (1.255-(0.0633*(10**(-3))*nqAr))*D5e #Diâmetro
externo da coroa externa (m)
            u4m = (3.14159265359*D4m*n)/60 #velocidade média na aresta
de entrada (m/s)
            cm = Qr/(3.14159265359*b0*D3e) #velocidade no tubo de
admissão (m/s)
            cu4m = (9.8*ni*H)/u4m #velocidade na aresta de entrada
(m/s)
            B4m = np.arctan(cm/(u4m-cu4m))*(180/3.14159265359) #Ângulo
de direção da pá na entrada do rotor corrigido (graus)
            f = f+0.05
        if 70 < B4m < 90:
            print ("D5e foi diminuído em ", "%.2f" %(f*100), "%")
            w = 1

    print ("\nApós correções: Novo D5e =", D5e, "Novo B4m =", B4m)
    print ("\nOutros parâmetros também foram modificados com a correção de
D5e, os parâmetros corrigidos são: b0 =", b0, "D4i =", D4i, "D4e =", D4e, "D4m
=", D4m, "D3e =", D3e, "u4m", u4m, "cm", cm, "cu4m =", cu4m)

```

B4m = 32.63461758433608

B4m não satisfaz a condição $70 < B4m < 90$ necessária para se guir o dimensionamento, necessário realizar correção em porcentagem no D5e

Se B4m for menor que 70° , deve se reduzir D5e em porcentagem de 5,10,15,... Se B4m for maior que 90° deve se aumentar D5e em porcentagem de 5,10,15,...

D5e foi diminuído em 15.00 %

Após correções: Novo D5e = 0.6979655842262917 Novo B4m = 71.0794937955703

Outros parâmetros também foram modificados com a correção de D5e, os parâmetros corrigidos são: b0 = 0.20722820097118694 D4i = 0.5980293973469543 D4e = 0.665828006950655 D4m = 0.6319287021488047 D3e = 0.8654840109420431 u4m 14.889469261975112 cm 5.520576953381653 cu4m = 12.997145606406203

In [9]:

```

if 60 <= nqA < 100:
    D3i = (2.32-0.975*(10**(-2))*nqA)*D5e #Diâmetro externo da coroa interna
    (m)
if 100 <= nqA < 350:
    D3i = (0.7 + (0.16/(2.11*(10**(-3))*nqA+0.08)))*D5e #Diâmetro externo da
    coroa interna (m)
Li = (1.6+0.675*(10**(-2))*nqAr-0.0172*(10**(-4))*(nqAr**2))*D5e #altura da
    coroa interna (m)
D5i = (0.86-2.18*(10**(-3))*nqAr)*D5e #Diâmetro interno da coroa interna (m)
Le = (0.042*(10**(-4))*(nqAr**2)-0.4*(10**(-2))*nqAr+1.2)*D5e #altura da coroa
    externa (m)
L5e = (0.26-0.21*(10**(-3))*nqAr)*D5e #altura do ponto D3i até D5e (m)
yem = (0.162*(D3e-D5e))/(((L5e/Le)*((1-(L5e/Le))**3))**0.5)
print ("D3i = ",D3i, "D5i =",D5i,"Li =",Li, "Le",Le, "L5e",L5e, "yem
    =",yem)
D3i = 0.66444462572318742 D5i = 0.23992025976387474 Li = 2.165120091629969
Le 0.34080310763710214 L5e 0.14676035008193009 yem = 0.09625740878317249

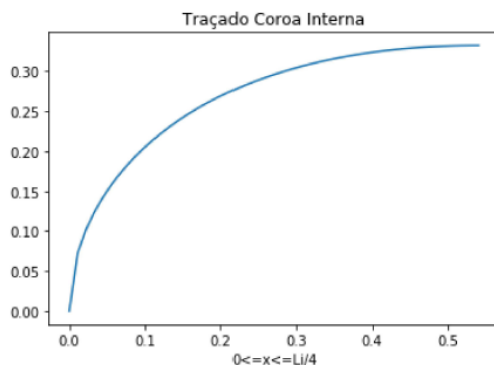
```

In [10]:

