

LUCAS KIN HIRONAKA

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE TURBINA TIPO FRANCIS

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Engenheiro Mecatrônico

São Paulo
2012

LUCAS KIN HIRONAKA

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE TURBINA TIPO FRANCIS

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Engenheiro Mecatrônico

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Hironaka, Lucas Kin

Otimização Paramétrica de Turbina Tipo Francis / L. K. Hironaka – São Paulo, 2011.
84 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Estruturas (Otimização) 2. Interação fluido-estrutura 3. Dinâmica dos fluidos (Simulação computacional, Otimização) 4. Turbinas hidráulicas I. Silva, Emílio C. N. II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. III. Otimização Paramétrica de Turbina Tipo Francis

à minha Família

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos meus pais Hélio e Vilma e ao meu irmão Gustavo por todo o apoio e incentivos. Também, a todos os parentes que diretamente ou indiretamente contribuíram para a Graduação e seu desenvolvimento.

Ao Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pelo constante apoio, motivação, dedicação e pró-atividade.

Ao Sandro Vatanabe e ao Felipe Langellotti Silva pelo auxílio e paciência no esclarecimento de dúvidas.

Aos colegas de turma e amigos que contribuíram para a minha formação.

“A ciência que criamos é apenas isso, nossa criação. Mesmo que maravilhosa, será sempre limitada pelo que podemos conhecer do mundo.”

(Marcelo Gleiser)

RESUMO

Rotores de hidrogeradores são utilizados vastamente para geração de energia em usinas hidroelétricas. Dado o contexto de necessidade de fontes renováveis de energia, a sua aplicação será favorecida e bastante aplicada em médio e longo prazos. O objetivo é ter a maior eficiência no aproveitamento da energia contida em corpos hídricos, com o mínimo custo e uso de recursos e também com segurança, credibilidade e durabilidade. Este trabalho apresenta uma metodologia para obtenção de um rotor de hidrogerador otimizado estruturalmente, a partir da modelagem em função de parâmetros geométricos, considerando a Interação Fluido-Estrutura. Para a execução é utilizada a plataforma ANSYS®: BladeGen® para geração do modelo das pás e parametrização, CFX® para obtenção de um carregamento de pressão gerado pelo escoamento de um fluido, TurboGrid® para discretização do modelo em malha de elementos finitos. É proposta a otimização paramétrica ao empregar o software ModeFrontier® para melhorar as propriedades mecânicas estruturais das pás do rotor provendo a melhoria na segurança durante a operação e aumentando a vida útil. Os resultados são relacionados a um rotor de hidrogerador de uma turbina tipo Francis da Usina Hidroelétrica de Jaguari, visando possíveis alterações em sua geometria que possam estender a vida útil, reduzindo a probabilidade de aparecimento de defeitos estruturais, inclusive a partir de desgaste.

Palavras-chave: Otimização Estrutural. Interação Fluido-Estrutura. Otimização Paramétrica. Simulação MEF. Simulação CFD. Turbina Francis.

ABSTRACT

Hydrogenerator rotors are vastly used for power generation in hydroelectric power plants. Given the context of necessity for renewable energy, its application is favoured and widely applied in medium and long terms. The goal is to increase the efficiency on the use of power capability in hydric bodies, keeping low cost, minimal resource together with safety, credibility and durability. This work presents a methodology to obtain a hydrogenerator rotor structurally optimized, by modeling it as a function of geometrical parameters, including the Fluid-Structure Interaction. The implementation uses ANSYS® platform: Bladegen® for the blade model generation and parameterization, CFX® to obtain the pressured load when a fluid is flowing, TurboGrid® for discretisation of the model into a finite element mesh. It is proposed to employ ModeFrontier® software when performing the parametric optimization, to improve the mechanical structural properties of the rotor blades, to improve safety during operation and increasing life span. The results consider a hydrogenerator rotor from a Francis hydro turbine used at Jaguari's power plant, aiming at possible changes in the geometry which could increase life span, decrease the probability of structural defects, and include wear out effects.

Keywords: Structural Optimization. Fluid-Structure Interaction. Parametric Optimization. FEM Simulation. CFD Simulation. Francis Hydro Turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fluxograma da otimização hidrodinâmica para reabilitação e aprimoramento de turbinas hidráulicas (Xi-de & Yuan, 2009)	22
Figura 1.2 Fluxograma de Projeto de pá de bomba através de integração com ANSYS® CFD	23
Figura 3.1 - Abordagens para solução de problema de Otimização	34
Figura 4.1 - Método de operação no ANSYS Workbench	37
Figura 4.2- Fluxograma da Metodologia desejada.....	38
Figura 4.3 – Modelagem no BladeGen®	39
Figura 4.4 - TurboGrid® Domínio Fluido ao redor da Pá	40
Figura 4.5 – CFX-Pre®	41
Figura 4.6 – CFX-solve®	42
Figura 4.7 – CFX-Post® Reporte I	43
Figura 4.8 - CFX-Post® Reporte II.....	43
Figura 4.9 - CFX-Post® Reporte III	44
Figura 4.10- Geometry Pá da turbina.....	46
Figura 4.11 – Static Structural® Pá da turbina	46
Figura 4.12 – Resultado Static Structural para deslocamentos da Pá	47
Figura 4.13 – Interface ModeFrontier	49
Figura 4.14 – Workflow do ModeFrontier®	57
Figura 4.15 – Fluxograma do Processo Automatizado	58
Figura 4.16 – Workflow do ANSYS®.....	59
Figura 4.17 – Pá em 2D com pontos de controle	60
Figura 4.18 – Corte na altura da base da pá	60
Figura 4.19 – Variação de ângulo Teta (wrap angle) até o máximo.....	61
Figura 4.20 – Espessura da pá.....	61
Figura 4.21 – Modelo 3D da turbina (16 páis).....	62
Figura 4.22 – Importação manual de *.inf	62

Figura 4.23 – Discretização do Domínio Fluido em torno da Pá	63
Figura 4.24 – Somente a Pá no TurboGrid®	63
Figura 4.25 – Definição do tipo de máquina.....	64
Figura 4.26 – Rotação de 300 rpm e importação manual de *.gtm	64
Figura 4.27 – Definição de Fluido e Regime Permanente (operação).....	64
Figura 4.28 – Modelo de turbulência e Pressões de Entrada e Saída	64
Figura 4.29 – Domínio Fluido no CFX-Pre®	65
Figura 4.30 – Convergência do CFX-Solve® para Mass Momentum.....	66
Figura 4.31 – Convergência do CFX-Solve® para Turbulência (KE)	67
Figura 4.32 – Modelo tridimensional da Turbina no CFX-Post®	68
Figura 4.33 – Vetores de Velocidade de partículas em escoamento.....	68
Figura 4.34 – Distribuição de Pressão na região de entrada de fluido.....	69
Figura 4.35 – Distribuição de Pressão na região de saída de fluido	69
Figura 4.36 – Distribuição de Pressão em corte à meia altura da pá (3 pás)	70
Figura 4.37 – Distribuição de Pressão em visão projetada da pá.....	70
Figura 4.38 – Pá em domínio sólido	71
Figura 4.39 – Discretização em elementos finitos da pá	71
Figura 4.40 – Carregamento de pressão aplicado na pá.....	72
Figura 4.41 – Deslocamento Total	73
Figura 4.42 – Tensão Equivalente.....	73
Figura 4.43 – Parametrização do deslocamento máximo (Note o “P” à esquerda) 73	
Figura 4.44 – Parâmetros no ANSYS®	74
Figura 4.45 – Erro – Impossibilidade de malha	74
Figura 5.1 – Matriz de dispersão: Espessura e Deslocamento Máximo	75
Figura 5.2 – Matriz de dispersão: Wrap Angle e Deslocamento Máximo	76
Figura 5.3 – Evolução no tempo da Espessura	77
Figura 5.4 – Evolução no tempo do wrap angle	77
Figura 5.5 – Evolução no tempo do Deslocamento Máximo Total	78
Figura 5.6 – Modelo tridimensional da Turbina no CFX-Post®	78

Figura 5.7 – Vetores de Velocidade de partículas em escoamento.....	79
Figura 5.8 – Distribuição de Pressão na região de entrada de fluido.....	79
Figura 5.9 – Distribuição de Pressão na região de saída de fluido	80
Figura 5.10 – Distribuição de Pressão em corte à meia altura da pá (3 páginas)	80
Figura 5.11 – Distribuição de Pressão em visão projetada da pá.....	81
Figura 5.12 – Pá otimizada em domínio sólido	81
Figura 5.13 – Discretização em elementos finitos da pá	82
Figura 5.14 – Carregamento de pressão aplicado na pá.....	82
Figura 5.15 – Deslocamento Total	83
Figura 5.16 – Tensão Equivalente.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
DFC	Dinâmica de Fluidos Computacional
DOE	Design of Experiments
FEM	Finite Element Method
FSI	Fluid Structure Interaction
MEF	Método de Elementos Finitos
MOGAI	Multi Objective Genetic Algorithm II
RMS	Root Mean Square

LISTA DE SÍMBOLOS

[C]	Matriz de Amortecimento da Estrutura
e	Energia Específica
f	Componente cartesiana de força
{F}	Vetor de Carregamentos
g(x)	Restrição de Inegualdade
h(x)	Restrição de Igualdade
i	Vetor Unitário na direção cartesiana x
j	Vetor unitário na direção cartesiana y
k	Vetor Unitário na direção cartesiana z
[K]	Matriz de Rígidez de Elemento
S	Superfície de Controle
t	Variável tempo
u	Componente cartesiana de velocidade em x
{U}	Vetor de Deslocamentos
{ \dot{U} }	Vetor de Velocidades
{ \ddot{U} }	Vetor de Acelerações
v	Componente cartesiana de velocidade em y
\vec{v}	Vetor Velocidade
w	Componente cartesiana de velocidade em z
x_c	Restrição lateral
μ	Viscosidade Dinâmica de Fluido
τ	Tensão de Cisalhamento

ρ Volume Específico

∇ Volume de Controle

∇ Divergente

SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Conjuntura energética e Otimização	16
1.2	Rotores Hidrogeradores - Turbinas Francis	17
1.3	Objetivos.....	18
1.4	Justificativa.....	19
1.5	Revisão bibliográfica.....	19
2	Formulação Teórica.....	24
2.1	Dinâmica de Fluidos Computacional	24
2.1.1	Equacionamento de Escoamentos.....	25
2.1.2	Resolução das Equações	29
2.2	Método dos Elementos Finitos	30
3	Otimização	32
3.1	Métodos de Otimização	33
3.2	Algoritmos de Otimização.....	34
4	Implementação Numérica	36
4.1	Definição da Metodologia	36
4.2	Módulos do ANSYS®	38
4.3	ModeFrontier ®	47
4.4	Automatização do Processo para executar Otimização.....	50
4.5	Iteração inicial (Ponto de partida)	59
5	Resultados Obtidos e Discussão.....	75
6	Conclusão	84
	Referências	86

1 Introdução

1.1 Conjuntura energética e Otimização

A revolução industrial e o capitalismo introduziram a necessidade de geração de grande quantidade de energia para atender à demanda por produção em larga escala. Esta temática prevalece, com uma possível diminuição na extração dos combustíveis fósseis responsáveis por uma importante fração da matriz energética mundial. Faz-se necessário otimizar a geração e uso da energia.

A nova tendência mundial é a migração para fontes renováveis de energia, pela possibilidade de geração e aproveitamento em longo prazo e por estar, na maioria das vezes, em conformidade com o desenvolvimento sustentável almejado para a preservação do meio ambiente, uma das maiores preocupações atuais.

Neste contexto, dentre as possibilidades de geração de energia renovável e limpa em grande escala a energia hidroelétrica é a mais amplamente utilizada no Brasil. Há grande número de usinas hidroelétricas localizadas no país, com diversos portes: pequenas centrais hidrelétricas que visam abastecer um município ou indústria e grandes usinas como a de Itaipu na qual há transmissão de energia para diversas localidades.

Grande parte das usinas do Brasil foi construída há 20 anos ou mais e precisarão de manutenção e verificações num prazo relativamente curto. Também, estão sendo construídas novas usinas hidroelétricas visando aumentar a capacidade instalada de geração de energia. Dessa maneira, faz-se necessária a análise de metodologias que permitam melhor aproveitamento das usinas bem como aumento de confiabilidade, tanto para novas usinas quanto para a manutenção e reforma das antigas.

A otimização aparece em tal aspecto, permitindo redução de custos e aumento de desempenho das usinas. Métodos de otimização podem ser utilizados nos componentes da usina hidroelétrica, principalmente nos rotores de

hidrogeradores que estão ligados diretamente à geração da energia e sofrem grandes carregamentos estáticos e dinâmicos.

Redução de gastos em material, aumento da rigidez, da freqüência de ressonância e da vida útil em relação à fadiga, avaliação de pontos críticos e sensibilidade a características geométricas podem ser realizados através de simulação computacional e algoritmos de otimização, permitindo reparos mais eficientes em rotores já existentes e projeto otimizado para rotores novos.

Um projeto otimizado deve buscar a melhor solução possível que na maior parte dos casos, trata-se de uma solução de compromisso entre diferentes modalidades do conhecimento. Assim, é preciso interpretar o problema como multidisciplinar, traduzindo o termo "Multidisciplinary Design Optimization", ou seja, não basta reconhecer apenas uma necessidade relacionada a uma área da física.

No entanto, soluções ideais abrangendo todos os aspectos simplesmente não existem ou então são inviáveis do ponto de vista de custo, capacidade computacional, tempo e conhecimento. Cabe ao engenheiro, projetista, avaliar o impacto de cada área dentro do projeto final e definir funções objetivo com funções de mérito adequadas. Desta maneira, a otimização estrutural com considerações de interação fluido-estrutura, em inglês "Fluid-Structure Interaction (FSI)", tem um papel importante [...] na medida em que permite o desenvolvimento de soluções diferentes, onde uma solução de compromisso rege o problema. (Silva, 2011)

Dada a conjuntura energética atual, fica nítida a necessidade de redução de custos e aumento na capacidade de geração de energia. Para tal, as usinas hidroelétricas são uma opção muito viável e exigem projeto detalhado de seus componentes. Dentre eles, um dos principais são os rotores de hidrogeradores, que podem começar por otimização estrutural para atingir as metas propostas e exigidas pela sociedade.

1.2 Rotores de Hidrogeradores - Turbinas Francis

Rotor de hidrogerador é uma máquina rotativa que opera em conjunto com um gerador síncrono, convertendo energia mecânica em elétrica: o movimento da água e sua interação com as pás do rotor gera movimento do próprio rotor que em conjunto com o gerador, gera por indução eletromagnética corrente elétrica.

Turbinas Francis são turbinas hidráulicas com entrada de fluido radial e saída axial descendente. Tratam-se de turbinas de reação, ou seja, a pressão de um conduto forçado sofre quedas na injeção e também na própria turbina. Dessa maneira o escoamento da água pelo rotor transfere energia cinética e de pressão às pás. A água entre através de um condutor em espiral que envolve as pás e flui para o interior da turbina.

"O projeto de turbinas Francis é bastante versátil, sendo aplicável a instalações com alturas de queda desde menos de 10 m até cerca de 250 m." (Costa, 2003) Ainda, é possível notar a versatilidade também a partir do intervalo de uso das turbinas Francis em relação à rotação específica: de 20 a 100 para o n_q ou 0,364 a 1,82 para K. O n_q refere-se à rotação específica referida a vazão e o K refere-se ao número-tipo. Este intervalo é intermediário entre as turbinas tipo Pelton de múltiplos jatos e a Kaplan.

As Usinas hidroelétricas de Itaipu, Tucuruí e de Furnas, por exemplo funcionam com turbinas Francis.

1.3 Objetivos

O objetivo desse trabalho é implementar uma metodologia que inclua o efeito de interação fluido-estrutura visando a otimização do projeto de rotor de turbinas hidráulicas tipo Francis. Este método deve ser automatizado e recursivo, para permitir seu uso eficaz. Nessa metodologia, são integrados a análise de "Computational Fluid Dynamics (CFD)" e o Método de Elementos Finitos (MEF).

Para otimização, as pás de um rotor de hidrogerador são parametrizadas. O processo de otimização deve relevar efeitos da interação fluido-estrutura, através de análises da dinâmica dos fluidos com MEF e CFD, permitindo o estudo da estrutura e do escoamento de fluido.

Os resultados obtidos devem ser factíveis com relação à fabricação e reparos, viabilizando o uso da metodologia para aplicações reais na sociedade. Dessa forma, as soluções devem apresentar restrições de modo a torná-las plausíveis.

1.4 Justificativa

Turbinas hidráulicas são extensamente utilizadas nas usinas hidroelétricas e são, portanto, relevantes e estratégicas para o desenvolvimento da sociedade. A otimização estrutural do seu rotor é uma maneira de aumentar a eficiência, durabilidade e confiabilidade, de maneira a permitir melhor aproveitamento da capacidade hídrica para a geração de energia e exigir menor número de manutenções.

As turbinas hidráulicas são divididas em três principais tipos: Pelton (turbinas de ação, ou seja, há um fluxo de água que incide sobre o rotor em pás com formato de duas conchas, pode ser dado por jato único ou por múltiplos jatos), Francis e Kaplan (turbinas de reação, ou seja, a água ocupa a área interna por completo, transmitindo energia cinética e também de pressão ao rotor). O foco, neste caso, dá-se para a turbina Francis. Entretanto, todas as turbinas são evidentemente importantes focos de estudo e é possível estender futuramente o estudo às turbinas Pelton e Kaplan.

Estudos realizados para as turbinas Francis como abordado em (XIAO e YU, 2010) envolvem a análise de métodos para verificar propriedades estruturais, reações dinâmicas a escoamento de fluidos e comportamento do escoamento na região entre pás.

Também, reparos em turbinas já existentes há 20 ou mais anos no Brasil são necessários e este estudo permite análises mais práticas para realização da manutenção, bem como na detecção de possíveis falhas no futuro.

Ainda, a metodologia utilizada pode ser estendida para outras áreas não diretamente ligadas, como máquinas de fluxo no geral: outros tipos de turbinas de geração de energia, turbinas a jato, por exemplo.

1.5 Revisão bibliográfica

O projeto de turbinas através de métodos computacionais tem sido estudado principalmente na China, há relação com o seu aumento do número de usinas hidrelétricas e também de demanda energética. XI-DE e YUAN (2009) busca uma metodologia para evitar o uso de modelos reais, substituindo-os por modelos em CAD 3D e simulações computacionais em um método iterativo que

busca satisfazer critérios de resistência, rigidez e resposta modal através de parametrização e uso de software CAE com análises de CFD.

Um exemplo da aplicação do método é apresentado: a estação de energia de YINXIUWAN, que necessitava de reabilitação após 33 anos de operação, apresentando eficiência reduzida com projeto e manufatura das turbinas Francis ultrapassado para os padrões atuais. Obteve-se aumento na eficiência hidráulica de aproximadamente 5% para as turbinas renovadas. Após um ano de operação, comprovou-se a validade do método com aumento na energia gerada de até 33,33 GWh e ganho de até 485 milhões de Yuan RMB (aproximadamente 77 milhões de dólares) por ano, em comparação com o período pré-renovação.

XIAO e YU (2010) realizaram estudo para simulação de escoamentos em regime transiente além do permanente, de maneira a conseguir soluções para aumentar a estabilidade de turbinas hidráulicas. Consideraram-se as interações entre as partes da turbina por onde há passagem de fluido: condutor em espiral, distribuidores, pás guias de entrada e duto de sucção, exigindo, portanto, para os escoamentos transientes muitos recursos computacionais. Foi realizado também estudo sobre a pulsação da pressão no duto de sucção (frequência e amplitude) e também sua propagação até o conduto em espiral. Os resultados aparentemente são acurados o suficiente dados os problemas apresentados.

SONG et al. (2011) apresentam um estudo similar em alguns aspectos ao anterior. Busca também melhorar a estabilidade operacional da turbina através de análises da pulsação da pressão em diferentes condições e na turbina como um todo. Entretanto, há maior ênfase na presença de vórtices (Karman Vortex Street) e o vórtice de separação do fluxo das partes da turbina.

HOU et al. (2008) apresentam uma comparação entre dois métodos de solução das equações de continuidade e de Navier-Stokes: o método mais comum conhecido como $k-\varepsilon$ e o método Spalart-Allmaras (S-A). O estudo foi realizado através de discretização em volumes finitos e CFD para o escoamento em guias direcionadoras de uma turbina tipo Francis. Os resultados finais variam pouco de um método para o outro quanto à eficiência hidráulica e pressão mínima na superfície das pás. Entretanto, o algoritmo S-A apresenta eficiência computacional muito superior ao tradicional $k-\varepsilon$ sendo possível justificar o uso do S-A para fins de projeto, já que exige tempo computacional menor e também apresenta convergência mais fácil de ser atingida.

SILVA (2011) aborda a otimização estrutural da região interna de uma asa de aeronave tipo UAV, baseada em caso real. Utiliza três métodos para efetuar a otimização: paramétrica, topológica e topológica com interação fluido-estrutura. Há o desenvolvimento de uma metodologia que implementa a otimização e também a interpretação dos resultados da otimização topológica. Tal metodologia é aplicável também a outras modalidades como máquinas de fluxo que é o caso deste trabalho.

SILVA et al. (2008) desenvolvem uma metodologia eficiente para avaliar estruturalmente de um rotor de hidrogerador bem como estimar a vida útil, a partir de análise em elementos finitos e CFD. Propriedades mecânicas são estudadas como deslocamentos máximos e tensões de Von-Mises, análise dos efeitos de remoção de material devido à cavitação e também análise de fadiga e vida útil. Os parâmetros críticos são abordados, principalmente o ângulo da borda de entrada entre a pá e a coroa, verificando sua influência quando alterada, como aumento de deslocamentos e modificação nas deformações e propõe a análise para o ângulo da borda de saída. Por fim, há realização de otimização topológica, envolvendo restrição de volume de material preservando a rigidez estrutural em três etapas: apenas influência do peso próprio e rotação, adição dos efeitos de carregamento de pressão para duas restrições diferentes (80% e 90%).

Houve uma parceria com a Companhia Energética de São Paulo (CESP) para modelagem da turbina tipo Francis da Usina Hidrelétrica de Jaguari utilizando também o ANSYS® e seus módulos de modelagem, discretização em malha de elementos finitos e CFD. De maneira que é relevante para o presente trabalho como referência comparativa para os resultados obtidos. O modelo utilizado da turbina serviu como base para a modelagem geométrica somente.

1.6 Metodologias na Literatura

Na Literatura, é possível encontrar duas metodologias que servem como referência para este trabalho. Apesar de tratarem de otimizações relacionadas à análise CFD são diferentes da temática deste trabalho que realiza a interação fluido-estrutura, unindo MEF e CFD em ciclo de otimização.

Primeiramente, uma publicação apresenta a seguinte metodologia: importação de medidas geométricas reais obtidas com máquina de coordenadas portátil, em conjunto com desenhos técnicos de engenharia é possível gerar um

modelo 3D de CAD. Segue-se para a discretização do domínio fluido e então ocorre a simulação numérica de escoamento, parte-se para estimativa e avaliação de desempenho que é o foco da publicação. Itera-se até satisfação das condições de parada e então realiza-se análise estrutural com CAE até satisfação de critérios pré-estabelecidos e então segue-se para manufatura com CAM. Trata-se de uma metodologia direcionada à reabilitação de turbinas hidráulicas (Xi-de & Yuan, 2009). O objetivo é diferente deste trabalho, com um foco principal em desempenho, a parte estrutural deve garantir a manufatura da turbina após a análise computacional. Trata-se, portanto, de uma referência apesar de apresentar objetivo diferente.

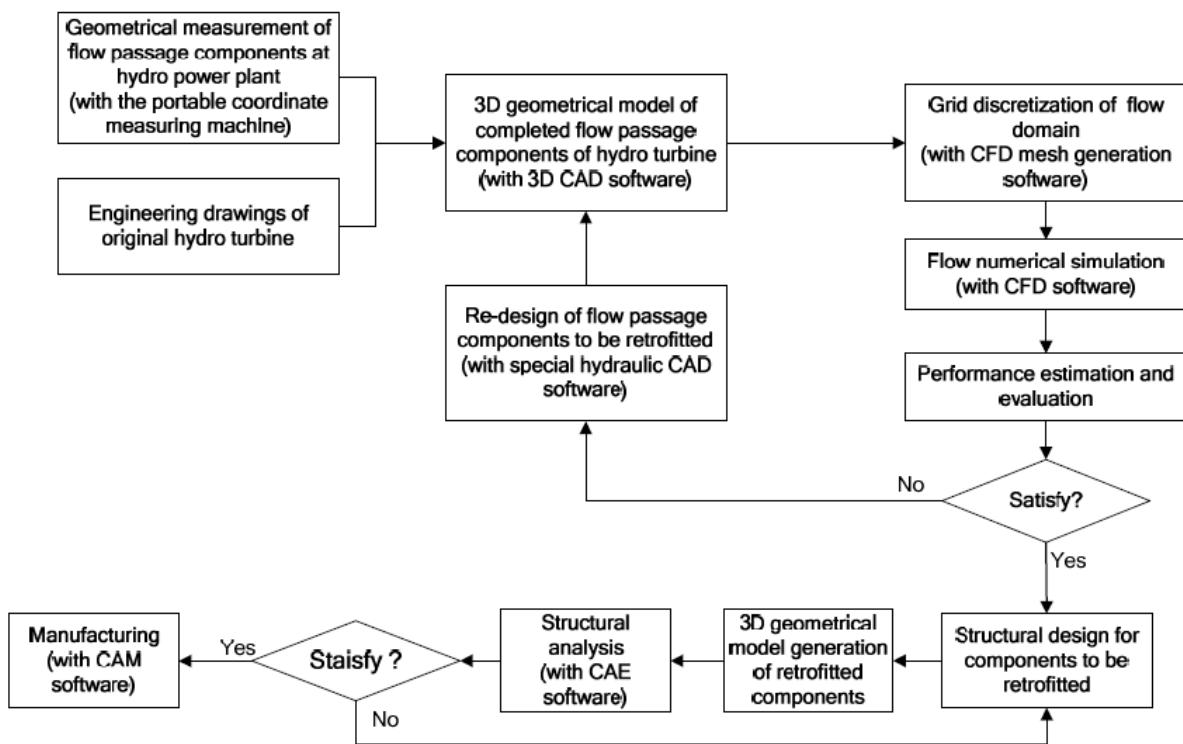


Figura 1.1 Fluxograma da otimização hidrodinâmica para reabilitação e aprimoramento de turbinas hidráulicas (Xi-de & Yuan, 2009)

A segunda metodologia é apresentada para demonstração de software comercial HEEDS MDO®, visando realizar otimização de forma de uma pá de bomba. Em (ANFLUX, Inc and Red Cedar Technology) é demonstrada a metodologia: criação de geometria de pá de uma bomba, seguida de discretização do domínio fluido e então análise CFD de escoamento. Segue-se para avaliação do critério de parada, verificando se o objetivo for alcançado e, caso não tenha sido, realizam-se modificações na geometria da pá iterativamente. O foco era em maximizar o torque gerado pela bomba através de variação no projeto da pá. Utilizou-se para todos os passos modos de comando

para o ANSYS®, sendo também diferente deste trabalho, mas servindo como referência.