```

x=np.linspace(0,(Li/4))
y=(1.54*D3i*(((x/Li)*(1-(x/Li))**3)**0.5))
#(1.54*0.6536230127740661*(((x/2.165120091629969)*(1-
    (x/2.165120091629969))^3)^0.5))
plt.title ("Traçado Coroa Interna")
plt.xlabel("0<=x<=Li/4")
plt.plot(x,y)
plt.show()
print (Li/4)
print (D3i, Li)

```



```
0.5412800229074922
```

```
0.66444462572318742 2.165120091629969
```

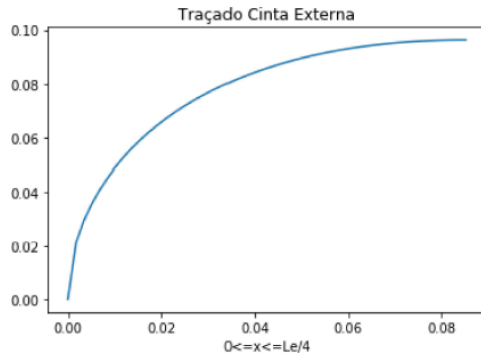
In [11]:

```

x = np.linspace(0,(Le/4))
y = 3.08*yem*(((x/Le)*((1-(x/Le))**3))**0.5)

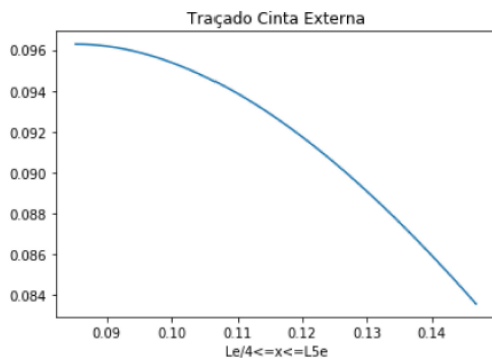
```

```
plt.title ("Traçado Cinta Externa")
plt.xlabel ("0<=x<=Le/4")
plt.plot(x,y)
plt.show()
```



In [12]:

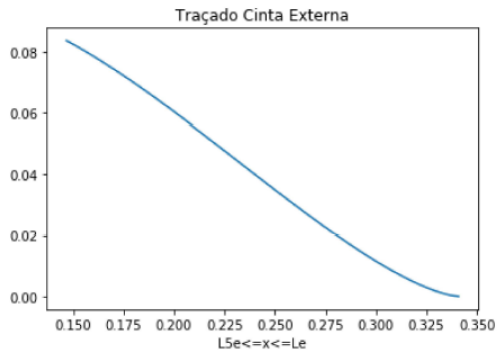
```
x = np.linspace((Le/4),L5e)
y = 3.08*yem*(((x/Le)*((1-(x/Le))**3))**0.5)
plt.title ("Traçado Cinta Externa")
plt.xlabel ("Le/4<=x<=L5e")
plt.plot(x,y)
plt.show()
print (Le/4)
```



```
0.08520077690927554
```

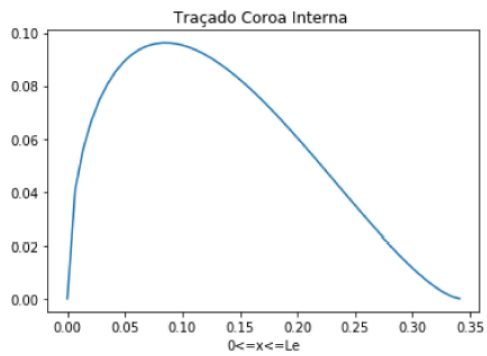
In [13]:

```
x = np.linspace(L5e,Le)
y = 3.08*yem*(((x/Le)*((1-(x/Le))**3))**0.5)
plt.title ("Traçado Cinta Externa")
plt.xlabel ("L5e<=x<=Le")
plt.plot(x,y)
plt.show()
```



In [14]:

```
x = np.linspace(0, Le)
y1 = 3.08*yem*(((x/Le)*(1-(x/Le)**3))**0.5)
#0.29647281905*(((x/0.34080310763710214)*(1-(x/0.34080310763710214)^3))^0.5)
plt.title("Traçado Coroa Interna ")
plt.xlabel("0<=x<=Le")
plt.plot(x, y1)
plt.show()
```



Apendice B - Segundo Código Python

In [1]:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import mpmath
```

In [2]:

```
#Dados de entrada
#Tabela para aresta de entrada da pá
Ri = 0.35179762
Re = 0.05718355
S = 0.19876365
D4i = 0.32823328
D1 = 0.30054135
D2 = 0.28432198
D3 = 0.27407737
D4 = 0.26411586
D5 = 0.25415435
D4e = 0.24419284
Dm = 0.27567356
Fem = 0.950 #adimensional, fator de estrangulamento
Cm = 17.414583932134633 #m/s, velocidade média
Sm = 0.10469
Qr = 3.1105862402457554
nqAr = 236.81548203298013
```

In [3]:

```
m = 0
Si = S * m
while (m <= 6):
    c = math.exp(-1*(((Re-Ri)*Si**2-2*S*Re*Si)/(8*S*Ri*Re)))
    B = S / 6
    if m == 0:
        k = c * D4i
    if m == 1:
        k = c * D1
    if m == 2:
        k = c * D2
    if m == 3:
        k = c * D3
    if m == 4:
        k = c * D4
    if m == 5:
        k = c * D4
    if m == 6:
        k = c * D4e
```

```

print ("C",m, "=", c)
print ("K",m, "=", k)
m = m + 1
Si = B * m
C 0 = 1.0
K 0 = 0.32823328
C 1 = 1.0342212220876164
K 1 = 0.310826242284862
C 2 = 1.0914553028152933
K 2 = 0.31032473277794376
C 3 = 1.175377925500447
K 3 = 0.32214449057721845
C 4 = 1.291600396756973
K 4 = 0.34113214956580906
C 5 = 1.4482978109605409
K 5 = 0.38251842187796065
C 6 = 1.6571684012060761
K 6 = 0.40466865824877113

```

In [4]:

```

Cmm = Fem*Cm #velocidade meridional m/s
c = math.exp(-1*((Re-Ri)*Sm**2-2*S*Re*Sm)/(8*S*Ri*Re))
km = c*Dm
Cm4i = (Cmm*Dm)/km
kc = Qr/(3*3.14159265359)
bm = kc/(Cmm*Dm)
print ("bm =",bm)
print ("Cm4i =",Cm4i)
bm = 0.07236678791426916
Cm4i = 13.883151940771638

```

In [5]:

```

#Dados de Entrada 2
#Tabela para aresta de saída da pá
S = 0.18132445
D5i = 0.27534827
D1 = 0.18176537
D2 = 0.15009391
D3 = 0.12679365
D4 = 0.10948044
D5 = 0.09801941
D5e = 0.0914555
Sm2 = 0.07174817
Dm = 0.16872931

```

In [6]:

```

m = 0
Si = S * m
while(m <= 6):

```



```

c = math.exp(-1*((Re-Ri)*Si**2-2*S*Re*Si)/(8*S*Ri*Re))
B = S / 6
if m == 0:
    k = c * D5i
if m == 1:
    k = c * D1
if m == 2:
    k = c * D2
if m == 3:
    k = c * D3
if m == 4:
    k = c * D4
if m == 5:
    k = c * D4
if m == 6:
    k = c * D5e
print ("C",m, "=", c)
print ("K",m, "=", k)
m = m + 1
Si = B * m
C 0 = 1.0
K 0 = 0.27534827
C 1 = 1.0311724116550824
K 1 = 0.18743143493827838
C 2 = 1.0831070293343472
K 2 = 0.16256776898127687
C 3 = 1.1588314348288224
K 3 = 0.14693246735668353
C 4 = 1.2629261754135384
K 4 = 0.13826571337179136
C 5 = 1.4019885458667243
K 5 = 0.15349032287644915
C 6 = 1.58533033697574
K 6 = 0.14498717863328478

```

```

In [7]:
Cmm = Fem*Cm #velocidade meridional m/s
c = math.exp(-1*((Re-Ri)*Sm2**2-2*S*Re*Sm2)/(8*S*Ri*Re))
km = c*Dm
Cm5i = (Cmm*Dm)/km
kc = Qr/(3*3.14159265359)
bm = kc/(Cmm*Dm)
print ("bm =",bm, "Cm5i =", Cm5i)
bm = 0.11823440782215938 Cm5i = 14.9252805024395

```

```

In [8]:
#Dados de entrada 3
#Tabela Aresta de entrada da pá 2
Cm4i = 13.883151940771638

```

```

S4e = 0.32823328
S4l = 0.30460535
S4x = 0.2868732
S4m = 0.27567356
S4y = 0.26525396
S4ll = 0.2547234
S4i = 0.24419284
S = S4e+S4l+S4x+S4m+S4y+S4i
n = 450.00 #rotação do rotor
D4e = 0.32823328
D4l = 0.30460535
D4x = 0.2868732
D4m = 0.27567356
D4y = 0.26525396
D4ll = 0.2547234
D4i = 0.24419284
ni = 0.910 #rendimento interno
H = 21.70 #m altura da barragem
Lg = 0.19457352 #m
Rg = 0.18955532 #m
bm = 0.07236678791426916 #m
zr = 12 #número de pás
Cj4e = 46*(3.14159265359/180)
Cj4l = 75*(3.14159265359/180)
Cj4x = 85*(3.14159265359/180)
Cj4m = 86*(3.14159265359/180)
Cj4y = 88*(3.14159265359/180)
Cj4ll = 87*(3.14159265359/180)
Cj4i = 89*(3.14159265359/180)
O4e = 93.1600086 *(3.14159265359/180)
O4l = 90.00*(3.14159265359/180)
O4x = 82.1681844*(3.14159265359/180)
O4m = 73.308842*(3.14159265359/180)
O4y = 91.3204217*(3.14159265359/180)
O4ll = 90.00*(3.14159265359/180)
O4i = 86.0630384*(3.14159265359/180)

In [9]:
m = 1
while (m <= 7):
    if m == 1:
        Cmj = Cm4i*math.exp((S4e/4*Ri)*(S4e/2*S)*((Ri/Re)-1)+1)
        Uj = (3.14159265359*D4e*n)/60
        Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
        Bj1 = math.atan(Cmm/(Uj-Cuj))
        t = (3.14159265359*D4e)/zr
        e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S4e/S))
        fe = 1-
        ((e*(1+(mpmath.acot(O4e)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))