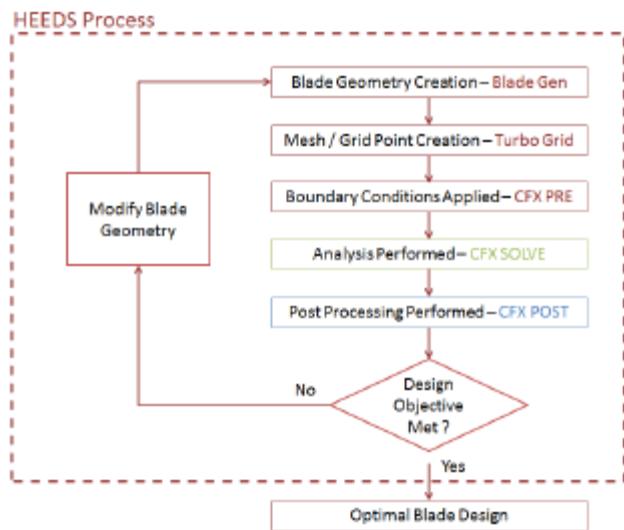


Figura 1.2 Fluxograma de Projeto de pá de bomba através de integração com ANSYS® CFD

2 Formulação Teórica

2.1 Dinâmica de Fluidos Computacional

A Mecânica dos Fluidos apresenta diversos tipos de problemas a serem analisados e resolvidos envolvendo cálculos complexos e nem sempre possíveis de serem obtidos de maneira analítica. Dessa maneira, uma possibilidade é explorar os problemas a partir de algoritmos e métodos numéricos, permitindo a partir do uso de computação obter soluções com aproximação muito boa e coerente com o comportamento dos fluidos e suas interações reais na natureza.

Trata-se da abordagem através de Dinâmica de Fluidos Computacional também conhecida pela sigla CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), permitindo analisar problemas como escoamentos tridimensionais, comportamento e aparecimento de vórtices, grau de turbulência, transferência de calor, interação fluido-estrutura, reações químicas, mistura de substâncias, entre diversos outros.

Para o caso deste trabalho é utilizado o *software* CFX® incluso na plataforma ANSYS®, trata-se de um CFD. Como a maior parte dos CFD comerciais, apresenta um pré-processador, um *solver* e um pós-processador.

O pré-processador consiste nas entradas referentes ao problema a ser resolvido no programa CFD, preparando dados geométricos, selecionando o fenômeno físico envolvido, definindo domínios e subdomínios e condições de contorno para serem depois utilizados pelo *solver*.

O *solver* resolve numericamente o problema através de quatro principais técnicas: diferenças finitas, elementos finitos, método espectral e volumes finitos. Após a resolução, prepara os dados para utilização no pós-processador.

O pós-processador aproveita dos recursos gráficos dos computadores para apresentar os domínios do problema, vetores e curvas de níveis referentes à solução, plotagem em 2D e 3D, permitindo o uso da solução obtida de uma maneira prática e eficiente.

2.1.1 Equacionamento de Escoamentos

Para análise da mecânica de fluidos, devem ser observados três princípios da física: conservação de energia, conservação de massa e conservação do momento linear (segunda lei de Newton). Podem ser obtidas as equações que descrevem os problemas na dinâmica dos fluidos a partir destes princípios: equação da continuidade, equação de conservação do momento linear para cada coordenada e equação de conservação de energia baseada na primeira lei da termodinâmica.

Ainda, para este trabalho foi utilizada a forma conservativa do equacionamento, ou seja, parte do princípio que o volume de controle é fixo no espaço e o fluido escoa através dele. A forma não conservativa o volume de controle sofre deslocamento junto com o fluido.

2.1.1.1 Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

A equação da continuidade (2.1) representa a conservação de massa no volume de controle analisado. Esta equação está apresentada na forma diferencial e exige a continuidade das funções. Fisicamente, a equação representa que toda a variação na massa dentro do volume de controle analisado é igual ao fluxo líquido de massa que sai do volume de controle (saídas menos as entradas de fluido). É possível também apresentá-la na forma integral (2.2).

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathbb{V}} \rho dV + \iint_S \rho \vec{V} \cdot \vec{dS} = 0 \quad (2.2)$$

O \mathbb{V} representa o volume de controle analisado e o S a superfície de controle. A velocidade pode ser descrita como:

$$\vec{V} = u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k} \quad (2.3)$$

Também, o divergente ∇ que aparece em (2.1) é:

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.4)$$

Para fluidos incompressíveis, a densidade do fluido (massa por unidade de volume) não se altera com o passar do tempo, simplificando a equação (2.1) para apenas o termo relacionado ao divergente da velocidade de escoamento tridimensional, uma vez que a água é um fluido incompressível.

2.1.1.2 Equações da conservação de momento linear

É importante ressaltar, primeiramente, que a água é um fluido Newtoniano e portanto as tensões de cisalhamento são proporcionais ao gradiente da velocidade na direção normal ao cisalhamento através da viscosidade dinâmica μ .

$$\tau_{ij} = \mu \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

Nota-se que V_i representa (u, v, w) e x_i representa (x, y, z) .

Apresenta-se então as equações de conservação do momento linear:

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V_i \vec{V}) = \rho f_i \quad (2.6)$$

Pela segunda lei de Newton ou princípio da conservação do momento linear, entende-se que para cada eixo de coordenada (no caso cartesiano) há equilíbrio entre as forças que atuam no volume de controle.

As forças (ρf_i) podem ser originadas de duas fontes: forças relacionadas à massa de fluido que atuam sobre o corpo estudado, por exemplo, devido ao campo gravitacional e a outra força está relacionada à superfície de contato entre corpo e fluido na qual a distribuição e gradiente de pressão bem como as tensões normais e de cisalhamento viscosas atuam sobre o corpo estudado.

Podemos expressar explicitamente os dois tipos de forças e as três coordenadas cartesianas e obtemos:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.9)$$

Uma vez que é possível encontrar as relações entre as tensões normais ($\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$), de cisalhamento ($\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{yz}$) e a viscosidade dinâmica (μ) como visto em (2.5). Assim, encontramos as equações de Navier-Stokes para fluidos newtonianos ($\lambda = -\frac{2}{3\mu}$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]}{\partial x} + \\
+ \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right)}{\partial z} + \rho f_z
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Apresenta-se a forma derivada das equações, pois transmite mais facilmente as noções intuitivas de variação ao invés de conceitos de integração que normalmente são mais complexos.

2.1.1.3 Equação da conservação de energia

Deve-se partir da primeira lei da termodinâmica que expressa a variação da energia em um sistema a partir das trocas de calor entre o sistema e o ambiente e também a partir do trabalho realizado pelo sistema ou sobre o sistema. Para o caso de mecânica de fluidos utiliza-se a conservação de energia sobre um volume de controle. Partimos de:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\iiint_{\nabla} e \rho d\nabla \right] + \iint_S e \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \tag{2.13}$$

Deve-se notar que e representa a somatória das modalidades da energia e que o trabalho envolve o escoamento e forças viscosas normais e de cisalhamento. Podemos então apresentar a equação como visto em (SILVA, 2011):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\
+ \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \\
+ \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

2.1.1.4 Análise através do modelo $k - \varepsilon$

Para calcular a turbulência no escoamento optou-se por utilizar no CFD o modelo $k - \varepsilon$. Tal modelo tem como enfoque os mecanismos que afetam a energia cinética durante a turbulência, sendo mais genérico do que uma análise algébrica simplificada. Tal assunto é bastante explorado em (Versteeg & Malalasekera, 1995) e também é normalmente associado ao uso do Método dos Volumes Finitos (FVM, em inglês, *Finite Volumes Method*).

São utilizados equacionamentos para k (energia cinética turbulenta) e ε (dissipação viscosa). Permite realizar as análises com os efeitos ao longo do tempo de fenômenos como convecção e difusão da energia de turbulência. O modelo padrão de $k - \varepsilon$ foi apresentado em (Launder & Spalding, 1972) com uma equação de transporte para k e uma para ε :

$$\frac{\partial(\rho k V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.16)$$

2.1.2 Resolução das Equações

A resolução das equações de escoamento não é trivial e poucas vezes apresentam soluções analíticas, de maneira que no *solver* do *software* CFD existe a necessidade de discretização de maneira a aproximar cálculos diferenciais e integrais para cálculos numéricos. Como já dito em 2.1, há quatro métodos principais utilizados: diferenças finitas, elementos finitos, método espectral e volumes finitos.

O método das diferenças finitas obtém dados das variáveis nos nós da malha, a partir da aproximação das derivadas por diferenças finitas com truncamento da Série de Taylor em nós vizinhos. Simplifica-se o cálculo

diferencial por cálculos algébricos mais simples, garantindo uma implementação simples e eficiente.

O método dos elementos finitos é utilizado principalmente em problemas estruturais de sólidos, mas também pode ser usado para fluidos utilizando as equações que governam a dinâmica dos fluidos. Este método será abordado posteriormente neste trabalho.

O método espectral é utilizado em matemática aplicada e computação para resolução de equações diferenciais numericamente. Normalmente, consiste em expressar a solução das equações como um conjunto de funções na forma de série de Fourier. É similar ao método dos elementos finitos, porém, com abordagem global e não local.

Finalmente, o método de volumes finitos é o mais utilizado pelos *softwares* comerciais de CFD, as equações na forma conservativa são resolvidas em volumes de controle discretizados, garantindo a cada volume a continuidade, por exemplo.

2.2 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é largamente utilizado para avaliar o comportamento estrutural de sólidos. Permite-se a obtenção de resultados estruturais não possíveis de serem obtidos a partir de cálculos analíticos. A estrutura é discretizada em um grande número de elementos (bidimensionais ou tridimensionais), em cada elemento são aplicadas condições iniciais e de contorno e partir de equacionamento coerente geram soluções numéricas.

Como apresentado em (Silva F. L., 2011), para aplicações estruturais, a solução é obtida a partir de um sistema linear da forma:

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (2.17)$$

O vetor $\{F\}$ é chamado de vetor de carregamentos, $[K]$ é a matriz de rigidez de elemento e, encontra-se $\{U\}$ vetor de deslocamentos. O vetor de carregamentos contém informações referentes às cargas a que a estrutura está submetida. A matriz de rigidez é definida elemento a elemento contém

informações do modelo e sua formulação depende do problema a ser resolvido, a matriz global de rigidez é a combinação superposta das matrizes de rigidez dos elementos. O vetor de deslocamentos obtido é a solução do problema e contém informações referentes ao comportamento da estrutura ao sofrer o carregamento dado em $\{F\}$.

Para cálculos dinâmicos é utilizada:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (2.18)$$

Os vetores $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$ e $\{U\}$ são vetores de aceleração, velocidade e deslocamento nodais, respectivamente. O vetor $\{U\}$ apresenta a mesma forma que na equação 2.18 e os vetores $\{\dot{U}\}$ e $\{\ddot{U}\}$ são suas derivadas de primeira e segunda ordem em relação ao tempo. A matriz de rigidez $[K]$ também apresenta a mesma forma que na equação 2.18.

3 Otimização

A otimização consiste na obtenção de uma solução para um problema, a solução é chamada de ótima quando usufrui da melhor maneira dos recursos existentes no sentido de maximizar ou minimizar alguma variável ou algumas variáveis de interesse. A formulação matemática de problemas de otimização pode ser utilizada largamente, desde problemas mecânicos estruturais até problemas de matemática financeira.

O problema é apresentado na forma de minimizar ou maximizar uma função matemática, chamada função objetivo. A função objetivo é sensível a variáveis chamadas de variáveis de projeto que como em (Silva E. C., 2012) são interpretadas como parâmetros do problema e podem ser discretas ou contínuas. A função objetivo é a quantificação daquilo que será otimizado, nem sempre é possível encontrar uma solução ótima e única, é possível encontrar um conjunto de soluções, neste caso, a solução ótima depende de critérios do projetista e apresenta comportamento de curva de Pareto.

Para problemas reais de otimização são definidas restrições que como sugerido pelo nome limita o espaço de soluções possíveis e, portanto, de soluções ótimas. Há a delimitação de um domínio chamado viável, que satisfaça a todas as restrições impostas ao problema. Tais restrições podem ser:

$$h_a(x) = 0 \text{ para } a = 1, \dots, n \quad (3.1)$$

Tratam-se de restrições de igualdade.

$$g_b(x) \leq 0 \text{ para } b = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

Tratam-se de restrições de inequaldade.

$$x_{min_c} \leq x_c \leq x_{max_c} \text{ para } c = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Tratam-se de restrições laterais.

3.1 Métodos de Otimização

Pode-se dividir a otimização em três principais métodos de resolução: paramétrica, de forma e topológica. Nesta ordem, cresce a complexidade da implementação da solução desejada e também a versatilidade e flexibilidade possível na resolução dos problemas propostos.

A otimização paramétrica consiste em definir uma topologia de estrutura fixa na qual há parametrização de variáveis, impõe-se um intervalo dentro do qual as variáveis (normalmente medidas de comprimento e curvatura) irão variar, encontrando a partir desta variação a solução ótima para uma dada função objetivo.

A otimização de forma consiste na parametrização das formas geométricas que podem ser expressas por funções de interpolação como *splines* ou curvas de Bezier. Definem-se estas funções e variam-se os coeficientes no sentido de otimizar a função objetivo.

A otimização topológica propõe modificar a topologia da estrutura de maneira a otimizar a função objetivo. Um problema clássico é minimizar a flexibilidade (ou aumentar a rigidez da estrutura) utilizando para tal o mínimo possível de volume de material. Dessa maneira, é bastante utilizado para fins práticos.

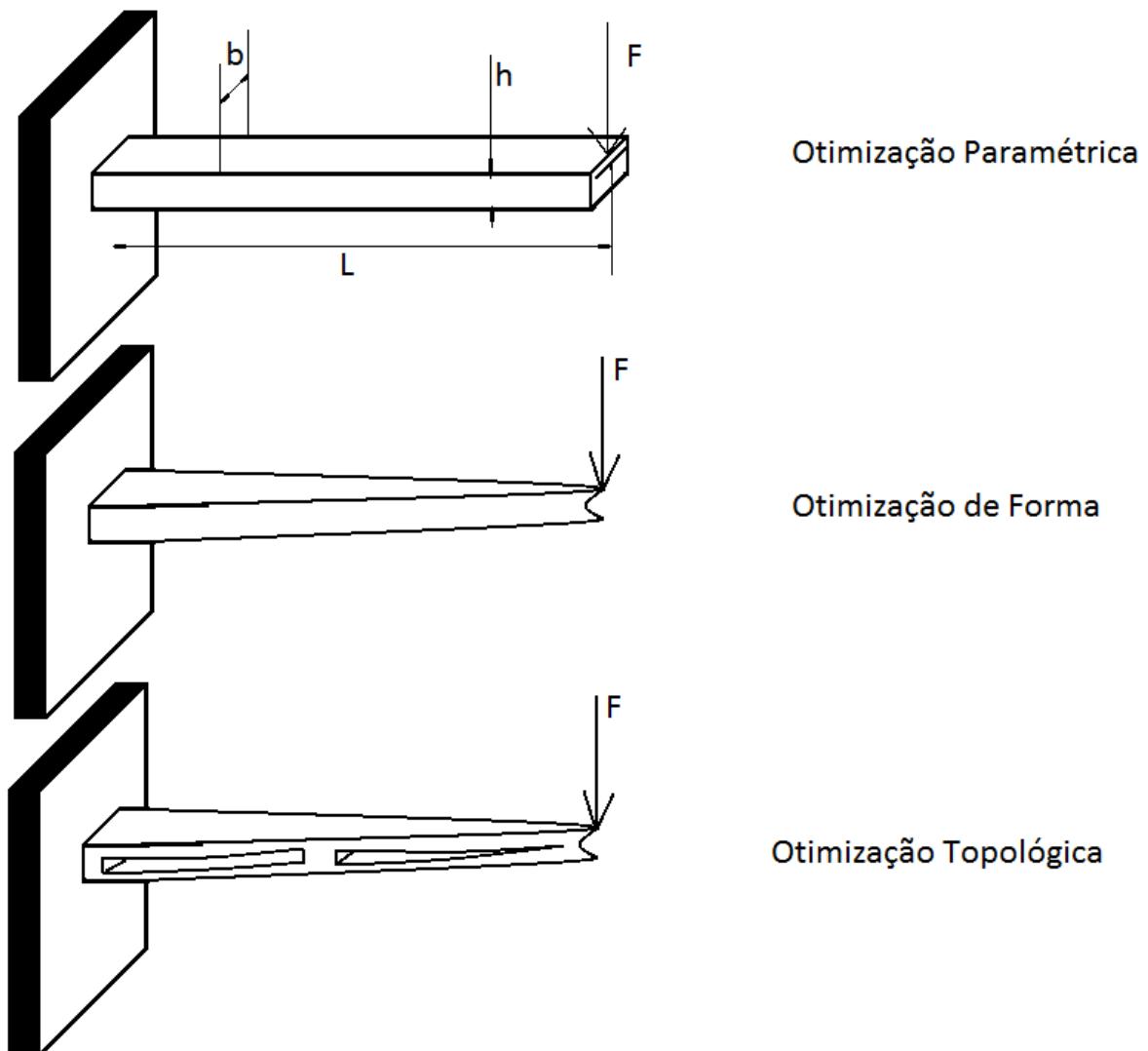


Figura 3.1 - Abordagens para solução de problema de Otimização

Para este trabalho, entretanto, será utilizada somente a otimização paramétrica. Trata-se de um método normalmente mais simples de ser realizado e seria bastante eficiente para otimizar a manutenção de turbinas já existentes.

3.2 Algoritmos de Otimização

Dado um problema de otimização é preciso encontrar sua solução. Utilizou-se neste trabalho método numérico de otimização consistindo de algoritmos numéricos que usufruem de métodos computacionais permitindo solução de problemas bastante complexos com eficiência. Há diversos métodos com aplicações bastante diversas. No caso deste trabalho, que realiza a análise

FSI, não são aplicáveis métodos analíticos e gráficos, assim, são utilizados métodos numéricos.

Os métodos numéricos, por sua vez, também são subdivididos entre genéricos e específicos. Os genéricos apresentam grande flexibilidade e seu uso não é restrito à área estrutural, há duas categorias: programação matemática com base em gradientes e probabilísticos. Os específicos utilizam base empírica com a formulação única para cada problema de otimização utilizando, por exemplo, o critério de Optimalidade.

Neste trabalho, utiliza-se de métodos numérico, mais especificamente de algoritmos genéricos probabilísticos. Trata-se de Algoritmo Genético que simula a evolução natural de espécies. Há uma busca aleatória no espaço de soluções e através do algoritmo genético, encontra-se possível solução ótima.

O fato do algoritmo genético não exigir informações de gradientes é importante, pois caso fossem necessários, o problema seria ainda mais complexo. As interações entre os parâmetros e o deslocamento nem sempre são intuitivas e facilmente expressáveis matematicamente. Há bastante oscilação entre máximos e mínimos locais, sendo difícil determinar condições de parada analíticas a gradientes que satisfaçam bem a situação, daí justificando o encontro de soluções via algoritmos genéticos.

4 Implementação Numérica

4.1 Definição da Metodologia

Para a definição de uma metodologia para otimização paramétrica das turbinas, seria possível criar *solvers* próprios e focados na solução do problema já definido. Entretanto, envolve códigos com grande complexidade e exige tempo de desenvolvimento expressivamente extenso, de maneira que não é coerente com este trabalho.

Assim, é proposta a utilização de *softwares* comerciais para realização da modelagem da turbina, da análise da dinâmica de fluido, da análise estrutural e também para a execução da otimização paramétrica. Tratam-se de *softwares* que utilizam métodos consagrados e confiáveis. Para tal é utilizado a plataforma do ANSYS Workbench® para gerar a geometria da turbina e também para as posteriores análises em CFD e MEF. Trata-se de um *software* largamente utilizado academicamente e industrialmente. Ainda, há integração com o ModeFrontier®, *software* usado posteriormente para realização da otimização paramétrica da turbina. A abordagem é apresentada pela figura 4.1 no ANSYS® e também pela figura 4.2 com um fluxograma especificando o uso de cada módulo além da descrição a seguir.

Inicialmente, para geração da geometria característica da turbina utiliza-se o Bladegen®. O programa permite a criação de diversas geometrias com simetria cíclica ao redor de um eixo como: ventiladores, bombas e como no caso deste trabalho turbinas, inclusive com a possibilidade de definir o posicionamento dos pontos que definem a geometria. A entrada ocorre em 2D e o *software* gera o modelo em 3D. É possível gerar uma pá (*blade*) somente ou até o modelo completo. No caso, está sendo modelada uma pá somente e depois é utilizada a simetria cíclica para verificar o modelo completo.

Posteriormente, o modelo 3D da pá da turbina é transferido ao TurboGrid®. Trata-se de uma ferramenta para criar a malha específica para CFD a ser utilizada, é um programa específico para máquinas com pás, como é o caso estudado. Permite além da criação da malha da pá, a criação das malhas das superfícies que caracterizam a passagem do fluido.

Após a geração da malha para utilização em CFD, transferimos a malha para o CFX®. Nota-se que é possível também definir a malha neste aplicativo, mas foi preferido fazer pelo TurboGrid® devido à facilidade e eficiência maiores. Nesse módulo do ANSYS®, fornecemos as condições iniciais e de operação da turbina e após cálculos do *solver*, encontramos os resultados referentes ao escoamento para a pá da turbina.

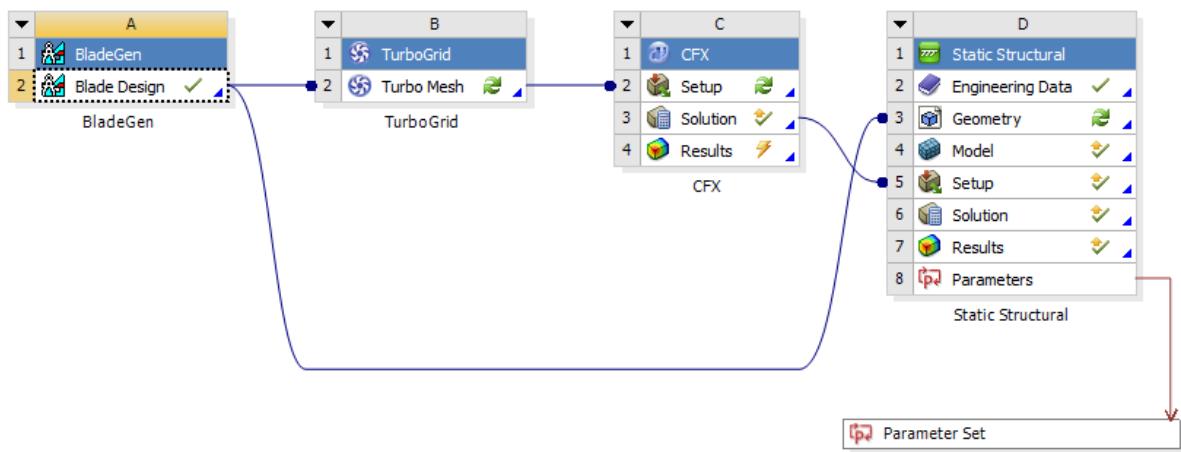


Figura 4.1 - Método de operação no ANSYS Workbench

Com os carregamentos obtidos pelo aplicativo CFD, é possível realizar a análise estrutural da turbina. O modelo 3D da turbina completa é utilizado em conjunto com a aplicação dos carregamentos, de maneira a obter o comportamento estrutural.

Segue-se então para o módulo Static Structural® que já apresenta interação fluido-estrutura, após realizar a importação tanto da geometria da pá quanto do carregamento proveniente da análise CFD. Assim, encontramos resultados de propriedades mecânicas estruturais como tensão, deslocamento e resistência à fadiga.

Confirmado o funcionamento de tal método de trabalho para uma turbina genérica, passa-se à realização da otimização. A turbina deverá ser parametrizada, ou seja, determinados atributos geométricos são definidos como parâmetros cujos valores serão alterados e definirão a geometria final da turbina. Já que a parametrização completa acarretaria em grande complexidade, optou-se por simplificar a parametrização. E assim, com a variação dos parâmetros prosseguir no processo já definido de análise FSI. A otimização será executada via software ModeFrontier® da ESTECO®. O objetivo no caso é minimizar os deslocamentos ocasionados pelo carregamento fluido nas pás da turbina, ou seja,

maximizar a rigidez, a partir de variações de certos parâmetros geométricos da pá, considerando também tensões mecânicas e sua distribuição na turbina.

É importante ressaltar a alta complexidade geométrica, assim, com foco em desenvolver a metodologia e não em parametrizar a turbina, simplificou-se a análise utilizando somente 2 parâmetros fáceis de implementar e suficientemente relevantes para a geometria: o ângulo envoltório da pá da turbina (*wrap angle*) e a espessura da pá da turbina, tais parâmetros serão descritos posteriormente nos itens 4.2 e 5.