```

```

Cmj2 = Cmj/fe
Bj = math.atan((Cmj2/(Uj-Cuj)))
Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj4e))*(180/3.14159265359) -
90)*(-1)
    if m == 2:
        Cmj = Cm4i*math.exp((S4l/4*Ri)*((S4l/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
        Uj = (3.14159265359*D4l*n)/60
        Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
        Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj-Cuj))
        t = (3.14159265359*D4l)/zr
        e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S4l/S))
        fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O4l)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
        Cmj2 = Cmj/fe
        Bj = math.atan((Cmj2/(Uj-Cuj)))
        Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj4l))*(180/3.14159265359) -
90)*(-1)
    if m == 3:
        Cmj = Cm4i*math.exp((S4x/4*Ri)*((S4x/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
        Uj = (3.14159265359*D4x*n)/60
        Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
        Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj-Cuj))
        t = (3.14159265359*D4x)/zr
        e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S4x/S))
        fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O4x)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
        Cmj2 = Cmj/fe
        Bj = math.atan((Cmj2/(Uj-Cuj)))
        Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj4x))*(180/3.14159265359) -
90)*(-1)
    if m == 4:
        Cmj = Cm4i*math.exp((S4m/4*Ri)*((S4m/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
        Uj = (3.14159265359*D4m*n)/60
        Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
        Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj-Cuj))
        t = (3.14159265359*D4m)/zr
        e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S4m/S))
        fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O4m)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
        Cmj2 = Cmj/fe
        Bj = math.atan((Cmj2/(Uj-Cuj)))
        Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj4m))*(180/3.14159265359) -
90)*(-1)
    if m == 5:
        Cmj = Cm4i*math.exp((S4y/4*Ri)*((S4y/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
        Uj = (3.14159265359*D4y*n)/60
        Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
        Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj-Cuj))
        t = (3.14159265359*D4y)/zr
        e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S4y/S))

```

```

    fe = 1-
(e*((1+((math.cos(O4y)**2)/((math.sin(O4y))**2)*(math.cos(Bj1)**2))**0.5)))
    CmJ2 = CmJ/fe
    Bj = math.atan((CmJ2/(Uj-Cuj)))
    Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj4y))*(180/3.14159265359)-
90)*(-1)
    if m == 6:
        CmJ = Cm4i*math.exp((S41l/4*Ri)*((S41l/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
        Uj = (3.14159265359*D41l*n)/60
        Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
        Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj-Cuj))
        t = (3.14159265359*D41l)/zr
        e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S41l/S))
        fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O41l)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
        CmJ2 = CmJ/fe
        Bj = math.atan((CmJ2/(Uj-Cuj)))
        Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj41l))*(180/3.14159265359)-
90)*(-1)
        if m == 7:
            CmJ = Cm4i*math.exp((S4i/4*Ri)*((S4i/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
            Uj = (3.14159265359*D4i*n)/60
            Cuj = (9.81*ni*H)/Uj
            Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj-Cuj))
            t = (3.14159265359*D4i)/zr
            e = 0.007*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S4i/S))
            fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O4i)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
            CmJ2 = CmJ/fe
            Bj = math.atan((CmJ2/(Uj-Cuj)))
            Bhj = (np.arctan(math.tan(Bj)*math.sin(Cj4i))*(180/3.14159265359)-
90)*(-1)
            print (m)
            print ("CmJ =", CmJ,"m/s", "uj =", Uj,"m/s", "Cuj =", Cuj,"m/s", "Bj1
=", Bj1*(180/3.14159265359), "e =", e,"m" )
            print ("t =", t, "fe =", fe, "CmJ2 =", CmJ2, "Bj =",
Bj*(180/3.14159265359), "Bhj =", Bhj)
            m = m + 1
1 - CmJ = 14.89696103327324 m/s uj = 7.733814458338121 m/s Cuj =
25.048192071784857 m/s Bj1 = -43.69632621310582 e = 0.00204172793627497 m
t = 0.08593127175931246 fe = 1.03702549507349 CmJ2 = 14.3650865904868 Bj =
-39.68121527110082 Bhj = 120.82913802050601
2 - CmJ = 14.780425819678499 m/s uj = 7.1770944735315805 m/s Cuj =
26.991155085726295 m/s Bj1 = -39.860372065300766 e = 0.0020646212827942437
m
t = 0.07974549415035088 fe = 1.04405443106214 CmJ2 = 14.1567579045109 Bj =
-35.54506322153237 Bhj = 124.610917989431
3 - CmJ = 14.69773126707873 m/s uj = 6.759290532238911 m/s Cuj =
28.659527072560067 m/s Bj1 = -37.06809217015613 e = 0.002081802146902177 m
t = 0.0751032281359879 fe = 1.05112741538692 CmJ2 = 13.9828255375382 Bj =
32.55734756227965 Bhj = 122.45834641386347