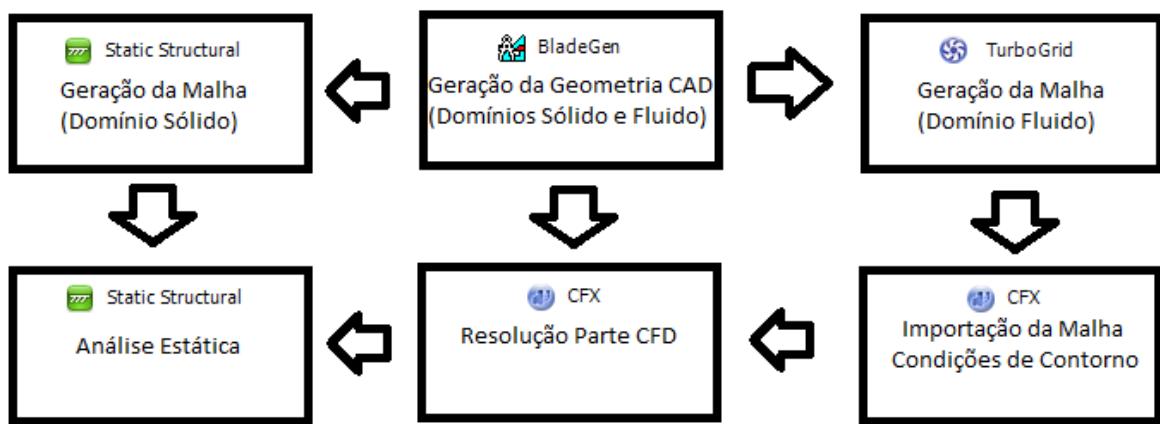


Figura 4.2- Fluxograma da Metodologia desejada

4.2 Módulos do ANSYS®

Após a realização dos testes para execução da primeira iteração, confirmou-se o funcionamento, com obtenção de valores iniciais de deslocamentos na pá da turbina, as condições de contorno e os resultados deste teste serão apresentados na seção 5. Os módulos utilizados serão descritos em seguida para facilitar a compreensão do método.

BladeGen®

O BladeGen® é um módulo de criação de geometrias específico para turbomáquinas que apresentem pás, daí o nome *Blade* em inglês lâmina ou simplesmente pá. Sua aplicação é bastante coerente com o problema deste trabalho.

É possível modelar a geometria em duas dimensões, definindo ponto a ponto características da pá como bordas de entrada e saída, região determinada pela pá física e o volume de controle ao redor dela. Também é criado o domínio fluido,

sendo possível, assim, utilizá-lo diretamente com os demais módulos do ANSYS Workbench®. A figura 4.3 ilustra a modelagem de pontos, nota-se que o *software* apresenta em tempo real uma figura da turbina em modelo tridimensional. É possível também gerar todas as pás, a partir da simetria em torno do eixo Z, tipicamente definido como a região de saída de fluido numa turbina radial.

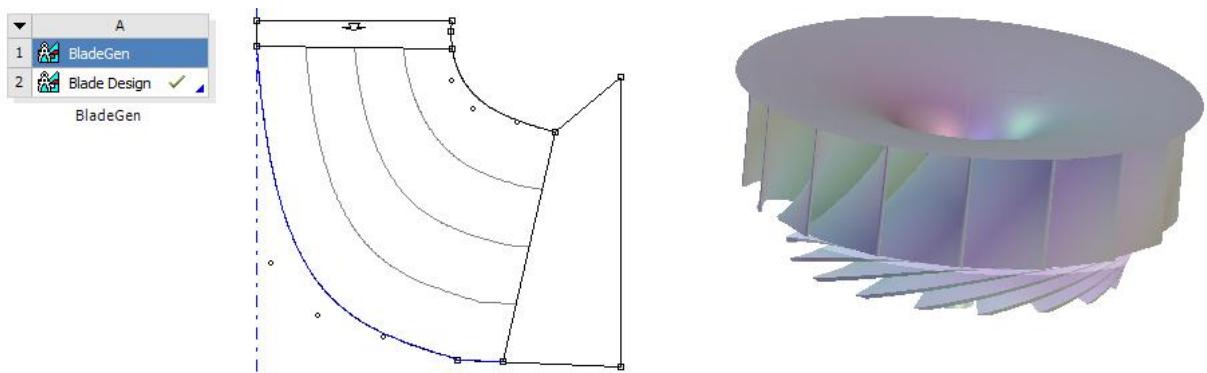


Figura 4.3 – Modelagem no BladeGen®

O BladeGen® interage diretamente com os módulos TurboGrid® para discretização dos domínios e Static Structural® para a análise estrutural das pás da turbina analisada.

TurboGrid®

O TurboGrid® é uma ferramenta para obtenção de malhas especificamente de turbomáquinas e apresenta ótima integração com o BladeGen®. A partir dos domínios fluido e estrutural obtidos no BladeGen® é possível discretizar o domínio fluido para posterior utilização em CFD.

No TurboGrid® é possível determinar o número de elementos e nós a serem utilizados, inclusive aumentando a discretização (número de elementos) nas regiões de maior complexidade geométrica.

O *software* comprehende automaticamente quais são as regiões de entrada, escoamento e saída de fluido e também a região que representa o domínio estrutural, ou seja, a pá física. A figura 4.4 ilustra a malha no TurboGrid®.

Inicialmente, as funções de geração da malha ficam suspensas e após importação da geometria e dos volumes corretamente, o usuário deve permitir a geração da malha determinando grau de discretização e tolerâncias de erros na malha. Também permite avaliação gráfica 3D em tempo real.

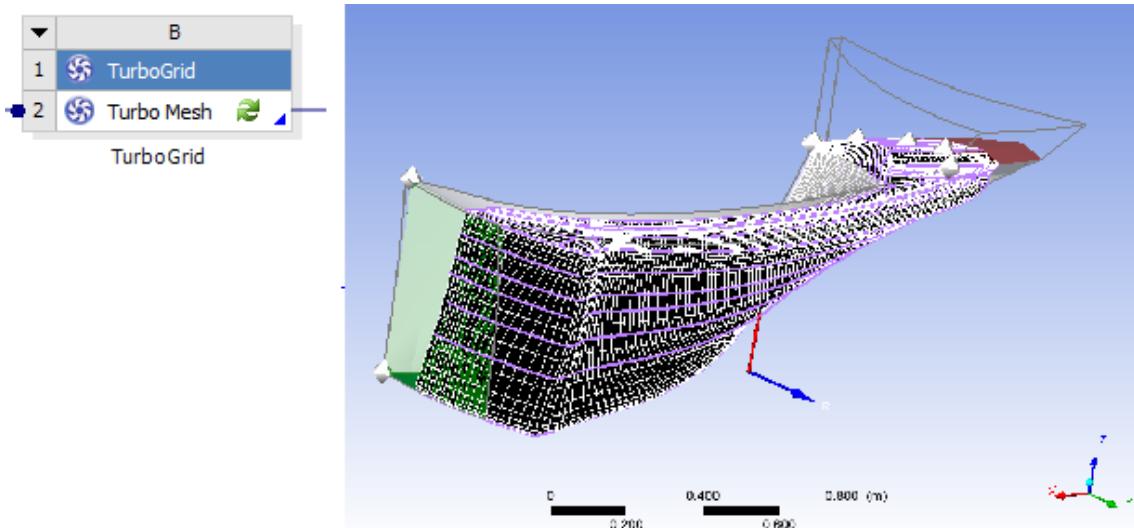


Figura 4.4 - TurboGrid® Domínio Fluido ao redor da Pá

Caso a geometria não permita uma malha coerente para prosseguir com o CFD, com problemas nos ângulos de entrada e saída de fluido, por exemplo, o programa aborta e não permite prosseguir no processo. Tratam-se de pontos dentro do domínio definido para otimização, porém, pontos que não geram geometrias factíveis conforme o TurboGrid®.

CFX®

O CFX® é um dos módulos largamente utilizados do ANSYS® para quaisquer problemas que envolvam domínio fluido. É uma ferramenta computacional muito poderosa e permite encontrar impressionantemente rápido soluções para os problemas com fluidos como ar e água (já no banco de dados do próprio ANSYS®).

É possível simular diversos tipos de modelos, cálculos de turbulência, condições de contorno, interação entre domínios fluidos, sólidos e porosos. Divide-se, assim como a maior parte dos *softwares* comerciais de dinâmica fluida computacional em três partes: *Pre*, *Solver* e *Post*.

No CFX-Pre®, estabelecem-se as entradas para os cálculos. Primeiramente, deve ser importada a malha gerada para o domínio fluido no TurboGrid® ou em outro *software*, como por exemplo, o Hypermesh® da Altair®. Dado o domínio discretizado, o CFX-Pre identifica as regiões determinadas, como região de entrada de fluido, saída de fluido, região da

“lâmina”, ou seja, a pá e também as interfaces do volume de controle atual para o das pás imediatamente adjacentes.

O *software* pode ser visto na figura 4.5, nota-se que também mostra em tempo real para usuário quais superfícies estão sendo utilizadas para análise, permitindo confirmação visual das regiões a serem tratadas.

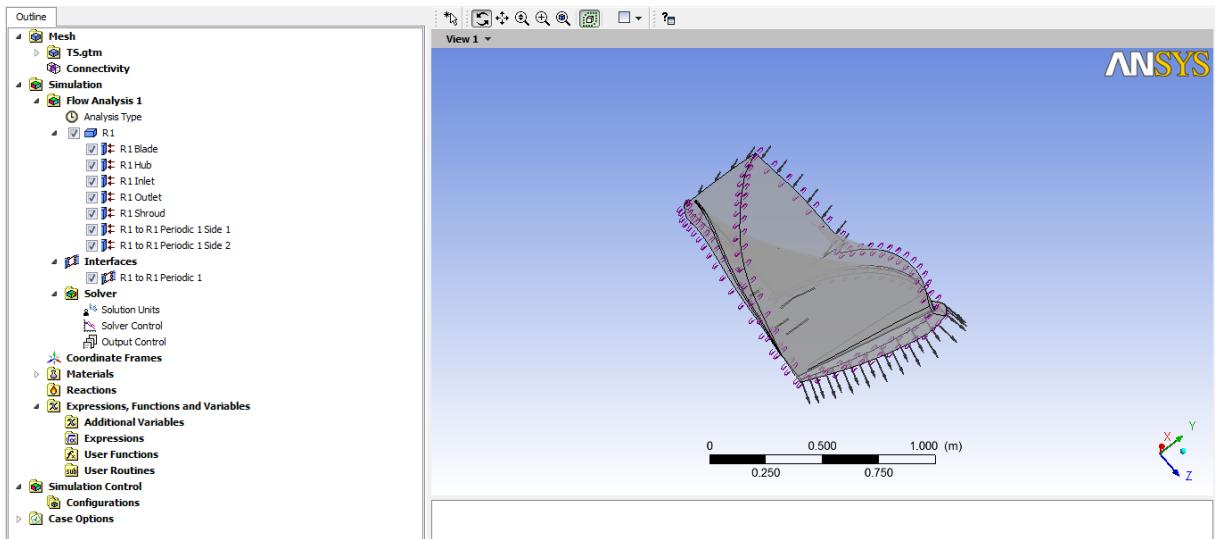


Figura 4.5 – CFX-Pre®

Dada as regiões de contorno, basta então estabelecer qual o tipo de análise em regime permanente (de operação), neste caso, o domínio sofre revolução em torno do eixo Z, através da aplicação de pressão na região de entrada, e a transformação da energia de pressão em energia cinética, com a pressão de saída num valor mais baixo. Simplificando a análise, considerou-se a saída com pressão de 1 atmosfera. Entretanto, não é raro que em regiões de saída de turbinas a pressão atinja valores inferiores a da atmosfera (valores de pressão relativa negativos) que possam prejudicar a operação da turbina ou até aumentar a taxa de desgaste da estrutura.

Após as definições das condições de contorno, é preciso configurar a resolução do problema, ou seja, como o *software* realizará os cálculos e quais são as variáveis a serem obtidas após solução. É possível escolher desde a pressão absoluta em cada nó, até velocidade de escoamento, forças, torques e dependendo do tipo de análise até mesmo deslocamento relativo entre malhas como foi realizado por Silva (2011) para análise FSI.

Para este trabalho, entretanto, optou-se por utilizar a análise FSI no Static Structural®, dado que as variáveis de extração neste módulo são diferentes e por

simplificar a simulação CFD. Entretanto, a maior eficiência do CFD é compensada pela necessidade de novos cálculos estruturais no Static Structural®.

Após as definições do CFX-Pre®, partimos para o CFX-Solver®. Trata-se do *solver* matemático do CFX®, dada a modelagem a ser utilizada e as entradas do sistema, obtém-se as saídas do sistema. Basta rodar a simulação e esperar para convergência até 10^{-4} de variação entre resultados iterativos para momentos e turbulência.

O CFX-Solve® permite também configurar a execução da solução, definindo a prioridade de seu processamento em relação aos demais processos em andamento no Sistema Operacional, quantidade de processadores utilizados paralelamente e a memória do computador a ser utilizada.

Após convergência o *solver* é finalizado e cria arquivos de relatório dos resultados da simulação numérica do comportamento do fluido, a convergência e execução podem ser vistas na figura 4.6. Entretanto, não os apresenta ao usuário diretamente, é preciso interpretá-los e representá-los graficamente, para isso utilizamos o CFX-Post®.

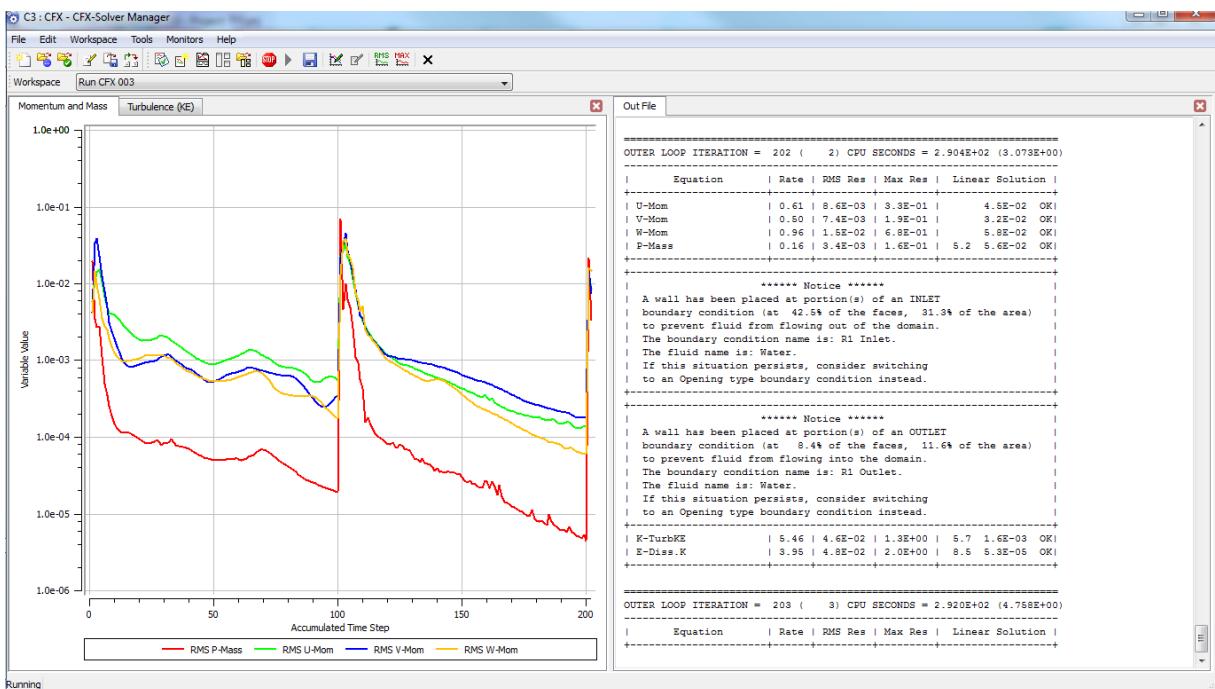


Figura 4.6 – CFX-solve®

O CFX-Post® dá sequência ao CFX-Solve®. No CFX-Post®, o usuário após carregar os resultados da simulação numérica pode escolher visualizá-los

em diagramas conforme sua preferência. É possível apresentar os resultados em formas de tabelas, gráficos bidimensionais e tridimensionais, campos vetoriais, curvas de nível de acordo com necessidade do usuário e da variável a ser descrita.

O CFX-Post® apresenta ainda vários *templates* de resultados, ou seja, modelos de resultados para reporte já prontos dependendo do tipo de problema analisado. Convenientemente, há um para turbinas radiais, é possível verificar nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9 alguns exemplos do reporte.

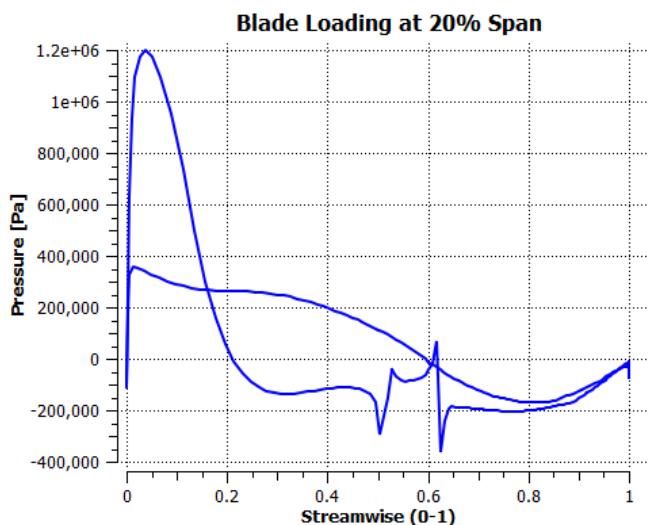


Figura 4.7 – CFX-Post® Reporte I

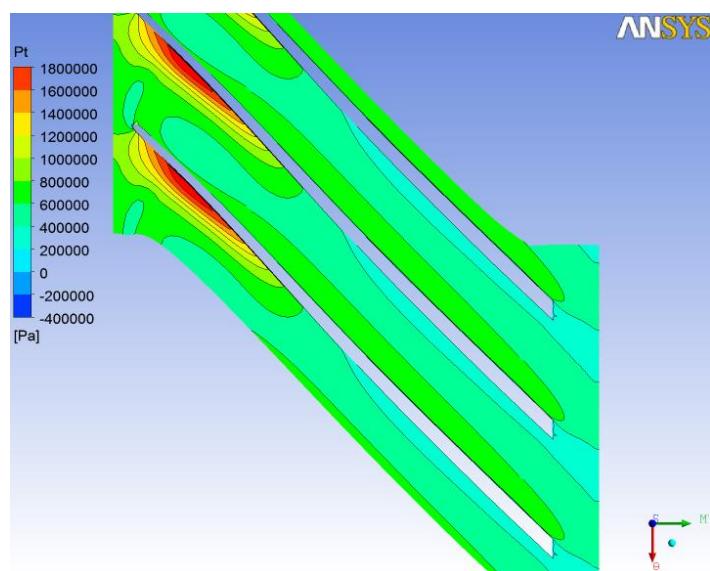


Figura 4.8 - CFX-Post® Reporte II

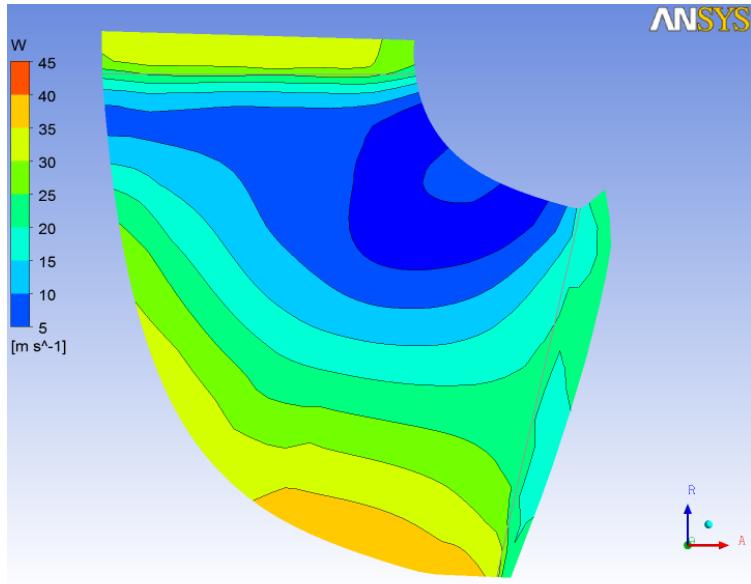


Figura 4.9 - CFX-Post® Reporte III

É importante ressaltar que, na prática, não seria necessário verificar o CFX-Post® ou mesmo executá-lo, com os fins de otimização. Entretanto, para observação e compreensão dos resultados é interessante que haja o reporte de cada iteração, implicando em um custo computacional mais alto de cada iteração.

A ausência do reporte nas primeiras simulações dificultava bastante a compreensão das saídas do CFX®. Assim, resolveu-se utilizar do custo computacional extra para poder verificar em casos de problema qual o resultado da iteração e caso houvesse problema, em qual região da pá ou qual foi a alteração de parâmetro que originou algum erro. Ainda, a pós-análise é interessante dada a solução da otimização.

Como já citado, o CFX® foi utilizado para cálculos de carregamento fluido sobre a pá, mas não executou a interação FSI. Para tal, é preciso transferir o carregamento para o Static Structural®.

Inicialmente, o autor tentou utilizar o BladeGen® diretamente com o Static Structural® para transferência da geometria. Entretanto, não era possível. Verificou-se posteriormente que para a transferência ocorrer coerentemente e sem erros, é necessário transferir somente o domínio sólido da pá para o Static Structural®.

O BladeGen® como já citado é capaz de gerar somente a geometria sólida se especificado ou então exportar somente a geometria sólida. Desta maneira, é

possível integrar com o Static Structural® diretamente, sem exigir utilização de macros adicionais ou de *softwares* à parte.

Static Structural®

O Static Structural® é um módulo de uso bastante comum do ANSYS. É possível realizar a simulação estrutural no caso estático. Em geral, o comportamento das estruturas mecânicas no caso estático sempre é verificado. Neste caso, todavia, o Static Structural® não representa exatamente a análise estática. Importa-se um carregamento dinâmico fluido sobre a pá estrutural, de modo a simular o caso de operação da turbina.

Para o Static Structural®, importa-se o domínio estrutural da turbina e o carregamento CFD. Verifica-se então a interação entre o fluido e a estrutura (FSI) e os resultados são apresentados.

O Static Structural® envolve 6 módulos diferentes do ANSYS®: Engineering Data, Geometry, Model, Setup, Solution e Results. Cada módulo será descrito a seguir.

Engineering Data é o módulo no qual há informações referentes aos dados a serem utilizados nas simulações, por exemplo, propriedades de diversos materiais para os casos de estruturas e de vários fluidos padrões (ar e água) para análises CFD. Neste caso, determina-se qual o tipo de material, por exemplo, aço estrutural contendo módulo de elasticidade e densidade.

Geometry é o módulo que trata de quaisquer tipos de geometria no ANSYS®, ele chama o Design Modeller quando necessário para modificar as geometrias ou criar novas. Neste caso, utilizou-se o Geometry para importar a geometria da pá da turbina. Vale ressaltar que não deve ser importada a geometria da região fluida em conjunto, caso contrário não é possível mapear o carregamento fluido corretamente na pá. O Geometry pode ser visto na figura 4.10.

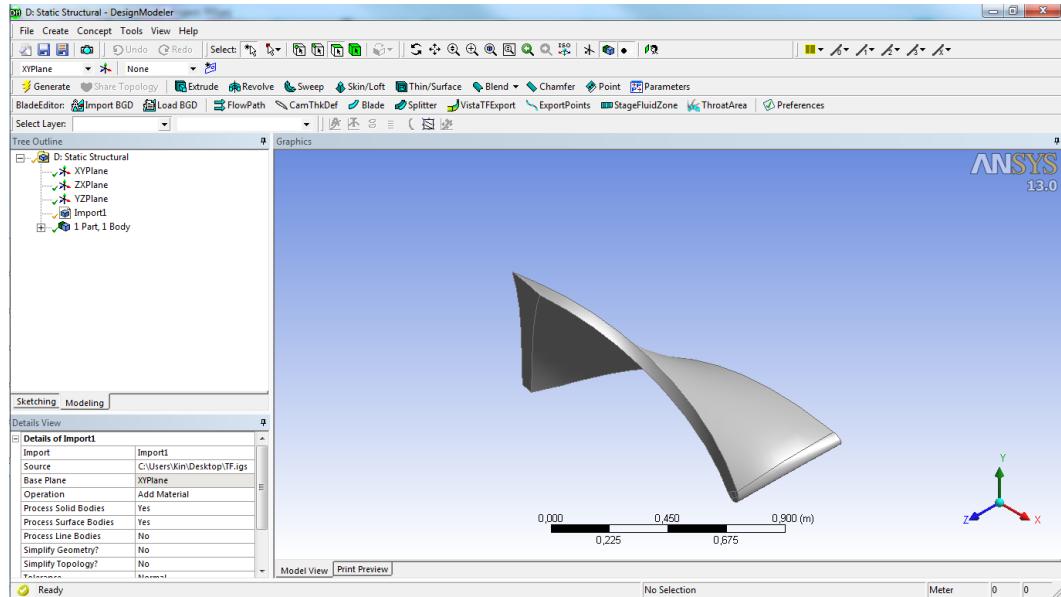


Figura 4.10- Geometry Pá da turbina

Model, Setup, Solution e Results são apresentados na mesma janela e são mostrados na figura 4.11. Model executa a discretização em uma malha de elementos finitos da geometria a ser tratada, importando-a do Geometry. É possível controlar diversos parâmetros, porém é bastante eficiente em modo automatizado.