```

```

4 - Cmj = 14.647572973333885 m/s uj = 6.495405231637516 m/s Cuj =
29.82386211355176 m/s Bj1 = -35.34314340353546 e = 0.002092653594295627 m
t = 0.07217116924041685 fe = 1.0569930365645 Cmj2 = 13.857776226173 Bj = -
30.711533308817124 Bhj = 120.65021104260936
5 - Cmj = 14.602332317411713 m/s uj = 6.249899190537419 m/s Cuj =
30.995391140595743 m/s Bj1 = -33.76511727932556 e = 0.0021027492528400797 m
t = 0.06944332433930465 fe = 0.9978569582487041 Cmj2 = 14.633692932341365
Bj = -30.598713048917567 Bhj = 120.58341812894406
6 - Cmj = 14.557992332616923 m/s uj = 6.001778716031002 m/s Cuj =
32.27677646337926 m/s Bj1 = -32.19626117074434 e = 0.002112952421679754 m
t = 0.06668643017812224 fe = 1.06595524975205 Cmj2 = 13.657226544926 Bj = -
27.464522709571796 Bhj = 117.43238057850996
7 - Cmj = 14.515030352785349 m/s uj = 5.753658241524588 m/s Cuj =
33.6686785812063 m/s Bj1 = -30.653129476564416 e = 0.0021231555905194283 m
t = 0.06392953601693986 fe = 1.07298334530103 Cmj2 = 13.5277312703423 Bj =
-25.855015205485834 Bhj = 115.85159048696579

```

In [10]:

```

#Dados de entrada
#Tabela Aresta de saída da pá 2
Cm5i = 14.9252805024395
S5e = 0.25825475
S5l = 0.22061897
S5x = 0.17867089
S5m = 0.12043026
S5y = 0.06228678
S5ll = 0.03110213
S5i = 0.0000
S = S5e+S5l+S5x+S5m+S5y+S5i
D5e = 0.27504354
D5l = 0.22770529
D5x = 0.18411458
D5m = 0.14335214
D5y = 0.09826484
D5ll = 0.10914467
D5i = 0.0914555
Lg = 0.19457352 #m
Rg = 0.18955532 #m
bm = 0.07236678791426916 #m
zr = 12 #número de pás
Cj4e = 46
Cj4l = 75
Cj4x = 85
Cj4m = 86
Cj4y = 88
Cj4ll = 87
Cj4i = 89
Sj5e = 0.011741556
Sj5l = 0.019685349
Sj5x = 0.028562055

```

```

Sj5m = 0.039233515
Sj5y = 0.048384104
Sj5l1 = 0.056875701
Sj5i = 0.064220478
D3i = 0.33209932
D3e = 0.36778727
Cuj4e = 25.048192071784857
Cuj4l = 26.991155085726295
Cuj4x = 28.659527072560067
Cuj4m = 29.82386211355176
Cuj4y = 30.995391140595743
Cuj4l1 = 32.27677646337926
Cuj4i = 33.6686785812063
CC5e = 44.66912785
CC5l = 45.08725961
CC5x = 40.85602712
CC5m = 37.35529955
CC5y = 37.26254312
CC5l1 = 24.96906732
CC5i = 21.05760473
O5e = 89.338255690*(3.14159265359/180)
O5l = 90.174519220*(3.14159265359/180)
O5x = 81.712054240*(3.14159265359/180)
O5m = 74.710599100*(3.14159265359/180)
O5y = 74.525086240*(3.14159265359/180)
O5l1 = 49.938134640*(3.14159265359/180)
O5i = 42.115209460*(3.14159265359/180)

In [11]:
m = 1
while(m <= 7):
    if m == 1:
        Cmj = Cm5i*math.exp((S5e/4*Ri)*((S5e/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
        Uj = (3.14159265359*D5e*n)/60
        Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))
        t = (3.14159265359*D5e)/zr
        e = 0.0014*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S5e/S))
        fe = 1-
        ((e*(1+(mpmath.acot(O5e)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
        Cmj2 = Cmj/fe
        Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
        W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
        cotgBrj =
        (math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
        e**2)*D5e*Cuj4e)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj5e*Cmj))
        Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
        Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
    if m == 2:
        Cmj = Cm4i*math.exp((S5l/4*Ri)*((S5l/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))