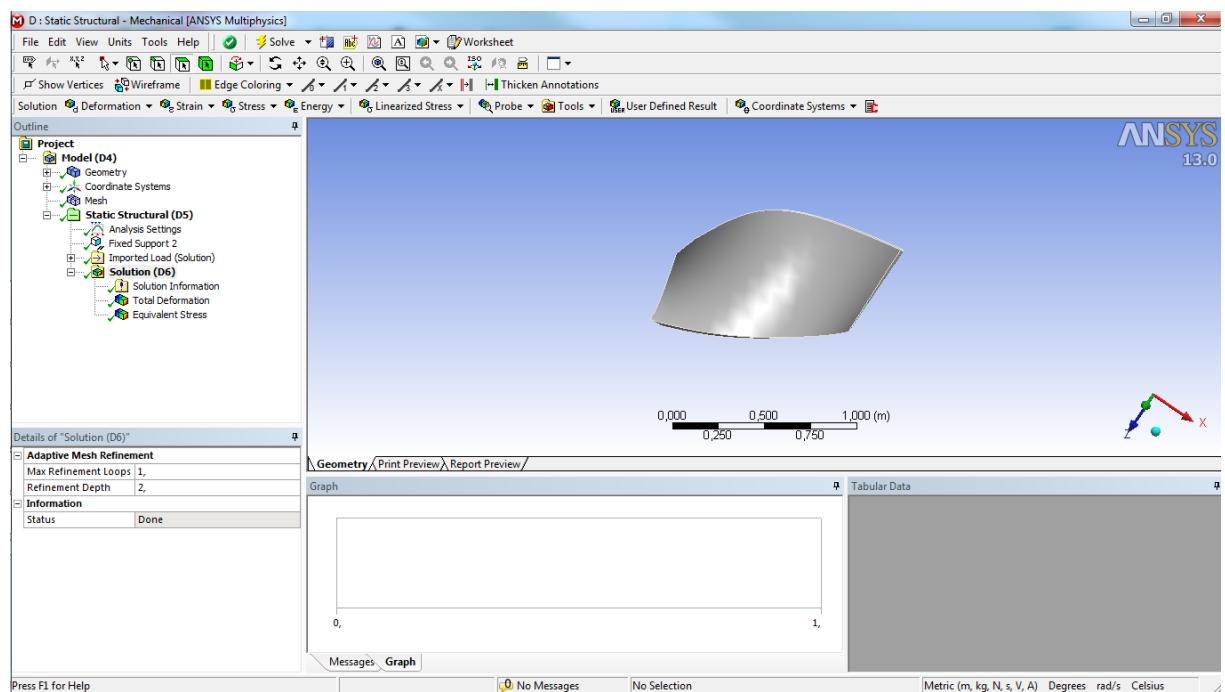


Figura 4.11 – Static Structural® Pá da turbina

Setup define quais são os carregamentos aplicados e condições de contorno, como onde há engastamento, por exemplo, e é nesta etapa que é

importado o carregamento fluido, há também escolha dos parâmetros de simulação como número de passos e tempo de análise. É importante ressaltar que nesta etapa, a importação da carga verifica o mapeamento de nós entre CFD e MEF, o ideal seria 100% dos nós correspondentes. Entretanto, normalmente mais que 90% é o suficiente, com os demais nós sendo alocados para regiões próximas a eles.

Solution define quais são as saídas da simulação como tensão, deslocamento e tempo de vida útil à fadiga. Entretanto, somente em Results que é possível visualizar os resultados, na geometria tridimensional da pá com variação de cor em cada nó, ilustrando a variação também da variável analisada. Para este trabalho, optou-se por extrair primariamente a deslocamento total. Procura-se o máximo desta deslocamento no próprio Results e esta é definida como um dos parâmetros de saída da análise no ANSYS, e entrada para o ModeFrontier® que realizará a Otimização. Pode-se ver a visualização de resultado na figura 4.12.

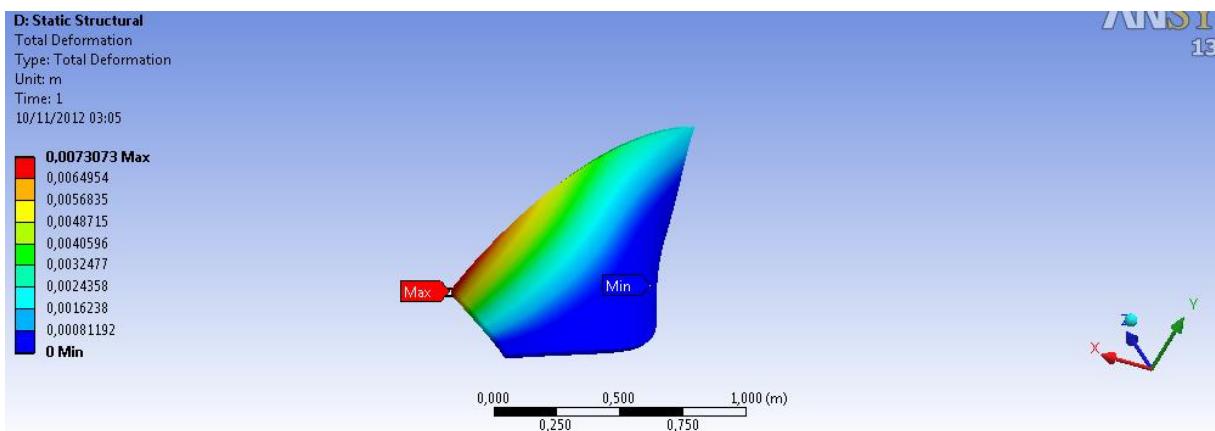


Figura 4.12 – Resultado Static Structural para deslocamentos da Pá

4.3 ModeFrontier®

O ModeFrontier® é um *software* para projeto e otimização multi-objetivo e multidisciplinar. Trata-se de um *software* largamente utilizado e consagrado. É muito flexível e permite integração com diversos *softwares* CAD e CAE de engenharia, inclusive com o ANSYS Workbench® que é o utilizado para simulação da turbina. Considerou-se também a utilização do HEED MDO®, porém o autor não tinha acesso e assim, escolheu-se o ModeFrontier® como plataforma para otimização paramétrica.

O ModeFrontier® apresenta uma interface bastante intuitiva e é amigável com o usuário com muitos exemplos difundidos e material de ajuda muito conciso e direto. O *software* apresenta variados tipos de algoritmos para solução de otimização, desde métodos simples até métodos genéricos altamente complexos.

Escolheu-se utilizar o MOGA II (Multi Objective Genetic Algorithm II) para realizar a otimização. Trata-se de um algoritmo genético que encontra a solução ótima para um dado objetivo a partir da simulação da evolução das espécies na natureza. Pertence aos algoritmos numéricos, genéricos e probabilísticos.

Define-se uma população inicial fixa com possíveis “organismos” (conjuntos de variáveis de entrada) candidatos a serem ótimos. Os parâmetros são alterados a partir de mutações, ou seja, modificações aleatórias e também via *crossing-over*, troca de parâmetros entre “organismos”, equivalente às trocas de genes entre células dos pais para a composição da geração filha da Biologia, o grau de ocorrência de *crossing-over* e de mutação depende da implementação do algoritmo, por padrão utiliza-se 50% de chance para cada um e são eventos independentes, ou seja, a ocorrência de um não restringe ou implica a do outro.

Assim como no evolucionismo, a cada geração os melhores “organismos” sobrevivem e os menos adaptados (menos próximos do ótimo) são descartados, o restante dos “organismos” é alterado segundo mutação e *crossing-over* e assim, compõe a próxima geração de “organismos”. Ao final do número de gerações definido na implementação, analisam-se os resultados em torno da função objetivo e de curvas de fronteira Pareto.

A aplicação do algoritmo genético é justificada pela complexidade na relação entre os parâmetros utilizados como entrada na otimização e a deformação máxima da pá. O deslocamento nem sempre ocorre na mesma posição e ainda, como a relação não é simples, intuitiva ou explícita, é complexa utilização de métodos matemáticos com fortes influências de gradientes. A possibilidade de existência de mínimos locais frequentes é certa, assim, utilizar um algoritmo probabilístico eficiente é essencial, no caso, foi escolhido o MOGA II, de funcionamento já comprovado com trabalhos de autores anteriores como em Silva (2011). Num problema como este um método de gradiente como o método de Newton-Raphson costuma não ser suficiente dependendo de valores escolhidos para convergência.

É possível durante e após a simulação verificar cada iteração, inclusive com entradas e saídas de cada “nó” (pode ser uma variável de entrada ou saída, um *software* a ser executado, um *script*, o objetivo e arquivos gerados ou modificados), existência ou não de erros e o sequenciamento das operações, facilitando encontrar onde ocorreu o problema na simulação caso tenha havido erro.

O conjunto e sequência de execução dos nós determina o *Workflow* do projeto, ou seja, a sequência de ações que o ModeFrontier® irá executar para chegar ao ponto ótimo, ao fim da execução. Definem-se variáveis de entradas, módulos externos a serem utilizados (MATLAB®, ANSYS®, CATIA®, DOS®), variáveis de saída, objetivos, restrições de domínio, *Scheduler* (que define o tipo de algoritmo a ser utilizado, no caso, o MOGA II) e o DOE (*Design of Experiments*) que define qual o algoritmo utilizado para gerar os valores iniciais do projeto a serem avaliados na otimização, para este trabalho, gera os valores de espessura da pá da turbina e ângulo formado pela pá entre região de entrada e saída. A interface utilizada do ModeFrontier® é apresentada na figura 4.13.

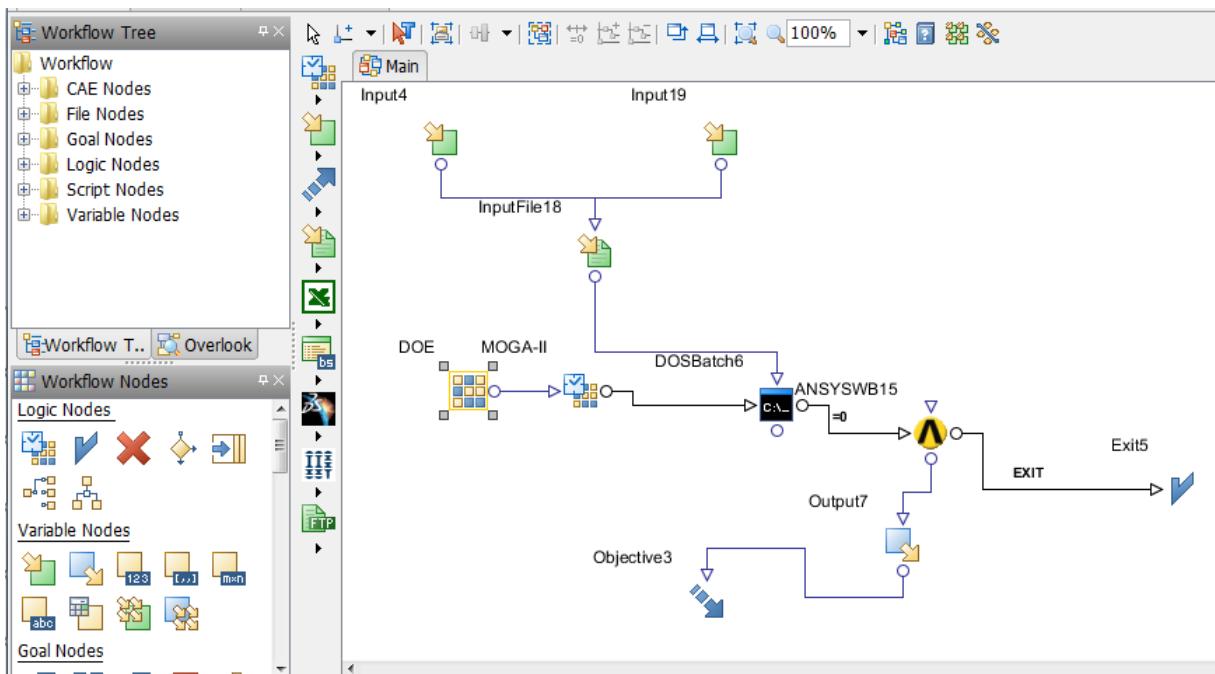


Figura 4.13 – Interface ModeFrontier

A execução é bastante simples no ModeFrontier®, o problema reside em compreender como é possível automatizar o processo de conversão entre ANSYS Workbench® e ModeFrontier®. A integração não é total, há alguns

módulos como o BladeGen® que não são associáveis ao ModeFrontier enquanto outros são facilmente acopláveis.

O ANSYS Workbench® permite a criação de parâmetros em cada *software*, porém, os tipos de parâmetros são pré-definidos. É possível criar novos, mas sua utilização dentro dos módulos não é simples, por exemplo, o BladeGen® não permite os parâmetros escolhidos como espessura e ângulo ou outros parâmetros possíveis, como raios externo e interno da turbina como inicialmente escolhidos pelo autor. A seção seguinte aborda a automatização do processo.

4.4 Automatização do Processo para executar Otimização

A fim de executar a otimização paramétrica é preciso tornar o processo automatizado. Ou seja, não basta executar somente uma iteração, é preciso que o método possibilite a entrada e saída de dados que são parâmetros da otimização que ocorrerá posteriormente, envolvendo número maior de iterações.

Para atingir o objetivo de automatização, pode-se utilizar o ANSYS® em modo de comando. Com o modo de comando é possível abordar os módulos do ANSYS® externamente ao ANSYS Workbench®, inclusive a interação Fluido-Estrutura pode ser automatizada através do modo de comando.

O modo de comando do ANSYS® permite a inserção de definições dos parâmetros de entrada e geração de arquivos de saída dos módulos e, também, as condições de contorno para cada módulo. Desta maneira, é essencial utilizar o modo de comando em algumas etapas.

Para utilizar o modo de comando, há compatibilidade com o MATLAB®, por exemplo. O *software* de otimização a ser utilizado (ModeFrontier®) também permite interação e execução via MATLAB®.

O problema reside no módulo BladeGen® que não utiliza arquivos comuns aos formatos CAD mais convencionais. Para tal, utiliza arquivo do tipo (*.bgi) e não permite a parametrização da geometria como desejável, trabalha com uma transformada de 2D para 3D da pá da turbina. Assim, não é possível parametrizar diretamente a pá.

O autor propôs diversas soluções, a primeira seria tentar a parametrização da pá da turbina através de Mechanical APDL® do próprio ANSYS®,

novamente, a complexidade é muito grande e ficaria muito difícil parametrizar e também definir ponto a ponto a geometria, de maneira similar a algumas etapas, seria também necessário rodar em modo de comando, exigindo o MATLAB® para utilizar em conjunto com o ModeFrontier®.

Outra solução seria utilizar o próprio arquivo concebido pelo BladeGen® em formato *.bgi e realizar todas as iterações via códigos de comando integrando ao MATLAB® que seria chamado pelo ModeFrontier. Esta solução, porém, não leva em conta a necessidade de utilizar todos os módulos em formato de comando. Algo que para o Static Structural não é simples, há necessidade de rodar diversos sub-módulos do ANSYS que não tem 100% das funcionalidades acessíveis a partir de comandos batch simples e exigiria um enorme esforço em desenvolvimento de scripts, em virtude da complexidade da geometria.

Como verificado pelo autor, há a possibilidade de realizar a otimização no HEEDS MDO®, porém também exigiria utilizar o modo de comando para todos os módulos, algo não desejável pelos motivos já citados.

Ainda, restava o problema de parametrização da turbina que não é trivial. Dado o objetivo de estabelecer uma metodologia para obtenção de melhorias nos projetos de turbina, não se justificava grande esforço em estudar a modelagem da geometria da turbina via parâmetros como curvas *splines* e de Bezier para descrever por completo a pá.

Após um grande número de tentativas e modificações na abordagem, compreendeu-se que uma solução ideal seria híbrida. Ou seja, ao invés de utilizar todos os módulos do ANSYS® diretamente pelo ModeFrontier®, separar somente o BladeGen® que apresentava grandes problemas de integração. O BladeGen® apesar de extremamente eficiente para geração da geometria e domínio fluido não permite a parametrização simples de parâmetros que seriam muito úteis como os raios da pá. Para tal, é necessário modelar a primeira vez e então gerar o arquivo *.bgi. Este arquivo após um pouco de interpretação é manipulável e, compreende o mecanismo de geração de geometria.

O arquivo *.bgi gera o domínio de superfícies fluidas e da região da pá. Inicialmente, desejava-se parametrizar os raios interno e externo da pá e também o ângulo de entrada na região de entrada de fluido na turbina. Considerando os problemas com a parametrização destes, optou-se por parâmetros relevantes e de

direto acesso. O arquivo *.bgi gera a geometria a partir de transformações de um modelo 2D para um 3D, sem o acesso às variáveis inicialmente desejadas.

No arquivo *.bgi é possível definir o ângulo formado pela entrada e saída da pá (o ângulo definido pela *Training Edge* e *Leading Edge*) e também a espessura da pá. Simplificando em grande parte o problema, e permitindo ainda uma simulação, com parâmetros que têm influência sobre a pá. A espessura é bastante ligada a rigidez possível da turbina e o ângulo é ligado ao comportamento do fluido no entorno da pá. No item 5 de Resultados será possível verificar as reais relevâncias de cada parâmetro.

A utilização de um arquivo *.bgi (na prática, um arquivo em formato de texto comum como o *.txt) exigiria a possibilidade de leitura automática do arquivo pelo BladeGen® internamente ao ANSYS® quando chamado pelo ModeFrontier®. Como o BladeGen® é de caráter inicial de análise, não há como iniciá-lo diretamente pelo ModeFrontier®, é preciso iniciá-lo fora do processo descrito na figura 4.1.

Não utilizar o BladeGen® internamente à cadeia descrita pela figura 4.1 implica na necessidade de transferência das informações para o TurboGrid® também de maneira automática, mas fora da chamada comum do ANSYS® no ModeFrontier®.

O ModeFrontier® em integração com ANSYS® permite a leitura e o *refresh* de parâmetros já definidos no ANSYS®. É desta maneira que ocorre a integração. Entretanto, como já citado, no BladeGen® os parâmetros não são manipuláveis, somente poucas opções existem, diferentemente de uma geometria em CAD importada com todos os parâmetros sendo possíveis variáveis.

O autor sugere possível trabalho futuro com uma turbina parametrizada, ou com um estudo de maior complexidade de definição de geometria da turbina, que utilize o método direto do ModeFrontier® garantindo eficiência e praticidade superiores.

Diferentemente, o TurboGrid® permite a busca por arquivos externos na chamada executada pelo ModeFrontier® do ANSYS®. Servindo como entrada direta para o processo automatizado no ANSYS®. Optou-se, portanto, pela utilização do BladeGen® externamente ao fluxo principal de operações e o

restante do processo ocorreria automaticamente pela plataforma integrada ANSYS®-ModeFrontier®.

Para tal, é necessário compreender por completo qual a interação do BladeGen® com o TurboGrid® e também com o Static Structural®, para o Static Structural® também há a necessidade de importação de geometria a partir do BladeGen®. Em conformidade com o TurboGrid® é possível também obter automaticamente a atualização da geometria quando dentro da plataforma integrada entre o ANSYS® e o ModeFrontier®.

No caso do TurboGrid®, a importação dos dados ocorre a partir de um arquivo em formato *.inf, este arquivo define o nome e localização de outros três arquivos que descrevem a geometria da pá e do seu volume fluido: hub.curve, shroud.curve e profile.curve. A partir destes três arquivos é possível então construir a malha do TurboGrid®.

O TurboGrid® por sua vez gera um arquivo do tipo *.gtm, descrevendo a malha gerada. Diferentemente de diversos módulos, não é um arquivo texto de fácil compreensão após estudo. É preciso utilizar o *software* para obter as informações. Este arquivo é automaticamente enviado do ANSYS® para o CFX®.

O CFX® apresenta boa automatização entre os submódulos Pre, Solve e Post. O Pre após configuração das condições de contorno e tipo de análise a ser realizada exporta um arquivo *.def facilmente interpretado pelo CFX-Solve®.

Após execução, o *Solver* exporta um arquivo *.out com as saídas da resolução da simulação do comportamento fluido-dinâmico. Este arquivo é importado pelo CFX-Post® e após interpretação pode gerar um relatório em formato de página da web, em imagens *.png e no arquivo *.res que é o real arquivo de resultados apresentado pelo Post. Como já afirmado previamente, o Post não é necessário para a análise do comportamento mecânico-estrutural da turbina, mas é essencial para o *debug* e consultas rápidas das iterações do processo.

O arquivo *.out é transportado automaticamente para o módulo Setup do Static Structural®. Como citado previamente, exige a importação da geometria do domínio sólido da pá. Após a primeira iteração manual, ele consegue realizar a importação automaticamente, simplesmente autorizando a opção “Smart CAD

Update". Entretanto, para a funcionalidade eficiente e correta é preciso também compreendê-lo.

A maneira mais simples de importar a geometria para o Static Structural é realizar a partir do BladeGen® que já será chamado em forma de comandos devido ao TurboGrid®, além de exportar os arquivos *.inf e *.curve também exporte a geometria somente da pá. Trata-se de um arquivo *.igs, largamente utilizado em engenharia para modelos CAD. Entretanto, deve-se tomar cuidado para não exportar do BladeGen® também a geometria do domínio fluido que invalidará a Geometria resultando em erro no ANSYS®, somente o domínio sólido deve ser importado.

É muito importante ressaltar dois detalhes de simulação do processo que são essenciais:

- Unidades de medição: as unidades devem ser compatíveis em todos os módulos do ANSYS® para perfeito funcionamento do processo. É bastante comum por distrações não corrigir as unidades em pelo menos alguma das etapas do processo, dificultando enormemente encontrar os erros após já ter iniciado o processo.
- Sistema de Coordenadas: o sistema de coordenadas utilizado deve ser sempre o mesmo, ou seja, origem, sentido e direção dos eixos devem ser sempre a mesma em todos os módulos para perfeito funcionamento. Mais uma vez, é comum por distração não corrigir em pelo menos uma das etapas, acarretando em resultados errôneos, não interpretáveis, e sem causa aparente.

Apesar destes dois detalhes sempre básicos em qualquer problema matemático e de engenharia, ao executar em *software* nem sempre são aparentes e exigem atenção do usuário e hábito de corrigir sempre.

O Static Structural® automaticamente irá importar o modelo geométrico em formato *.igs e o carregamento dinâmico fluido em formato *.out, provenientes respectivamente do BladeGen® em modo de comando e do CFX-Solve®. Todo o restante do Static Structural® ocorre de maneira automática, inclusive as definições de restrições mecânicas, como um engastamento em uma das superfícies da pá da turbina.

Após obtenção da geometria via arquivo *.igs originado do BladeGen®, é ativado o Model que executa a discretização em elementos finitos da pá sólida.

Assim, pronta esta etapa, segue-se para o *Setup* da solução que define restrições e carregamentos. O carregamento fluido dinâmico é então importado e mapeado sobre a pá sólida. A análise exige que os nós do domínio dinâmico encontrem seus correspondentes sobre o domínio sólido, pelo menos 90% dos nós deve estar mapeado diretamente para apresentar resultado coerente. Os demais nós são relacionados aos pontos mais próximos na superfície sólida da pá.

Dados os carregamentos e restrições, no *Solution* são definidas as variáveis de saída da simulação para posterior utilização, neste caso, escolheu-se o deslocamento total e a tensão equivalente, para a otimização posterior. Passa-se a ser executada a resolução do problema, encontrando soluções para as exigências do *Setup*. Ressalta-se que o *Solution* executa o *Solver* do Mechanical APDL®.

Em *Results*, são avaliados os resultados interativamente com o usuário. São apresentados modelos 3D da pá com os resultados em gradiente de cores para as variáveis definidas. Neste módulo é possível utilizar alguns dos resultados como parâmetros no ANSYS®, estes parâmetros são do associáveis com o ModeFrontier®, diferentemente do BladeGen®, escolheu-se o Deslocamento Máximo Total como parâmetro de Saída. É possível verificar sob o módulo do Static Structural® quando o ANSYS Workbench® é executado, um módulo intitulado Parameter Set. O deslocamento é obtido pelo ModeFrontier automaticamente.

Com a saída do parâmetro deslocamento máximo total do ANSYS®, é concluída a etapa de automatização explícita no ANSYS®, porém, ainda falta a automatização do BladeGen®, é necessário executá-lo de algum modo para obtenção dos dados de saída para o TurboGrid® e para o Static Structural®. Novamente, cogita-se a utilização do MATLAB®.

Para o autor, o ambiente do MATLAB® é familiar, porém para efeitos práticos significaria investimento em um terceiro *software* comercial, não justificando sua aplicação. Segue-se então por abordagem diferente, através de *scripts*. O ModeFrontier® é associável a JavaScript, a Python dentre outros. Entretanto, são complicações extremamente desnecessárias.

O ModeFrontier® é capaz de interagir diretamente com *scripts* em DOS, bastante comuns em versões antigas do Windows®, os *scripts* em DOS também conhecidos como arquivos *.bat (batch) são de fácil utilização. São muito mais

simples que a utilização do MATLAB® e de linguagens de programação e o autor também apresenta familiaridade.

Basta, portanto, utilizar o BladeGen® através de modo de comando (*batch*) dentro de um dos nós do próprio ModeFrontier®. A partir da execução, há leitura do arquivo *.bgi como já citado e exportação dos arquivos *.igs, *.inf e *.curve. Lembra-se que o TurboGrid® e o Static Structural® fazem o *update* dos arquivos de entrada automaticamente, não exigindo novos *scripts*, somente a chamada comum do ANSYS® internamente ao ModeFrontier®.

A maior parte do problema agora já está automatizada, já é possível realizar por completo o processo do ANSYS® automaticamente, inclusive obtendo a variável de saída para o ModeFrontier® minimizar, neste caso, optou-se por minimizar o deslocamento máximo total.

É necessário somente abordar a automatização da geração do arquivo *.bgi que é a real entrada para o processo, dadas as duas variáveis de entrada *wrap angle* e espessura (*thickness*).

O ModeFrontier® é capaz de a partir de um arquivo gerar versões novas deste modificadas propositalmente e coerentemente com o projeto. Ou seja, propôs-se modificar o arquivo *.bgi gerado inicialmente, para uma turbina “padrão” com geometria próxima a do modelo da turbina de Jaguari idealizado. Basta utilizar um nó no ModeFrontier® de arquivo de entrada (*input file*) e ligá-lo no *Workflow* às variáveis de entrada. O arquivo modificado criado pelo ModeFrontier® aparece para o processo como uma variável de entrada e é possível utilizá-lo diretamente com o *script batch* do DOS, para execução do BladeGen® em modo de comando (ou modo *batch* através do BladeBatch®).

Após a execução do *script* em DOS, os arquivos de entrada necessários para o processamento do ANSYS® isoladamente estão prontos, então, saindo do DOS *script*, basta seguir ao nó do ANSYS® interno ao ModeFrontier®. O ModeFrontier® executará o ANSYS® automaticamente realizando todas as etapas já descritas: discretização e cálculo CFD, discretização e cálculo MEF (via interação fluido-estrutura) e exportação de dados (deslocamento total máximo) para o próprio ModeFrontier®.

O parâmetro obtido a partir das simulações do ANSYS® é armazenado em uma variável de saída do ModeFrontier® e segue então para um nó “*Objective*”, ou seja, objetivo no qual há a opção de maximizar, minimizar e

inserir cálculos caso seja necessário. Para o parâmetro deslocamento total, não é necessário nenhum cálculo, basta utilizar a própria variável.

O *Scheduler* e o DOE já foram descritos no item referente ao ModeFrontier®. Assim, completa-se o *Workflow* do ModeFrontier®. Resumindo, temos as variáveis de entradas sendo substituídas no arquivo *.bgi padrão. Por *script DOS* criam-se arquivos de entrada para execução do ANSYS®. O ANSYS® executa a simulação automaticamente, exportando variável de saída que é armazenada e então minimizada. A figura 4.14 apresenta o *Workflow*.

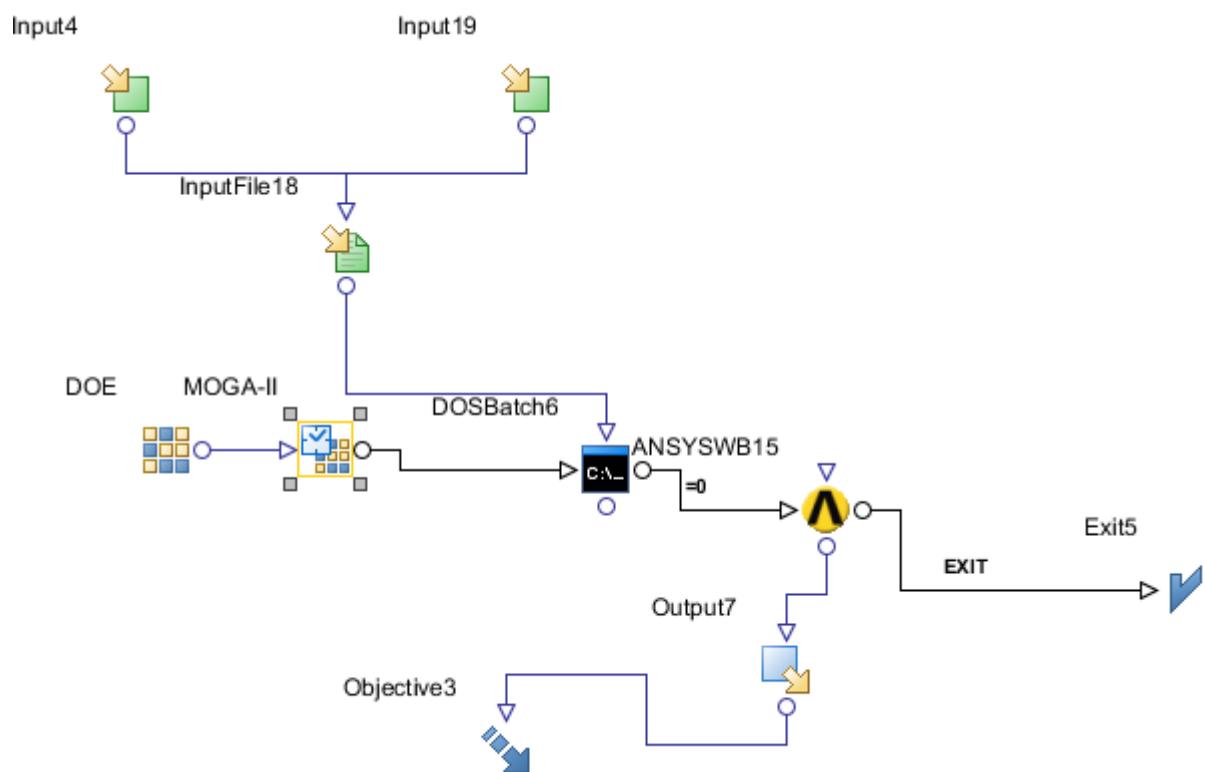


Figura 4.14 – Workflow do ModeFrontier®

Input4 e Input19 são espessura e *wrap angle*, variáveis de entrada para o processo. InputFile18 é o nó de arquivo de entrada (o arquivo *.bgi). Através de DOE e MOGA-II é executado o DOSBatch6 (*script batch* em DOS), sem arquivos ou variáveis de saída, seguindo diretamente para execução do processo no ANSYS®. A saída é Output7, ou seja, o deslocamento máximo total que segue para o nó Objective3 de objetivo do problema e então o laço de iteração é encerrado e reiniciado pelo *Scheduler*.

Por fim, apresenta-se o fluxograma total do processo na figura 4.15, o processo está automatizado por completo. Inicialmente, geram-se as variáveis de

entrada que, por sua vez, geram a geometria da pá da turbina. Seguem-se as análises de CFD e MEF com geração de malhas e interação FSI, os resultados de deslocamento são variáveis de saída enviadas para o otimizador que gera novas entradas para o processo.

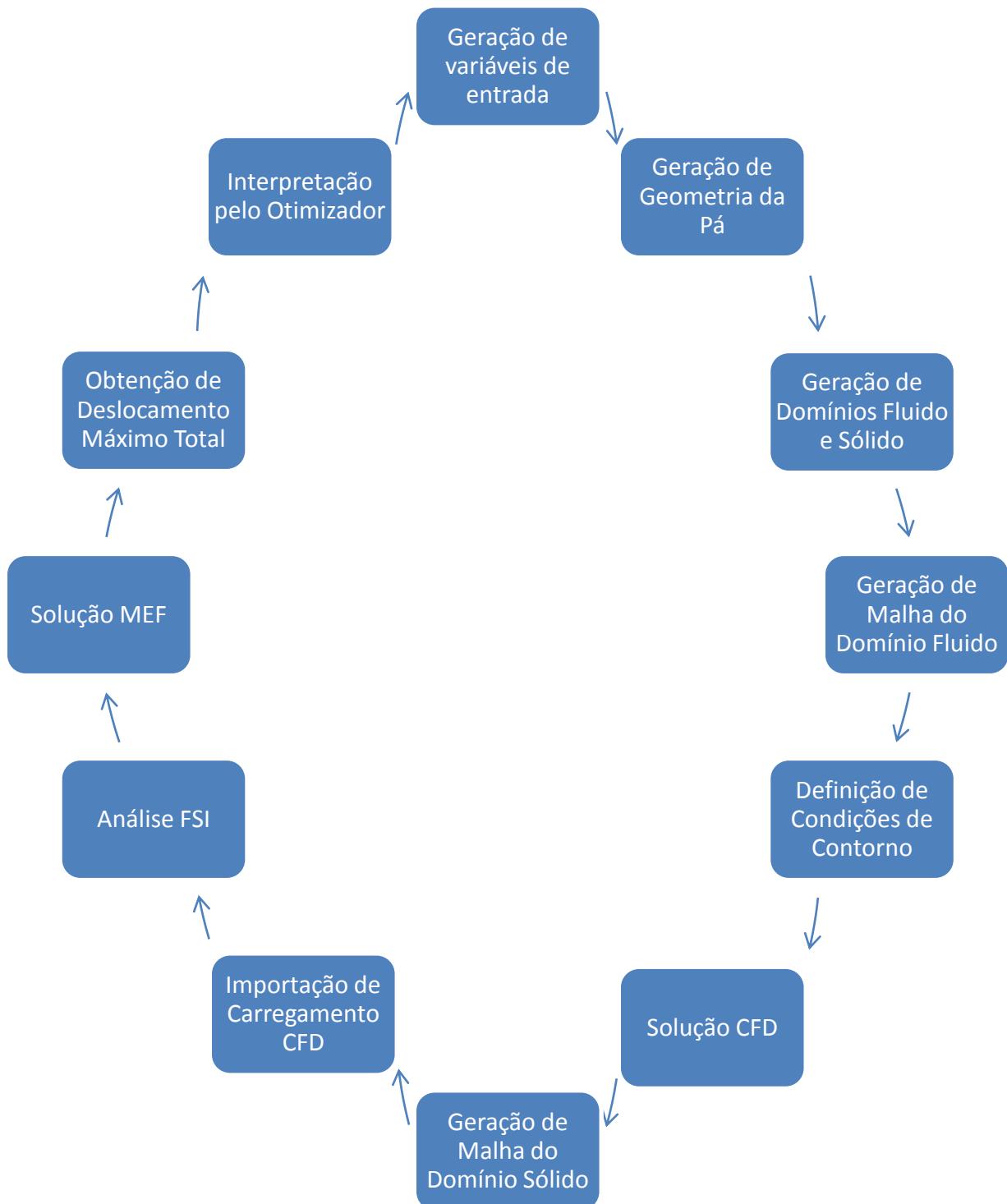


Figura 4.15 – Fluxograma do Processo Automatizado

4.5 Iteração inicial (Ponto de partida)

Como já visto, é preciso realizar uma iteração inicial definindo as condições de contorno do problema e também a geometria inicial das pás da turbina a ser otimizada. Para tal, basta executar um fluxo de processo no ANSYS® verificado na figura 4.16.

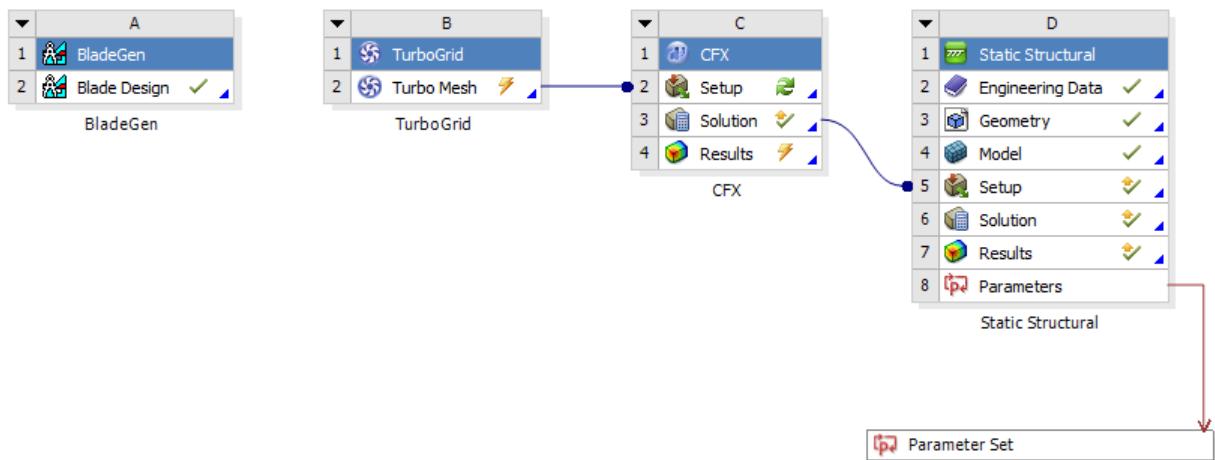


Figura 4.16 – Workflow do ANSYS®

No fluxo, vemos cada um dos módulos já descritos. Note que o BladeGen® não está acoplado, pois na simulação real também não estará, apesar de ser possível acoplá-lo para o caso de iteração única. Cria-se uma pá padrão do BladeGen® e então, modifica-se manualmente ponto a ponto a fim de criar uma geometria desejada. O BladeGen® apresenta quatro telas quando em modo de edição: a pá 2D, cortes da pá em altura que pode ser escolhida, relação de teta conforme caminho virtual da *Leading Edge* à *Trailing Edge*, a mesma relação para a espessura, no caso, uniforme e é possível também visualizar outras opções, por exemplo, um modelo tridimensional da turbina completa. É possível verificar tais telas nas figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21.

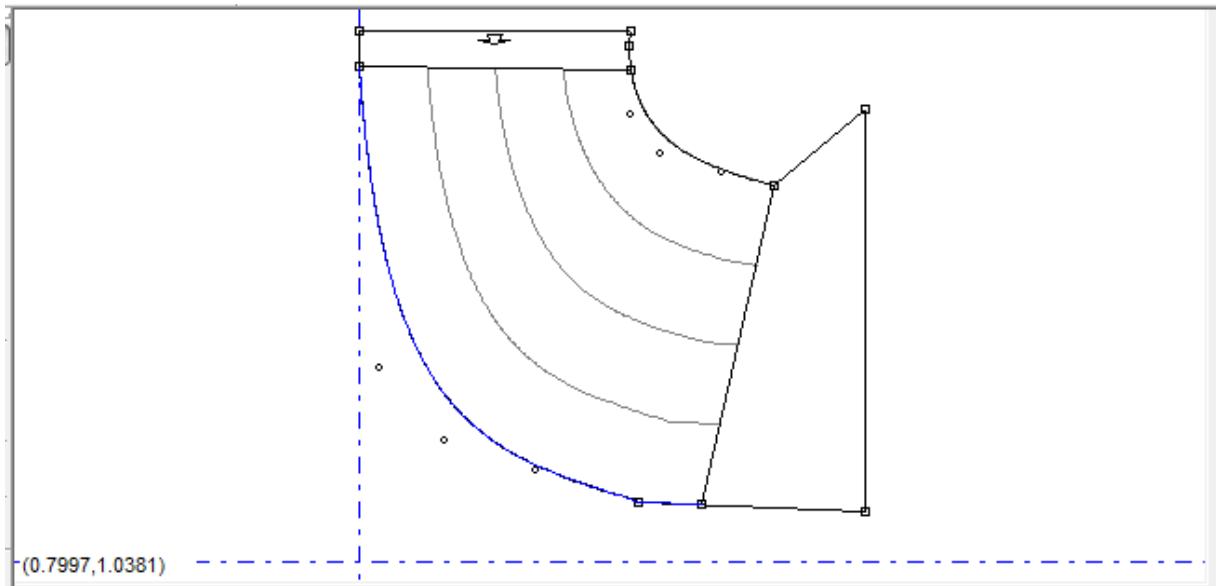


Figura 4.17 – Pá em 2D com pontos de controle

A turbina apresenta 1,0173m de raio e 0,85923m de altura.

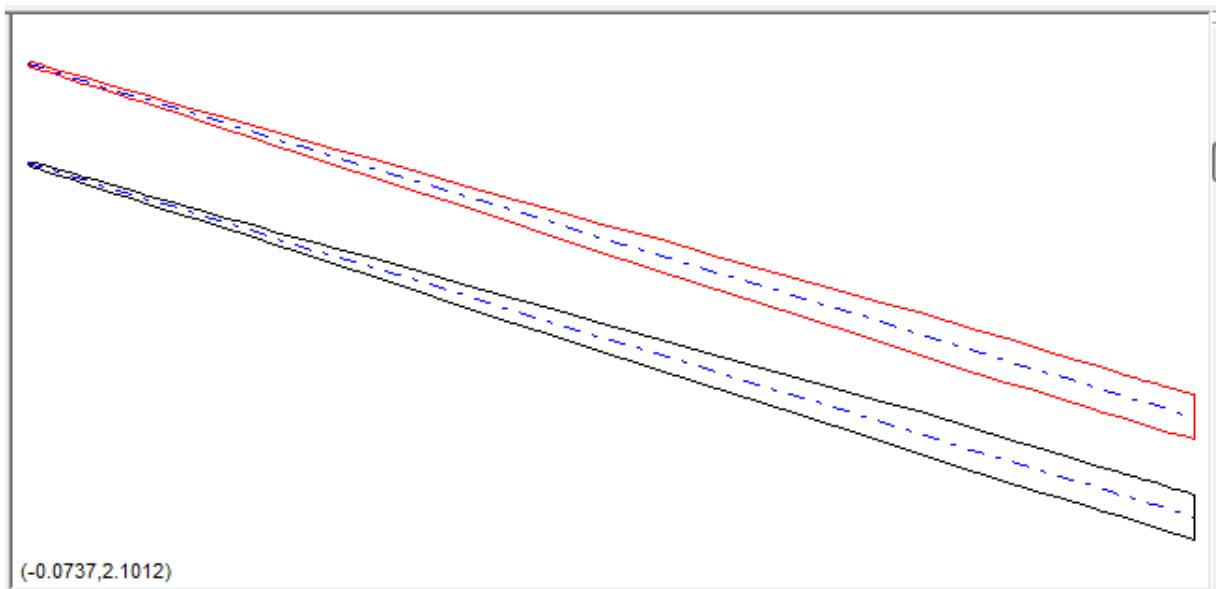


Figura 4.18 – Corte na altura da base da pá

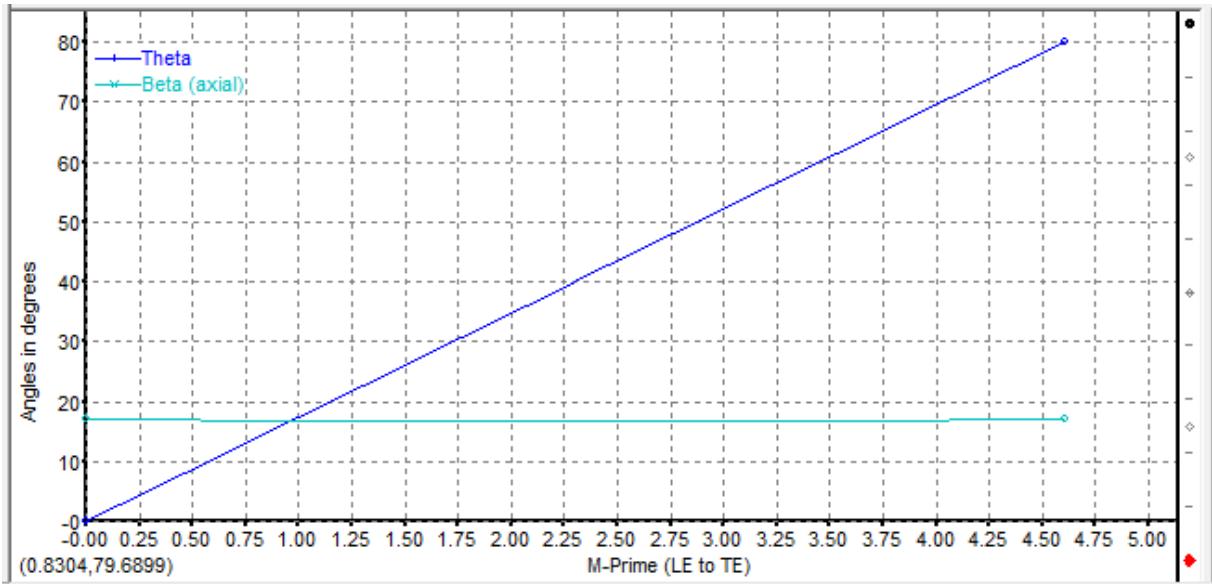


Figura 4.19 – Variação de ângulo Teta (*wrap angle*) até o máximo

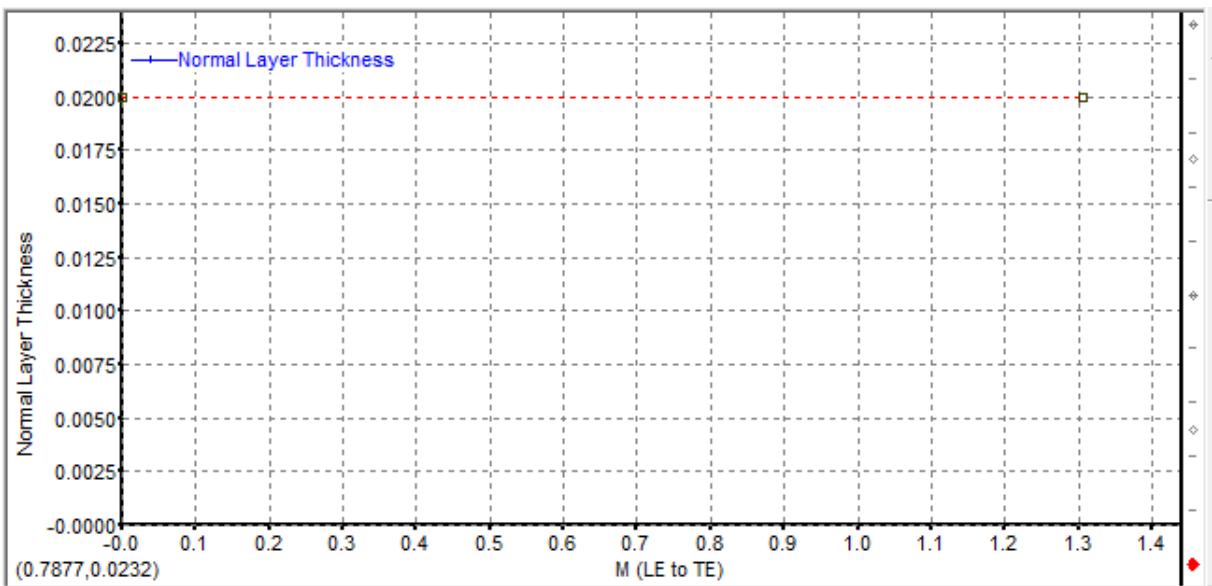


Figura 4.20 – Espessura da pá

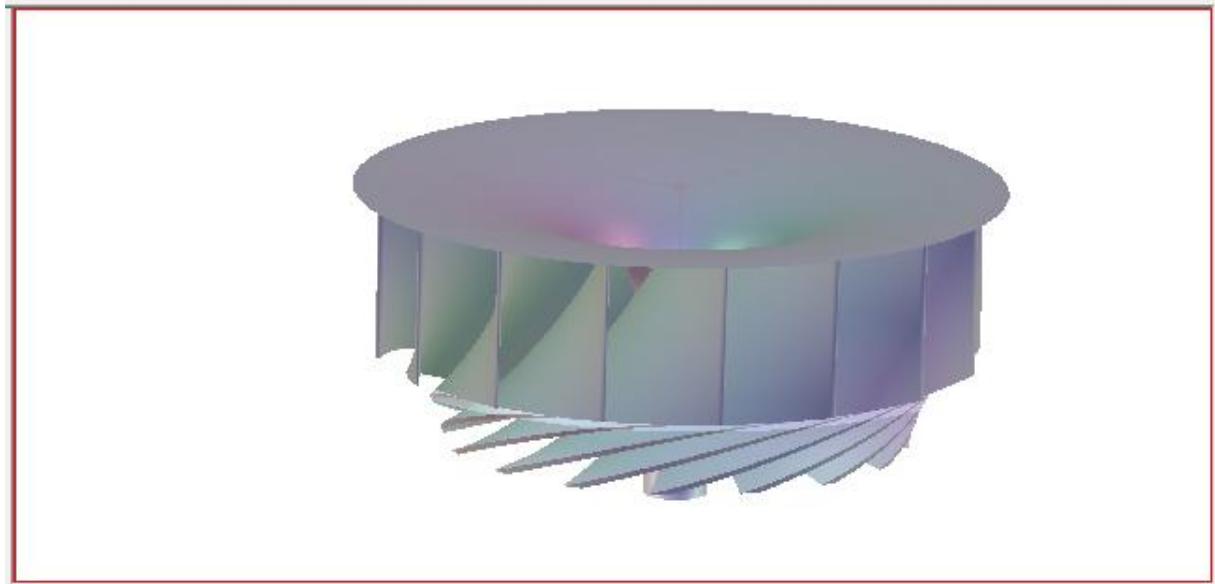


Figura 4.21 – Modelo 3D da turbina (16 pá)

Prossegue-se agora para execução do TurboGrid®. Inicia-se com a importação da geometria através do arquivo *.inf na figura 4.22.

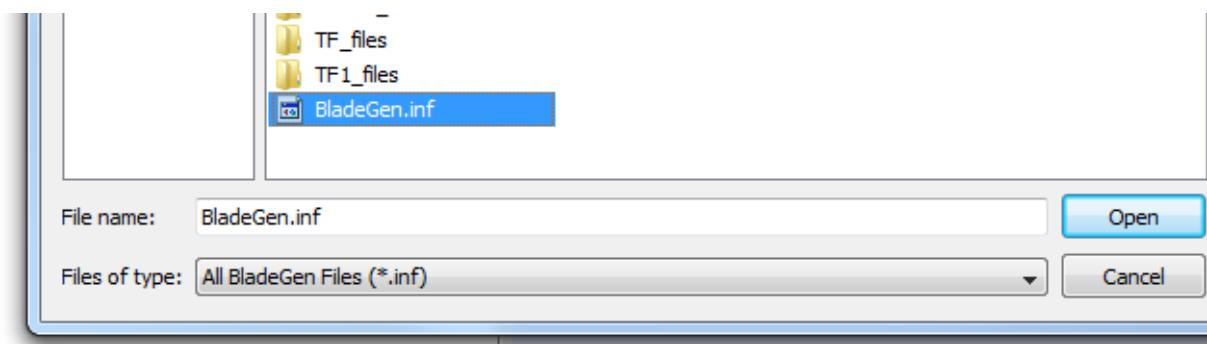


Figura 4.22 – Importação manual de *.inf

A malha passa a ser gerada e então é apresentada a pá com o domínio fluido discretizado e a pá como nas figuras 4.23 e 4.24.