```

```

Uj = (3.14159265359*D51*n)/60
Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))
t = (3.14159265359*D51)/zr
e = 0.0014*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S51/S))
fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O51)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
Cmj2 = Cmj/fe
Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
cotgBrj =
(math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
1**2)*D51*Cuj41)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj51*Cmj))
Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
if m == 3:
    Cmj = Cm4i*math.exp((S5x/4*Ri)*((S5x/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
    Uj = (3.14159265359*D5x*n)/60
    Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))
    t = (3.14159265359*D5x)/zr
    e = 0.0147*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S5x/S))
    fe = 1-
    ((e*(1+(mpmath.acot(O5x)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
    Cmj2 = Cmj/fe
    Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
    W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
    cotgBrj =
    (math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
x**2)*D5x*Cuj4x)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj5x*Cmj))
    Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
    Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
if m == 4:
    Cmj = Cm4i*math.exp((S5m/4*Ri)*((S5m/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
    Uj = (3.14159265359*D5m*n)/60
    Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))
    t = (3.14159265359*D5m)/zr
    e = 0.0014*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S5m/S))
    fe = 1-
    ((e*(1+(mpmath.acot(O5m)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
    Cmj2 = Cmj/fe
    Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
    W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
    cotgBrj =
    (math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
m**2)*D5m*Cuj4m)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj5m*Cmj))
    Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
    Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
if m == 5:
    Cmj = Cm4i*math.exp((S5y/4*Ri)*((S5y/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
    Uj = (3.14159265359*D5y*n)/60
    Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))

```

```

t = (3.14159265359*D5y)/zr
e = 0.0014*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S5y/S))
fe = 1-
((e*(1+(mpmath.acot(O5y)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
Cmj2 = Cmj/fe
Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
cotgBrj =
(math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
y**2)*D5y*Cuj4y)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj5y*Cmj)
Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
if m == 6:
    Cmj = Cm4i*math.exp((S5l1/4*Ri)*((S5l1/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
    Uj = (3.14159265359*D5l1*n)/60
    Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))
    t = (3.14159265359*D5l1)/zr
    e = 0.0014*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S5l1/S))
    fe = 1-
    ((e*(1+(mpmath.acot(O5l1)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
    Cmj2 = Cmj/fe
    Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
    W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
    cotgBrj =
    (math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
    l1**2)*D5l1*Cuj4l1)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj5l1*Cmj)
    Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
    Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
if m == 7:
    Cmj = Cm4i*math.exp((S5i/4*Ri)*((S5i/2*S)*((Ri/Re)-1)+1))
    Uj = (3.14159265359*D5i*n)/60
    Bj1 = np.arctan(Cmm/(Uj))
    t = (3.14159265359*D5i)/zr
    e = 0.0014*bm*((H)**0.5)*(1-0.7*(S5i/S))
    fe = 1-
    ((e*(1+(mpmath.acot(O5i)**2)*math.cos(Bj1)**2)**0.5)/(t*math.sin(Bj1)))
    Cmj2 = Cmj/fe
    Bj = math.atan((Cmj2/(Uj)))*(180/3.14159265359)
    W = 0.8*(1+math.cos(Bj*(3.14159265359/180)))*(1-(180/(90+nqAr)))
    cotgBrj =
    (math.cos(Bj*(3.14159265359/180))/math.sin(Bj*(3.14159265359/180)))+W*((D4
    i**2)*D5i*Cuj4i)/(2*(D3e+D3i)*zr*Sj5i*Cmj)
    Brj = mpmath.acot(cotgBrj)
    Brhj = math.atan(math.tan(Brj)*math.sin(CC5e*(3.14159265359/180)))
    print (m)
    print ("Cmj =", Cmj,"m/s", "uj =", Uj,"m/s", "e =", e,"m" )
    print ("t =", t, "fe =", fe, "Cmj2 =", Cmj2, "Bj =", Bj, "W =", W)
    print ("cotgBrj =", cotgBrj, "Brj =",Brj*(180/3.14159265359), "Brhj =",
    Brhj*(180/3.14159265359))
    m = m + 1