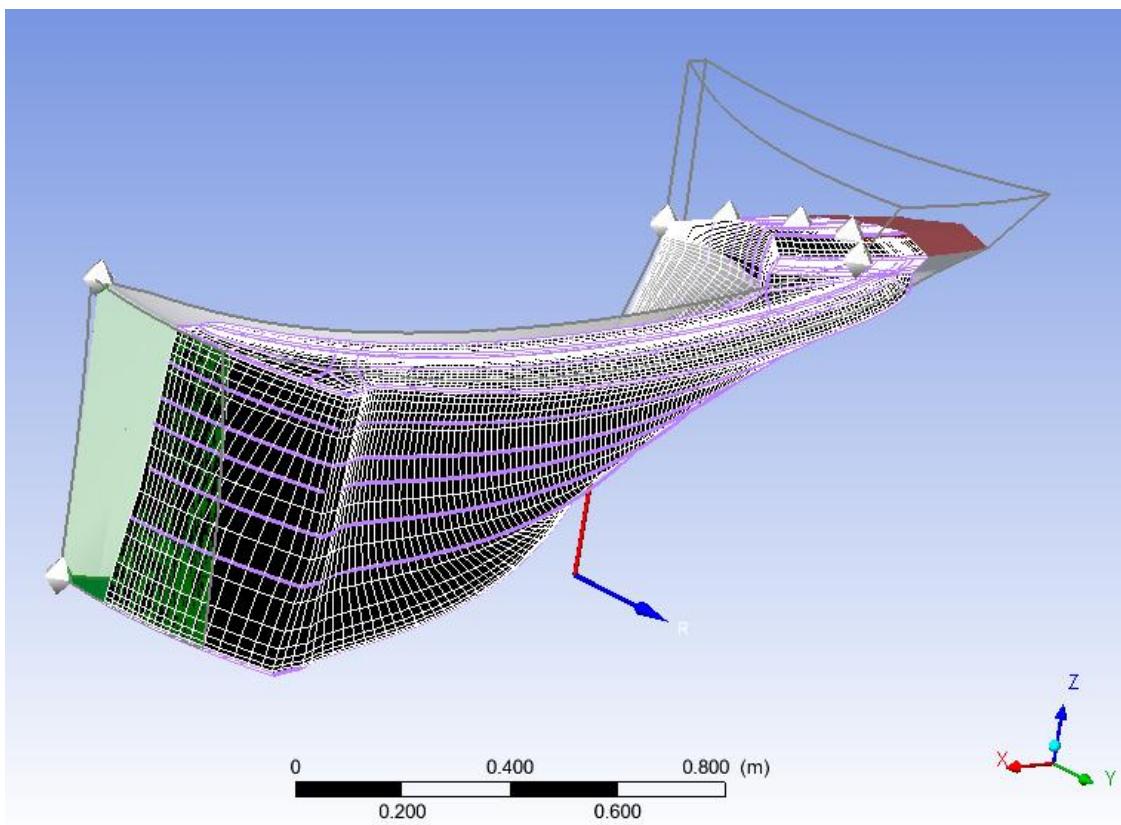


Figura 4.23 – Discretização do Domínio Fluido em torno da Pá

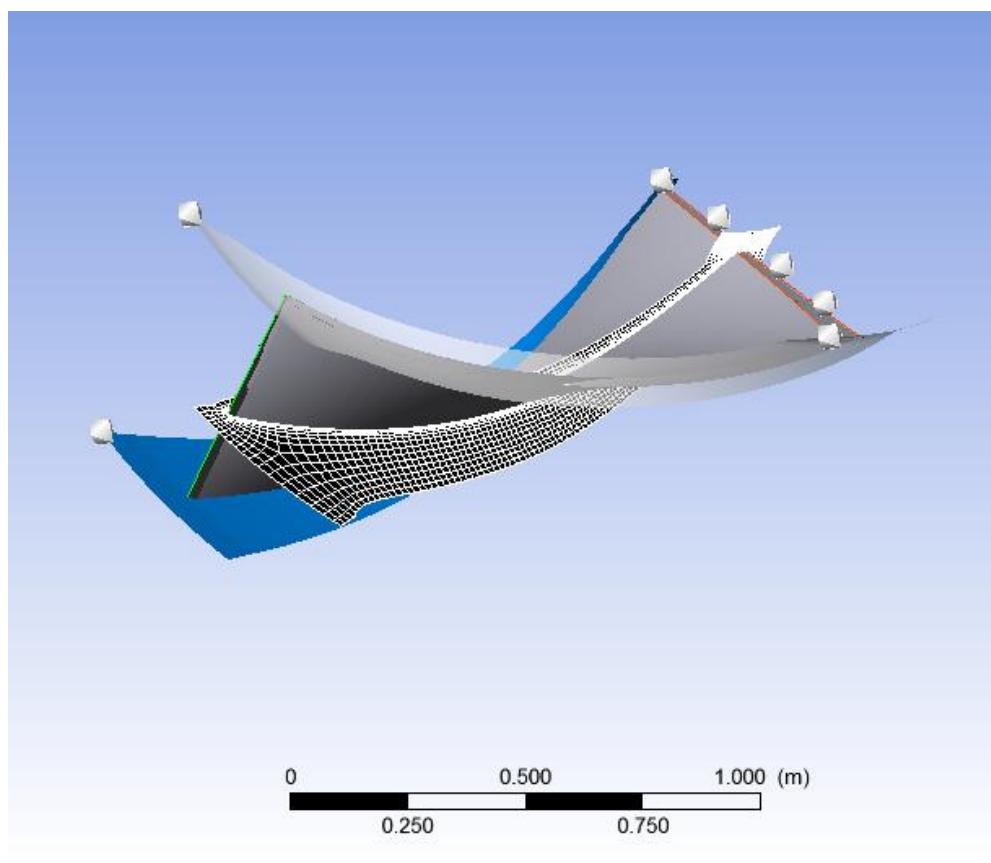


Figura 4.24 – Somente a Pá no TurboGrid®

Assim, parte-se para o CFX-Pre®, colocando as condições iniciais e de contorno para o problema e importando o arquivo *.gtm criado pelo TurboGrid®, como é possível ver nas figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28.

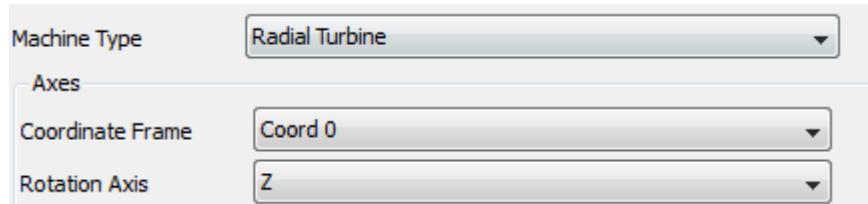


Figura 4.25 – Definição do tipo de máquina

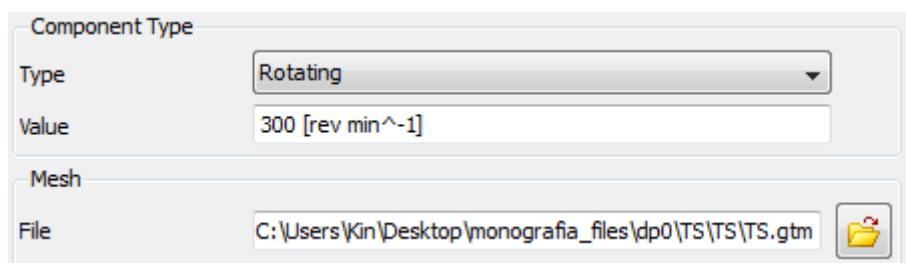


Figura 4.26 – Rotação de 300 rpm e importação manual de *.gtm

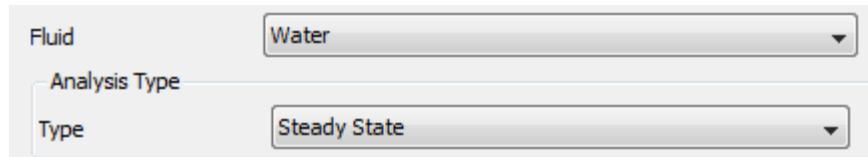


Figura 4.27 – Definição de Fluido e Regime Permanente (operação)

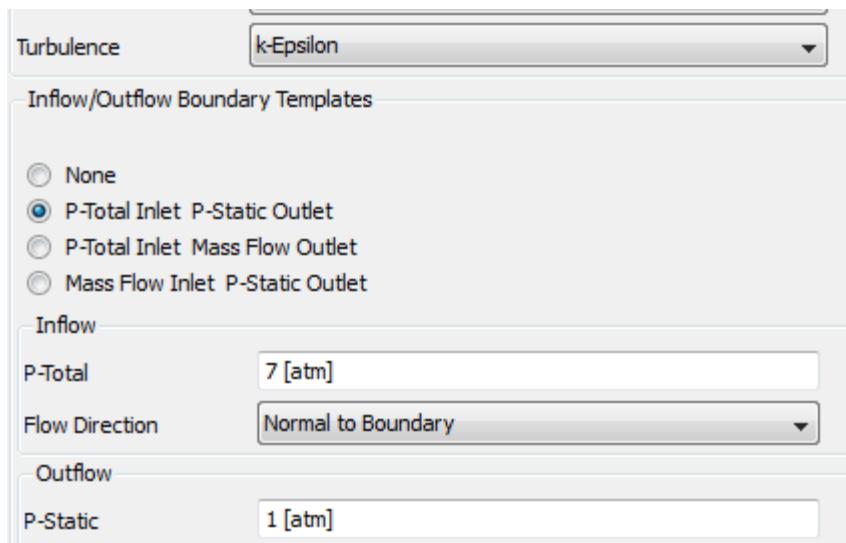


Figura 4.28 – Modelo de turbulência e Pressões de Entrada e Saída

O CFX-Pre® também apresenta um modelo tridimensional do domínio fluido com suas condições de interface, entrada e saída como na figura 4.29.

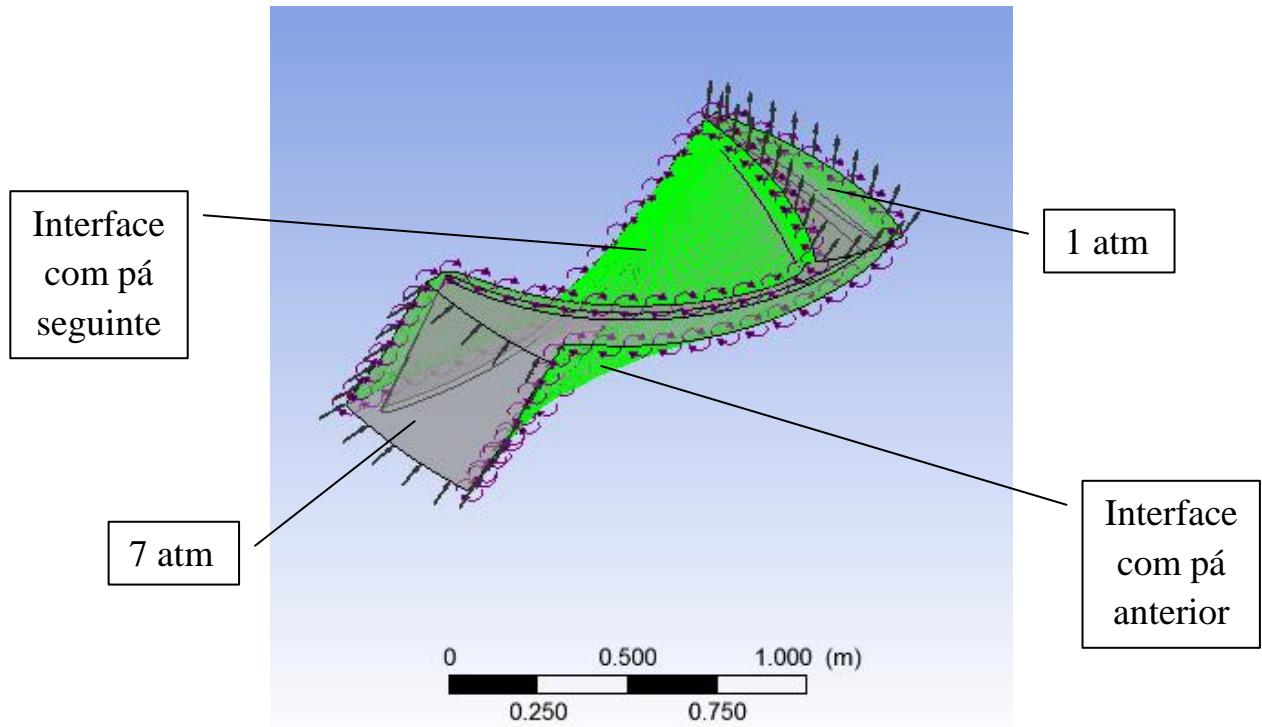


Figura 4.29 – Domínio Fluido no CFX-Pre®

Prossegue-se no processo para o CFX-Solver®. Determinamos as condições de execução.

No caso, a execução padrão é suficiente e coerente para o problema e então se espera pela convergência dos resultados como na figura 4.30 e 4.31, a presença de três picos é justificada pela terceira tentativa de iteração inicial executada pelo autor para publicar a monografia para as duas figuras.

Busca-se a convergência para valores inferiores a 10^{-4} para o RMS (*Root Mean Square*) de Momento de Massa e 10^{-3} para o RMS de K e Epsilon.

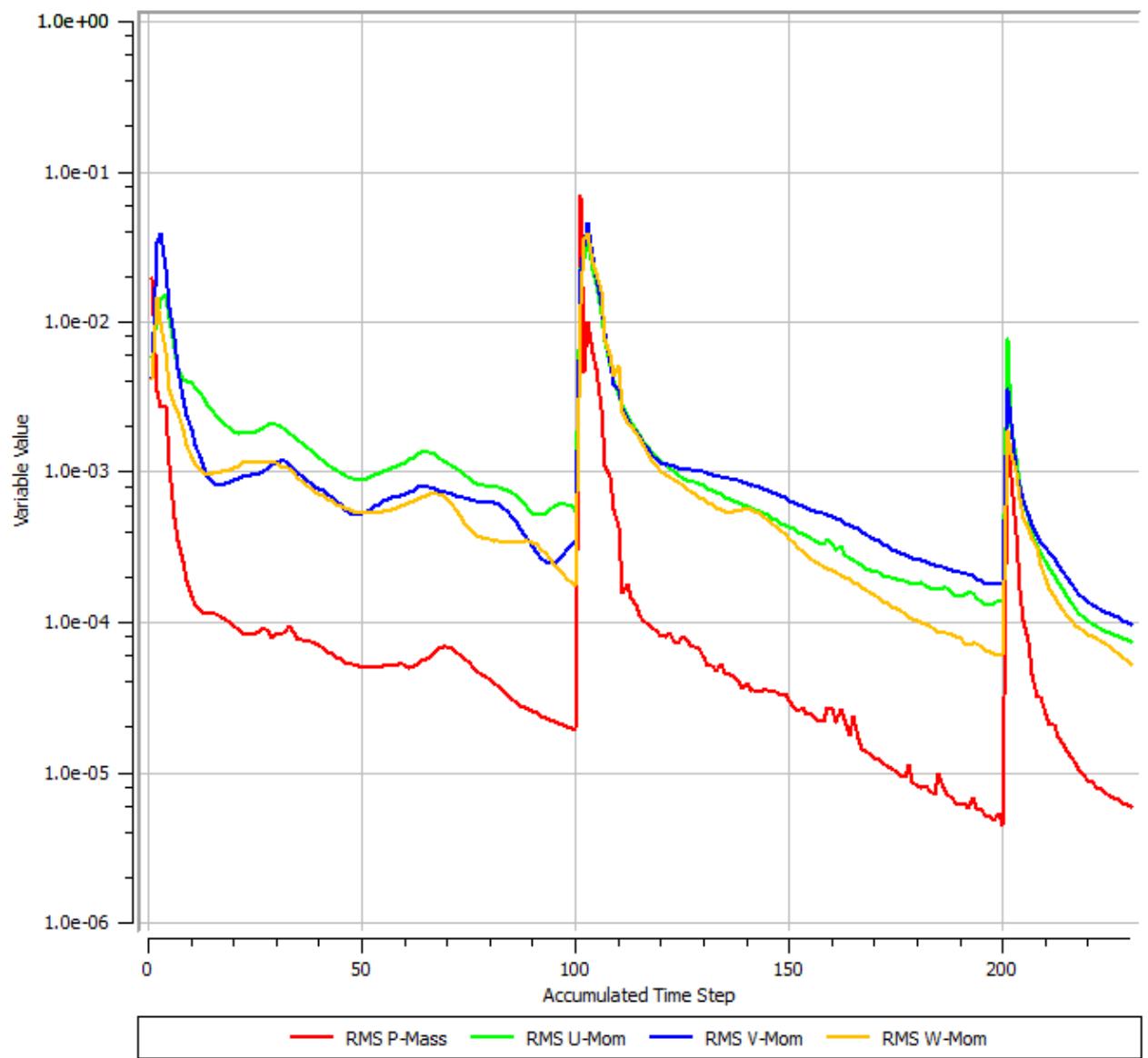


Figura 4.30 – Convergência do CFX-Solve® para Mass Momentum

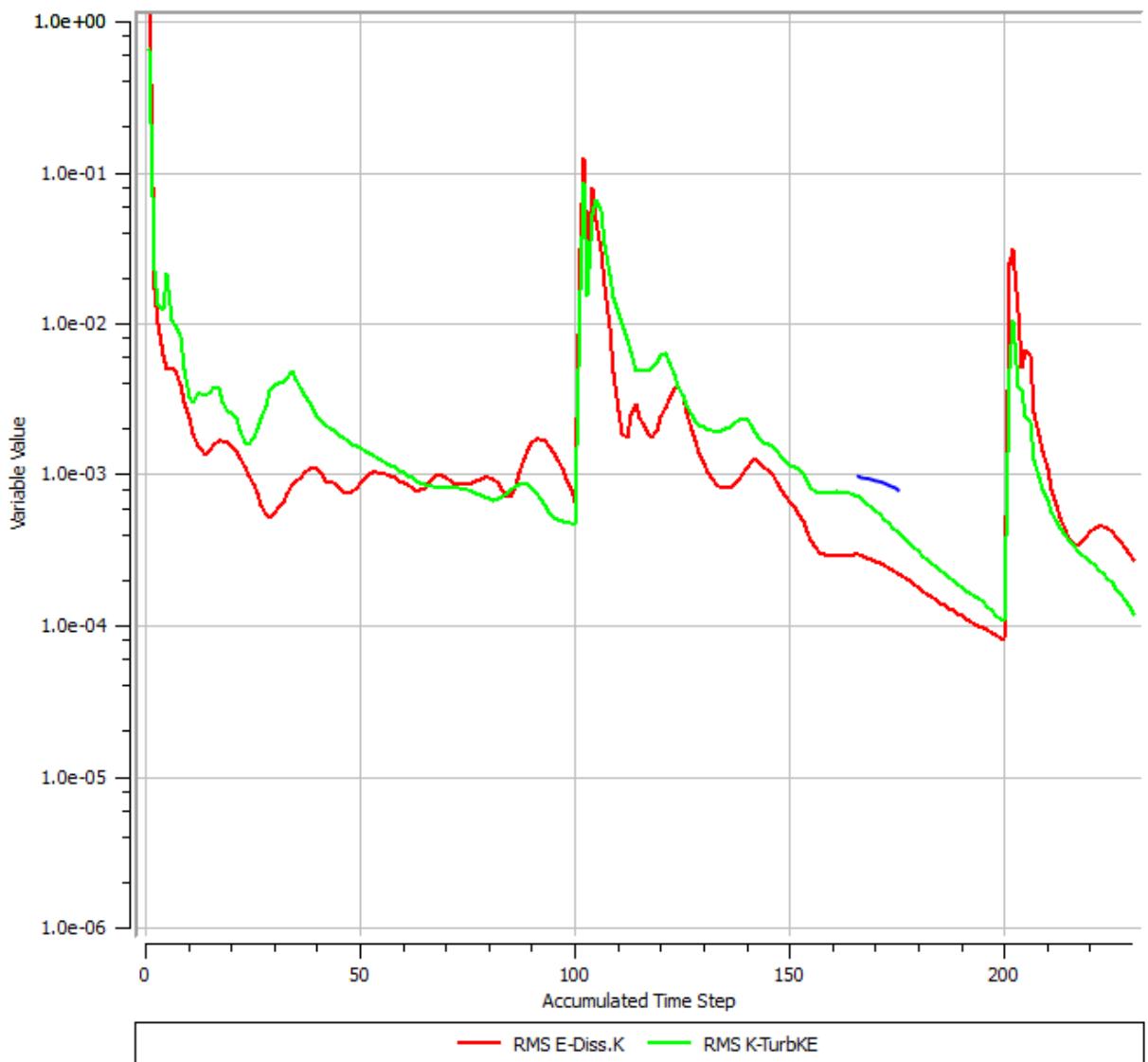


Figura 4.31 – Convergência do CFX-Solve® para Turbulência (KE)

Prossegue-se para o CFX-Post®, para avaliação de resultados, devido ao grande número de resultados que podem ser apresentados apenas alguns serão apresentados nas figuras 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37.