```



```

1 - Cmj = 15.463256612130612 m/s uj = 6.480560735110404 m/s e =
0.0003704132175525088 m
t = 0.0720062303901156 fe = 0.994356983090737 Cmj2 = 15.5510112314659 Bj =
67.37708140462544 W = 0.49762684823754566
cotgBrj = 0.5378395873198594 Brj = 61.7268768400784 Brhj =
52.582175599434095
2 - Cmj = 14.286930625972218 m/s uj = 5.365179496856854 m/s e =
0.00038521048821197365 m
t = 0.05961310552063171 fe = 0.9931040698869 Cmj2 = 14.3861364173035 Bj =
69.54745435869329 W = 0.48496462038689575
cotgBrj = 0.4314817686590633 Brj = 66.6606828870966 Brhj =
58.45998151031376
3 - Cmj = 14.189003558888643 m/s uj = 4.3380975896010625 m/s e =
0.004217883884833923 m
t = 0.0482010843289007 fe = 0.908453864831129 Cmj2 = 15.618848802549 Bj =
74.47749483017273 W = 0.4555617232288512
cotgBrj = 0.30680815798475203 Brj = 72.9435593345695 Brhj =
66.42259249432387
4 - Cmj = 14.069774074301707 m/s uj = 3.377655224253039 m/s e =
0.0004246017127034718 m
t = 0.03752950249170043 fe = 0.988354334614959 Cmj2 = 14.2355566030709 Bj =
76.65231485906241 W = 0.4423517369693115
cotgBrj = 0.25276932111711337 Brj = 75.8145172563775 Brhj =
70.22384380988376
5 - Cmj = 13.969727534632613 m/s uj = 2.315310745876476 m/s e =
0.0004474620017859137 m
t = 0.025725674954183066 fe = 0.982364575053184 Cmj2 = 14.22051231222 Bj =
80.75253850418095 W = 0.41713705382448096
cotgBrj = 0.17068836916286723 Brj = 80.3136262199123 Brhj =
76.35289187846584
6 - Cmj = 13.92374396497464 m/s uj = 2.5716607008787866 m/s e =
0.00045972287977145515 m
t = 0.02857400778754207 fe = 0.983578480495391 Cmj2 = 14.1562104510072 Bj =
79.7037564275077 W = 0.4236199433271728
cotgBrj = 0.18894229727145512 Brj = 79.3005346372855 Brhj =
74.95659665841708
7 - Cmj = 13.883151940771638 m/s uj = 2.154869451978002 m/s e =
0.00047195131334439727 m
t = 0.023942993910866687 fe = 0.979977013503044 Cmj2 = 14.1668138634647 Bj =
81.35121362906492 W = 0.41342761810709344
cotgBrj = 0.15717559960223618 Brj = 81.0675791134707 Brhj =
77.39736959911136

```

In [12]:

```

D5e = 0.8163340166389377
Q = 3.82
Do = (0.16*(10**4)*nqAr**2-0.98*(10**2)*nqAr+2.9)*D5e
Ce = 0.2*((2*9.81*H)**0.5)
De = 1.437*(Q/(H**0.5))
print (Do*1000, De*(1000/2))
1205.3281442924665 589.1966493916763

```