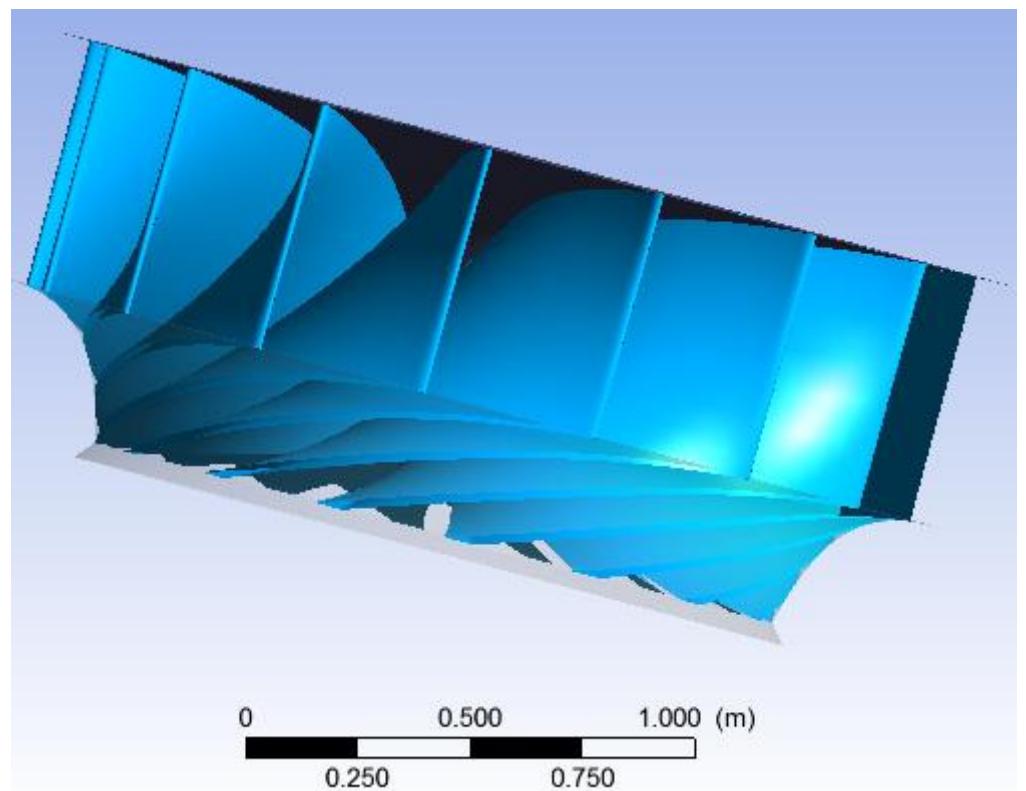


Figura 4.32 – Modelo tridimensional da Turbina no CFX-Post®

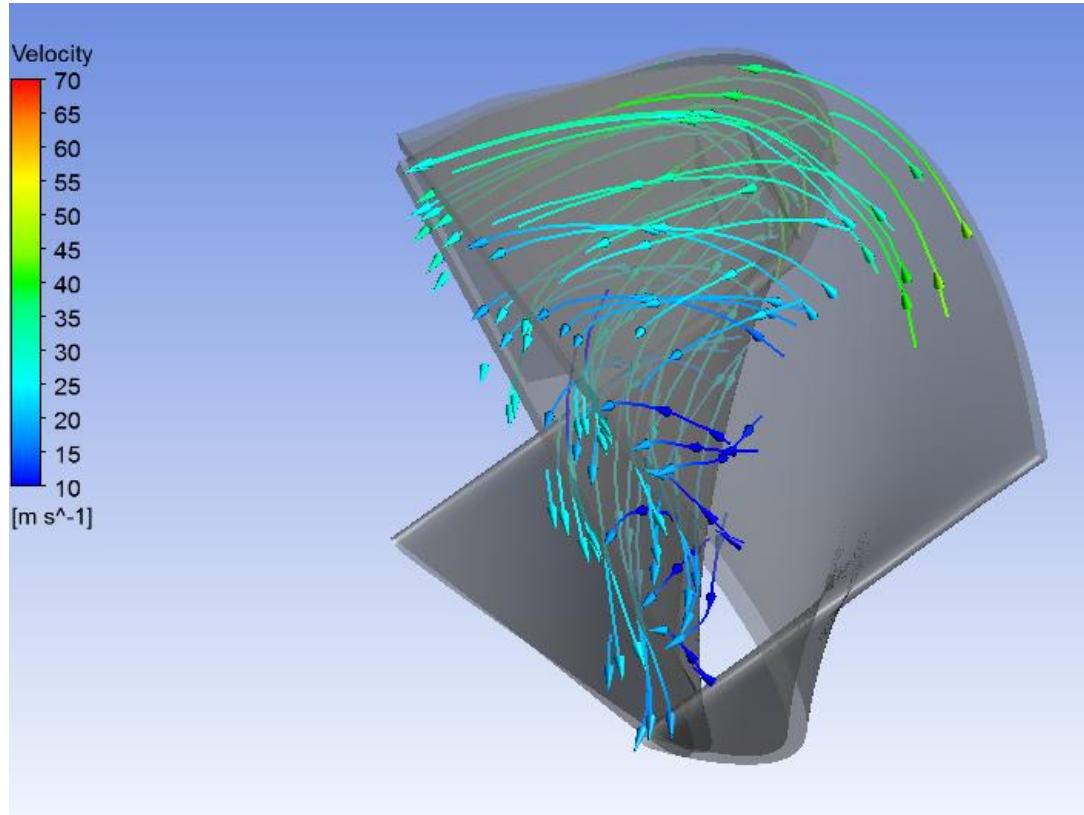


Figura 4.33 – Vetores de Velocidade de partículas em escoamento

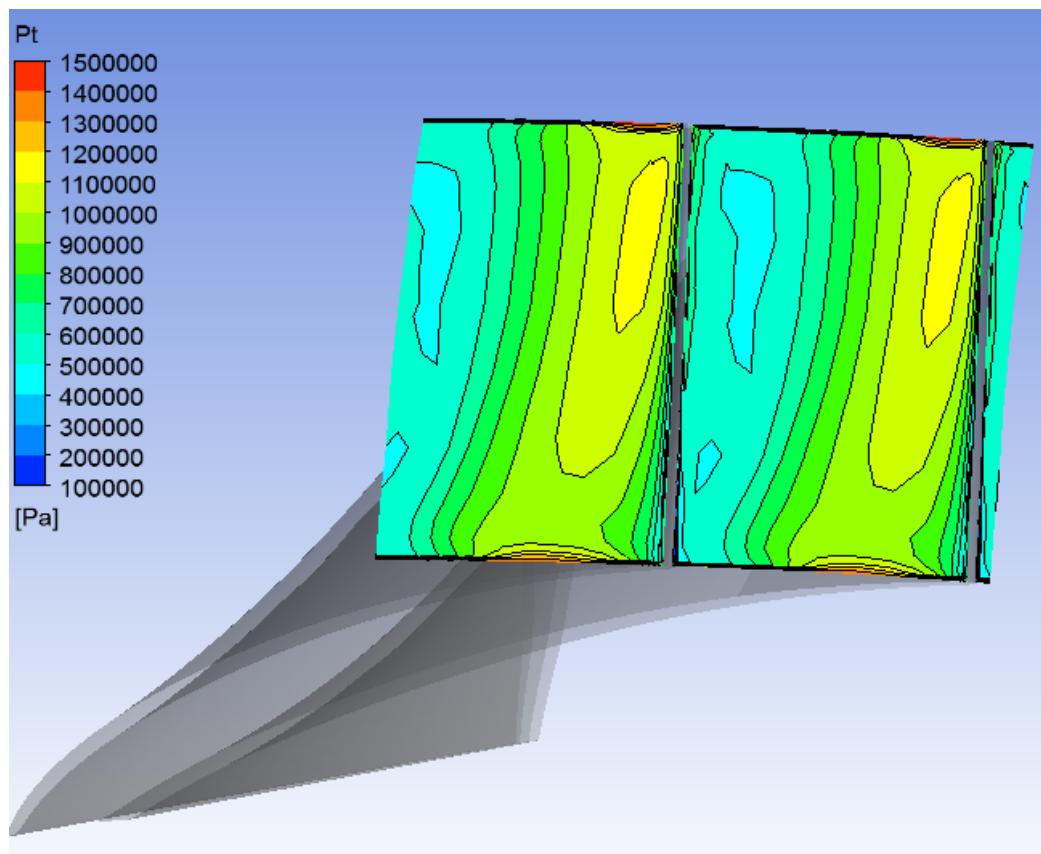


Figura 4.34 – Distribuição de Pressão na região de entrada de fluido

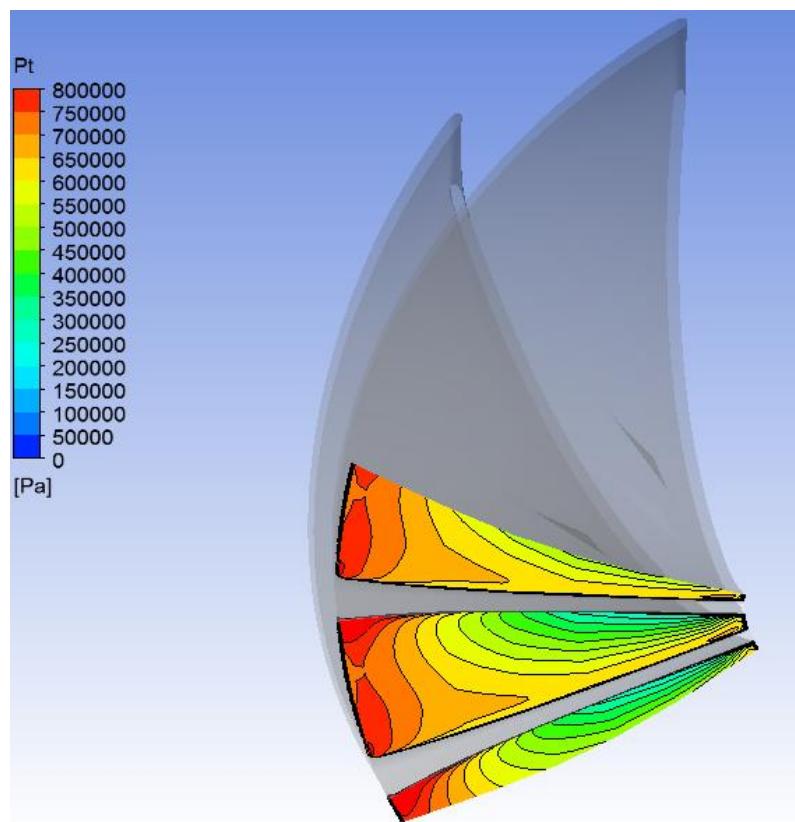


Figura 4.35 – Distribuição de Pressão na região de saída de fluido

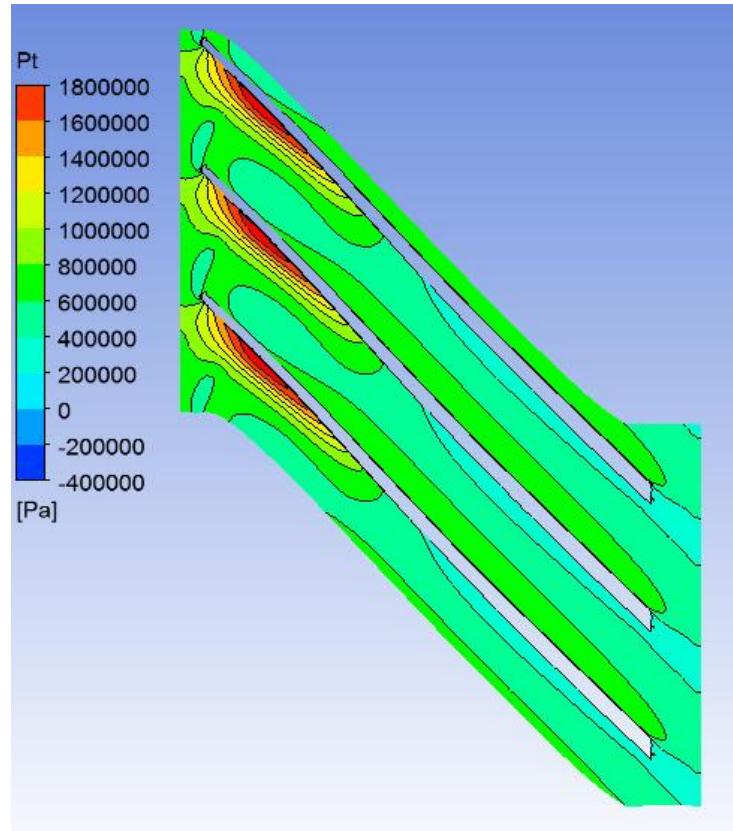


Figura 4.36 – Distribuição de Pressão em corte à meia altura da pá (3 pás)

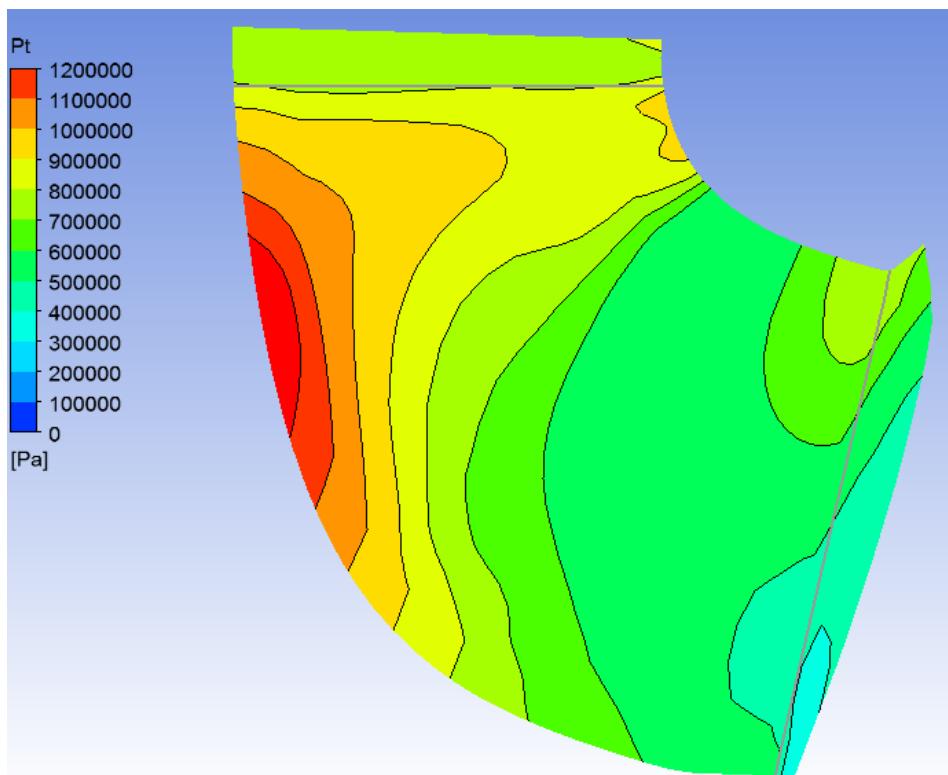


Figura 4.37 – Distribuição de Pressão em visão projetada da pá

Segue-se para o modelo geométrico de domínio sólido no Static Structural® importado do BladeGen® através de arquivo *.igs publicado previamente, como ilustrado na figura 4.38.

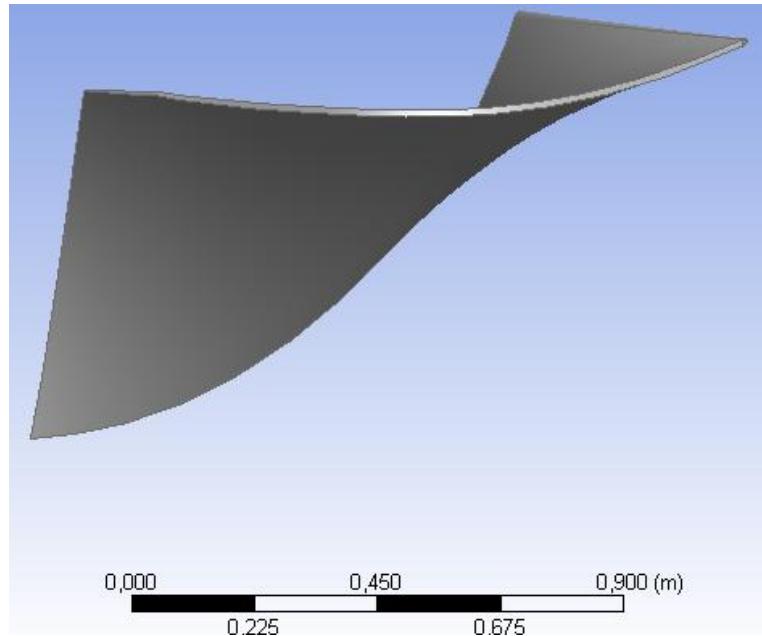


Figura 4.38 – Pá em domínio sólido

Segue-se para o Model que define a discretização da pá, através implicitamente do Mechanical APDL®, é possível verificar a malha na figura 4.39.

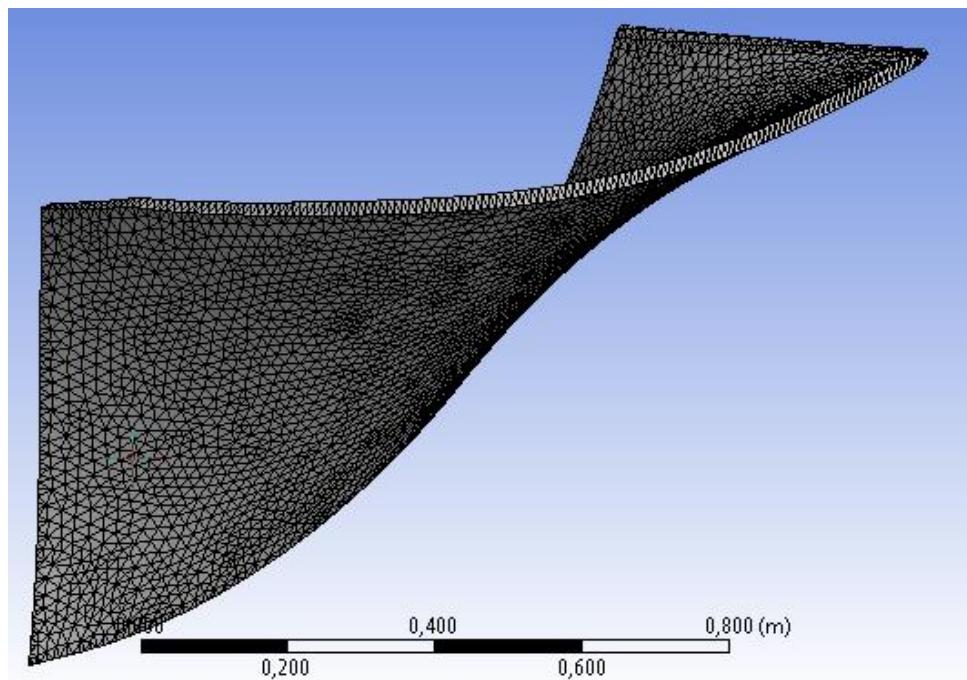


Figura 4.39 – Discretização em elementos finitos da pá

Continua-se com a importação do carregamento dinâmico fluido e mapeamento com o domínio estrutural sólido. O mapeamento é apresentado na figura 4.40 e o grau de eficiência de “98% of Mechanical nodes were mapped to the CFD surface. The remaining nodes are mapped to the closes edge or node”.

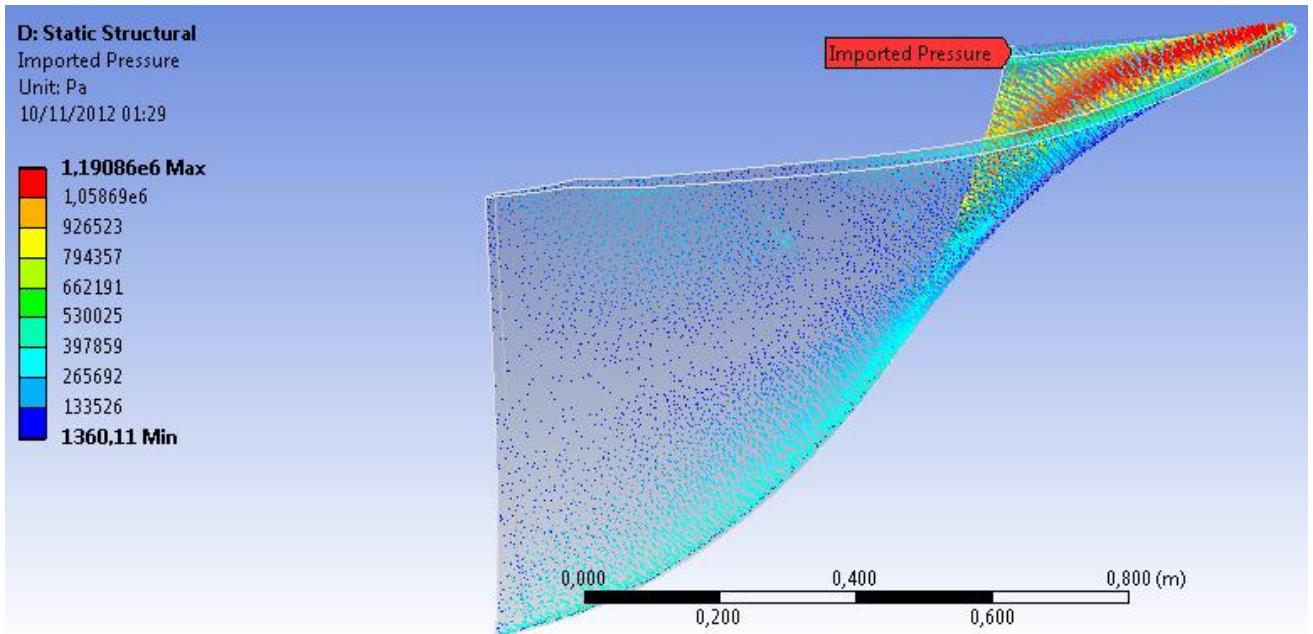


Figura 4.40 – Carregamento de pressão aplicado na pá

Por fim, segue-se ao cálculo de tensão e deslocamento e apresentação do resultado. Apresenta-se na figura 4.41 e 4.42 a tensão equivalente e a deslocamento total e em 4.43 a parametrização no ANSYS® relacionável ao ModeFrontier®. É importante ressaltar que o contorno superior na figura 4.41 é a fixação da pá implementada manualmente. Nota-se deslocamento máxima de 7,7mm do aço estrutural, trata-se de um valor alto, entretanto, neste trabalho não está sendo considerada a saia na saída da pá. É este valor que será minimizado.

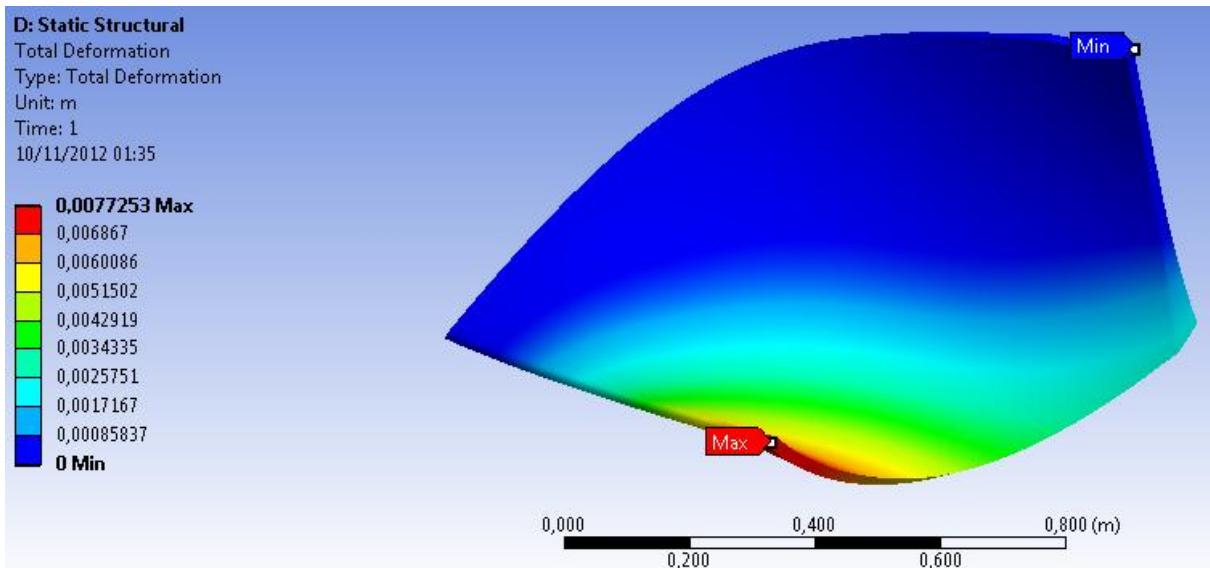


Figura 4.41 – Deslocamento Total

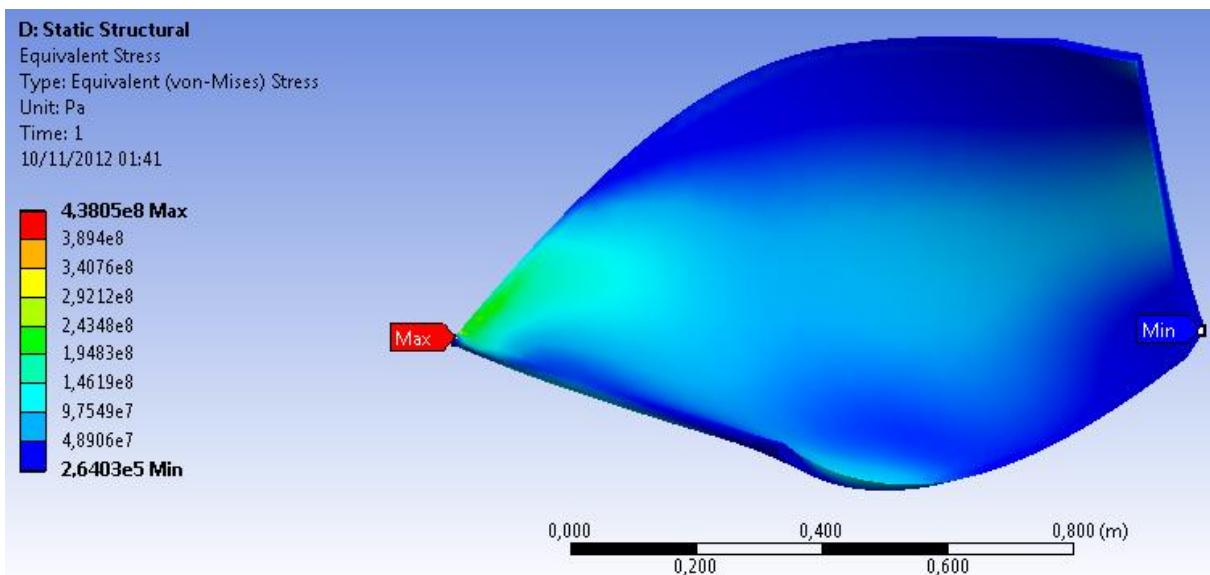


Figura 4.42 – Tensão Equivalente

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, m
P Maximum	7,7253e-003 m

Figura 4.43 – Parametrização do deslocamento máximo (Note o “P” à esquerda)

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
*	 New input parameter	New name	New expression	
4	Output Parameters			
5	 Static Structural (D1)			
6	 P1	Total Deformation Maximum	 0,0077253	m
*	 New output parameter		New expression	
8	Charts			

Figura 4.44 – Parâmetros no ANSYS®

De volta para o ANSYS Workbench® é possível verificar o parâmetro criado, como na figura 4.44.

Basta seguir para o ModeFrontier® e executar o processo de Otimização, devido à complexidade do problema, a resolução exige alto custo computacional. Utilizou-se *notebook* com as configurações a seguir:

- Intel Core i7 2.20 Ghz e 8 núcleos
- Memória RAM de 8 Gb
- Windows 7 Professional 64 bits
- Dispositivo gráfico NVIDIA GeForce GT540M

Após a otimização, apresentam-se os resultados finais. No ModeFrontier®, apenas foi executado o Workflow já descrito previamente e então aguardou-se o processo. É possível verificar alguns “erros” durante a otimização como na figura 4.45 relacionados à impossibilidades geométricas de geração pelo TurboGrid® como também descrito previamente.

```
00013 [] +8.381500000000000E001 +1.566300000000000E-002 +7.307312150250000E-003 +7.307312150250000E-003 false
00014 [] +7.747830000000000E001 +2.187120000000000E-002 NaN NaN true
00015 [] +8.230520000000000E001 +1.176520000000000E-002 +6.783464587940000E-003 +6.783464587940000E-003 false
```

Figura 4.45 – Erro – Impossibilidade de malha

5 Resultados Obtidos e Discussão

A otimização foi executada no ModeFrontier® com as seguintes entradas: para a espessura, variação de 1 cm a 5 cm e para o ângulo de 75° a 85°. Na iteração zero, os valores eram 2 cm e 80° respectivamente. Através do gerador aleatório foram gerados 50 “organismos” da primeira geração. As simulações orbitam 6 minutos por iteração e foram gerados 500 iterações. Entretanto, 232 apresentavam erro inicialmente, e o processo foi reiniciado na iteração 233. A partir daí considera-se o resultado significativo.

É possível colher do ModeFrontier® um possível *design* ótimo: espessura de 3,09 cm aproximadamente e ângulo de *wrap* de aproximadamente 82,98°. Conseguiu-se uma deslocamento total máximo de 1,53 mm, um valor ainda alto, porém, quantitativamente superior aos 7,72 mm da iteração zero. A turbina apresenta 1,025m de raio e 0,85925m de altura.

Pode-se também obter gráficos relativos à sensibilidade do objetivo às variáveis de entrada. Verifica-se nas figuras 5.1 e 5.2 a sensibilidade e distribuição de pontos simulados.

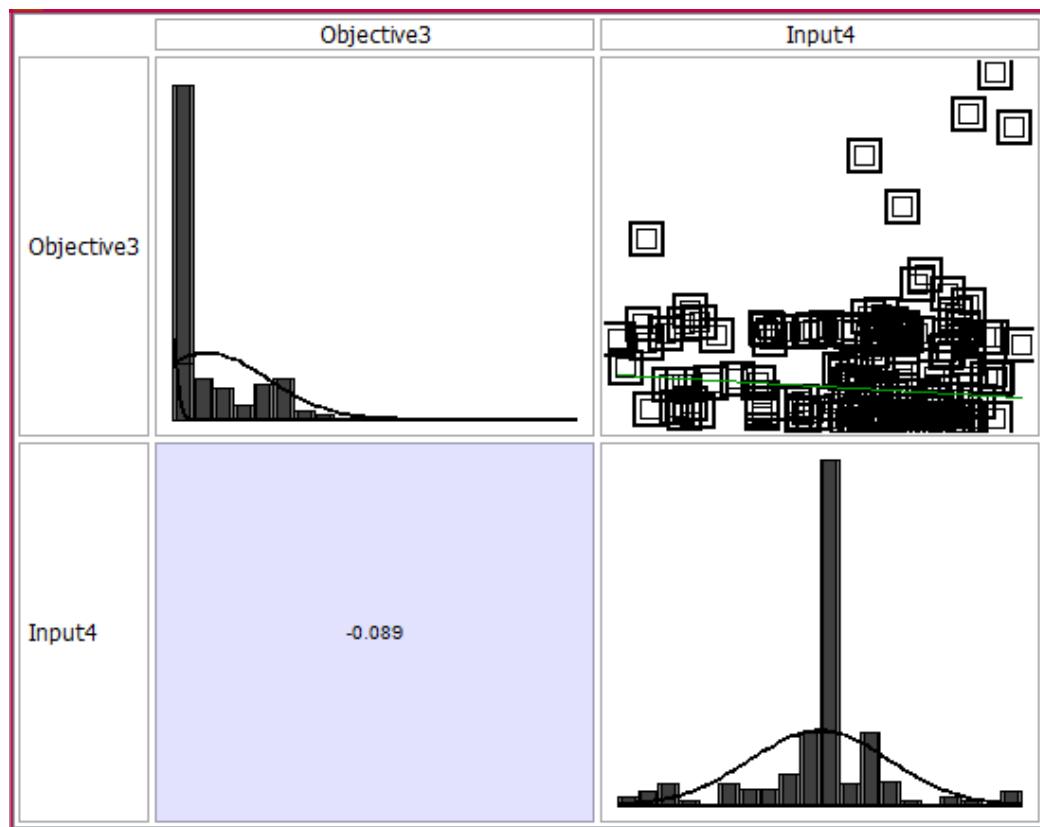


Figura 5.1 – Matriz de dispersão: Espessura e Deslocamento Máximo

Nota-se que a sensibilidade em relação à espessura da pá existe, porém é muito inferior ao esperado pela intuição. Sem modelagem, o intuitivo é que quanto maior a espessura, maior seria a rigidez, algo que a simulação não comprova. Existe um limiar em 3,1cm aproximadamente a partir do qual os resultados de deslocamento apresentados são prejudicados.

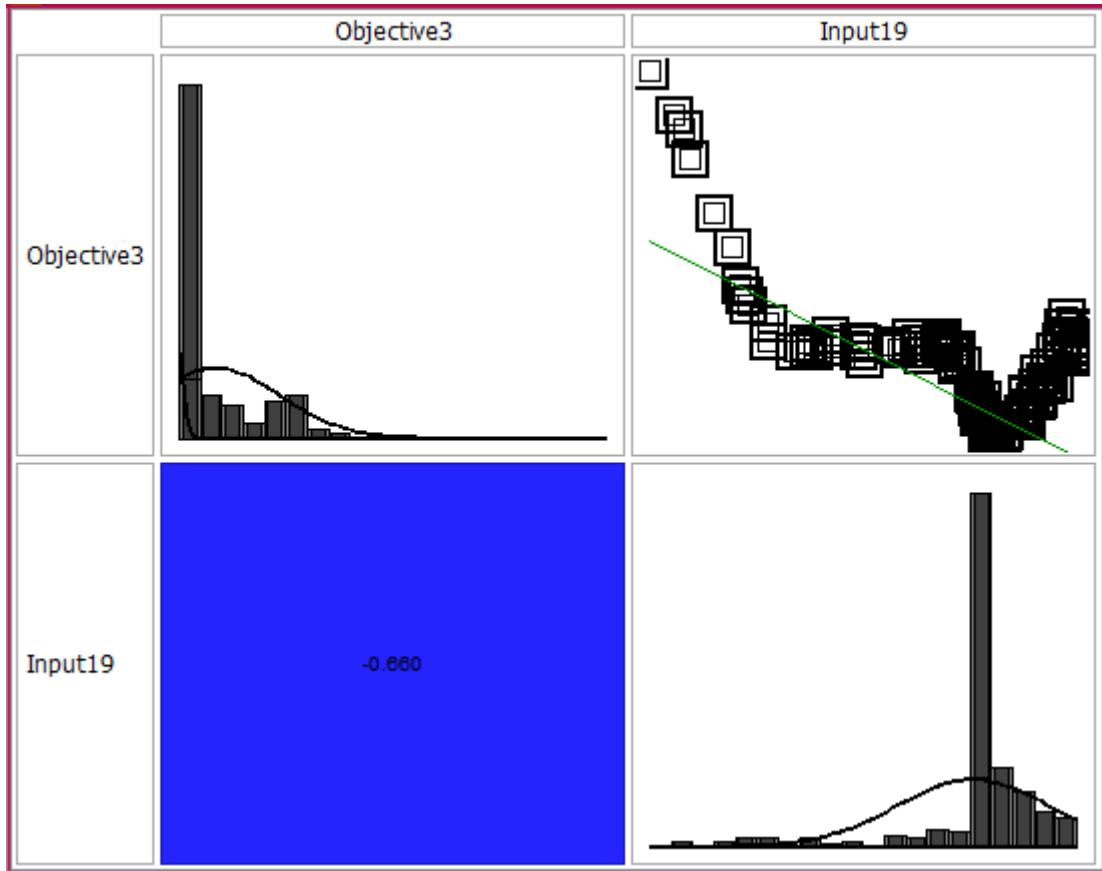


Figura 5.2 – Matriz de dispersão: *Wrap Angle* e Deslocamento Máximo

Nota-se que a sensibilidade é maior em relação ao ângulo *wrap*, verificase nitidamente que a variação entre as variáveis é altamente não-linear e difícil de ser modelada.

Para verificar o histórico da simulação é possível extrair gráficos de histórico para cada uma das variáveis ao longo das iterações. Verificarmos através das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 a convergência dos valores de espessura, ângulo *wrap* e deslocamento total máximo.

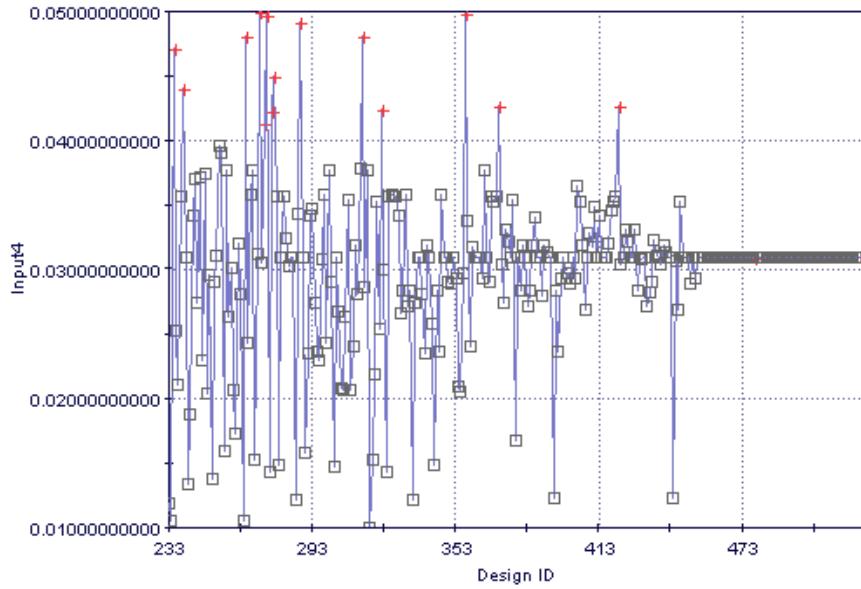


Figura 5.3 – Evolução no tempo da Espessura

Nota-se a convergência ocorrendo somente a partir da iteração 460 aproximadamente.

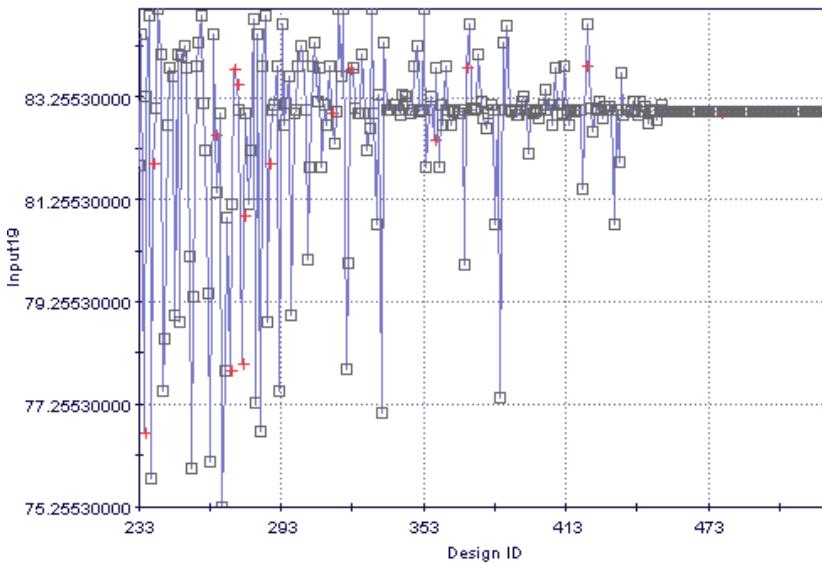


Figura 5.4 – Evolução no tempo do *wrap angle*

Nota-se, novamente, a convergência, principalmente após a iteração 450 caracterizando um possível ponto ótimo (solução do problema de otimização).

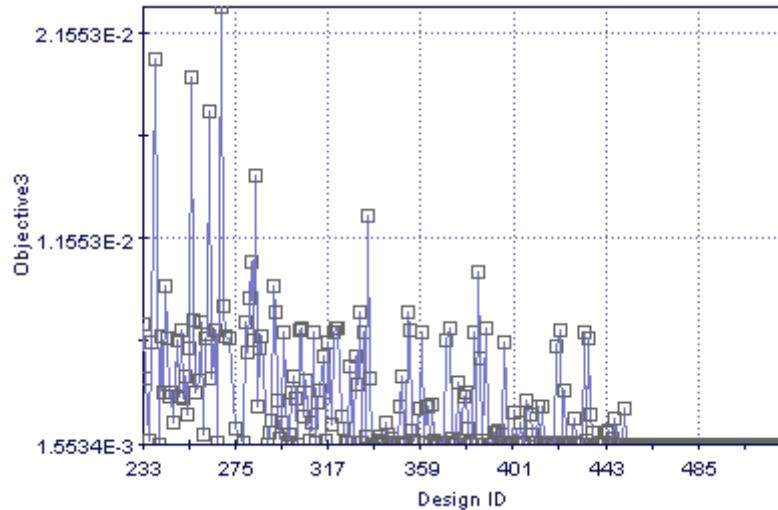


Figura 5.5 – Evolução no tempo do Deslocamento Máximo Total

Nota-se a convergência ocorrendo vagarosamente até a variação ser reduzida ao ponto de encontrar o ponto ótimo. Na modelagem, utilizaram-se 6 casas decimais, ou seja, milésimo de mm, algo que nem sempre é possível na fabricação mecânica.

Para caráter comparativo, são apresentadas a seguir as mesmas figuras utilizadas para a iteração inicial, porém para a turbina em ponto suposto ótimo.

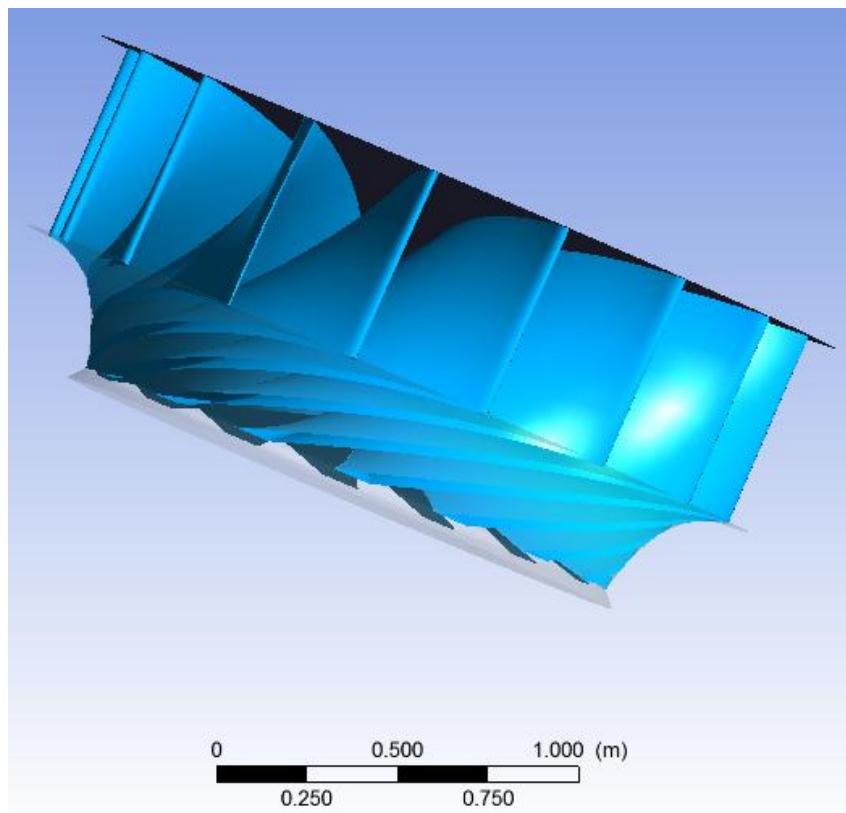


Figura 5.6 – Modelo tridimensional da Turbina no CFX-Post®

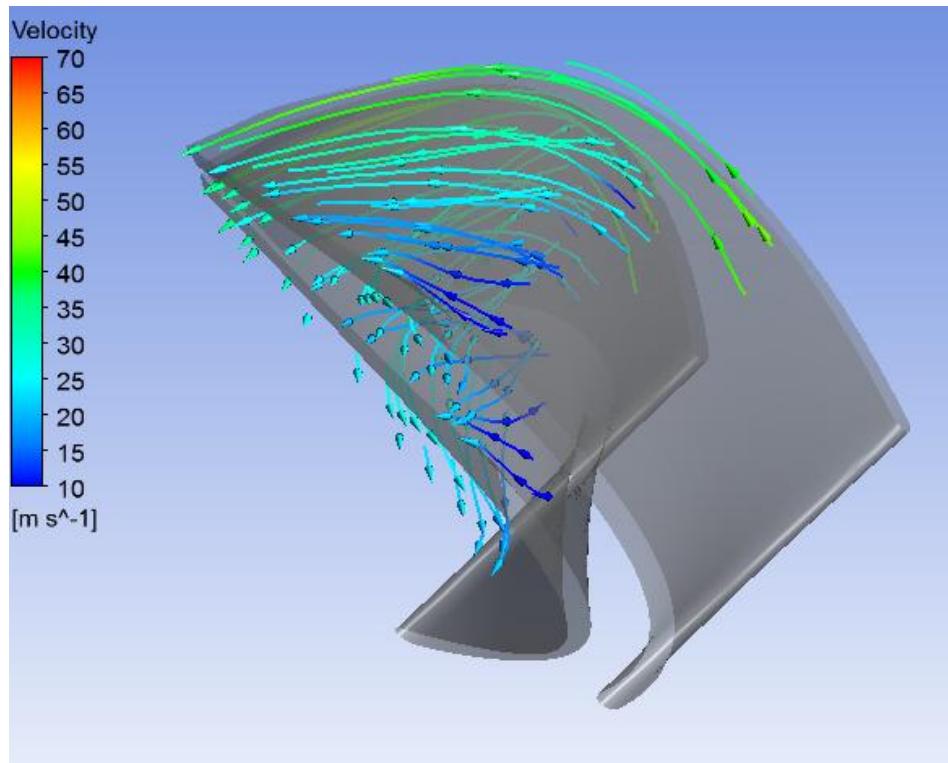


Figura 5.7 – Vetores de Velocidade de partículas em escoamento

Nesta figura 5.7, em particular, é possível verificar nitidamente a diferença geométrica e também de escoamento ao comparar iterações inicial e final.

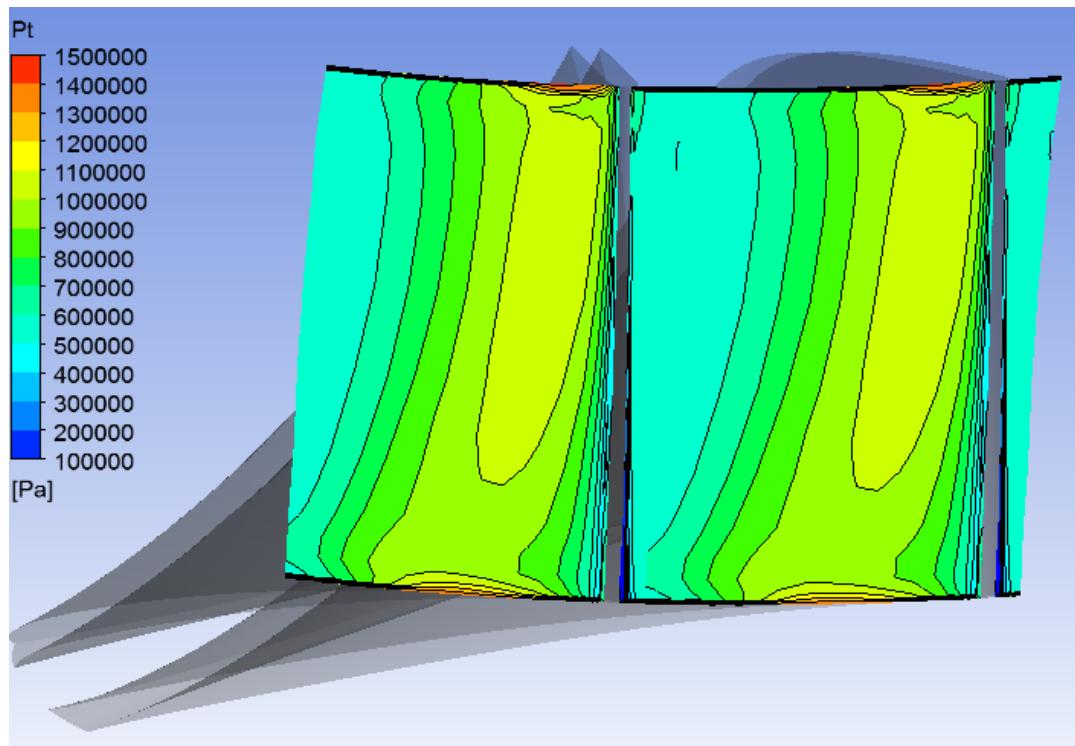


Figura 5.8 – Distribuição de Pressão na região de entrada de fluido

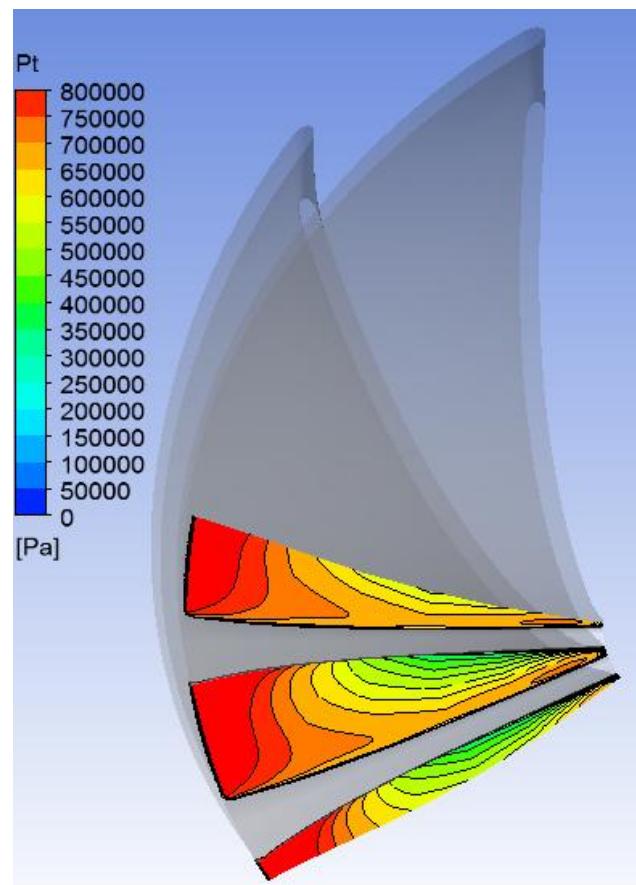


Figura 5.9 – Distribuição de Pressão na região de saída de fluido

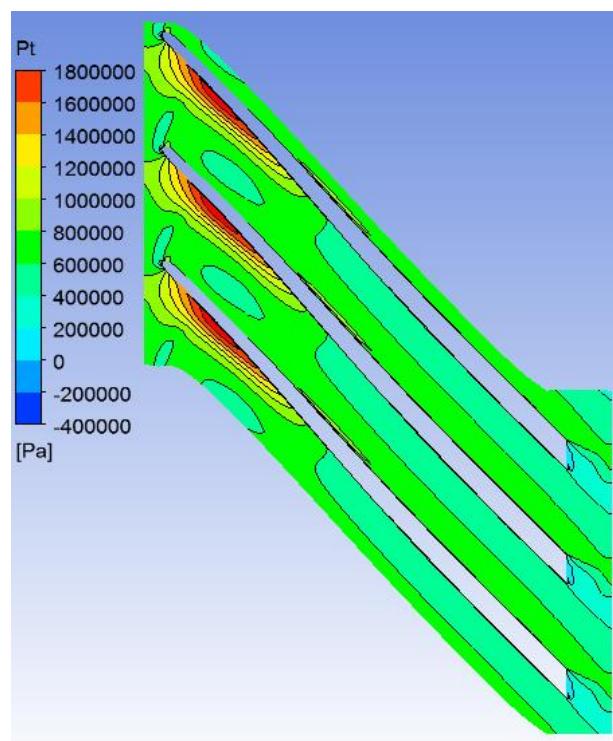


Figura 5.10 – Distribuição de Pressão em corte à meia altura da pá (3 pá)

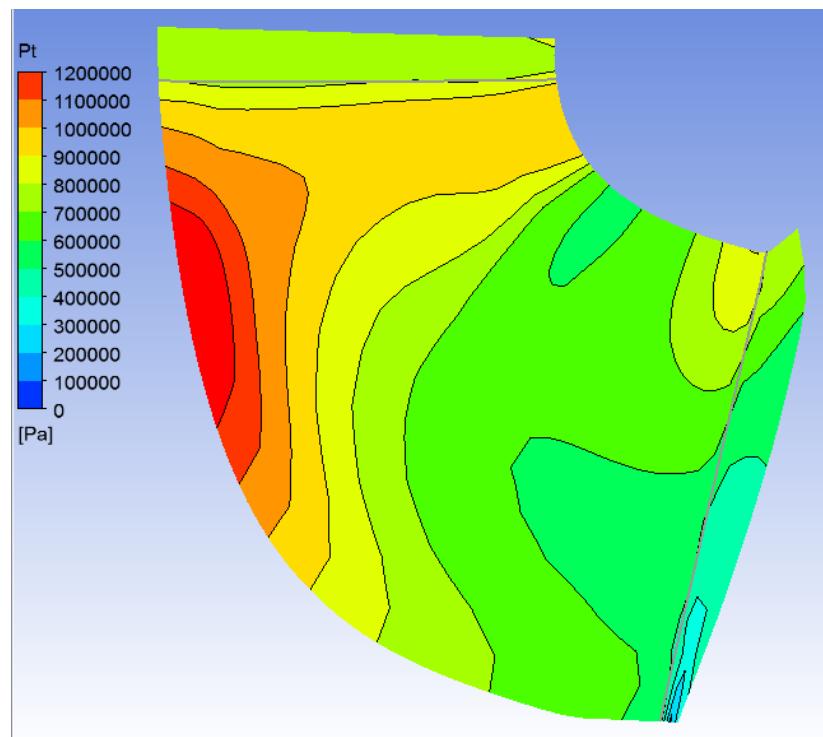


Figura 5.11 – Distribuição de Pressão em visão projetada da pá

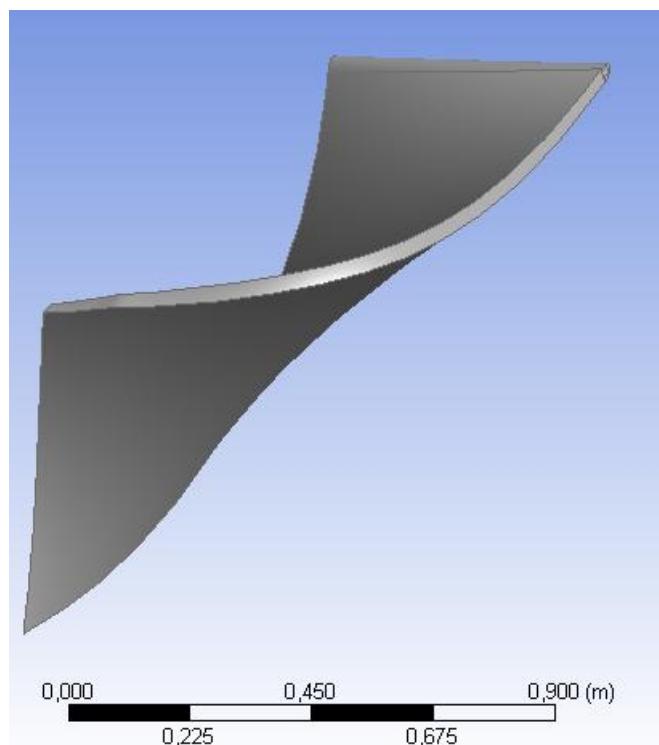


Figura 5.12 – Pá otimizada em domínio sólido

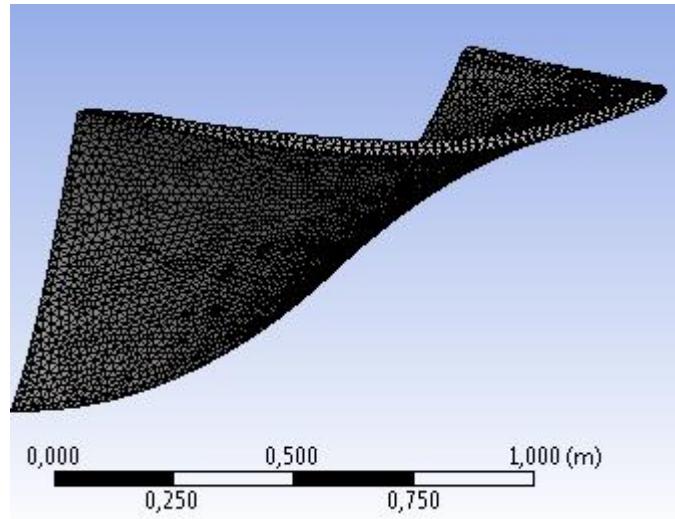


Figura 5.13 – Discretização em elementos finitos da pá

Continua-se com a importação do carregamento dinâmico fluido e mapeamento com o domínio estrutural sólido. O mapeamento é apresentado na figura 5.14 e o grau de eficiência de “97% of Mechanical nodes were mapped to the CFD surface. The remaining nodes are mapped to the closes edge or node”.

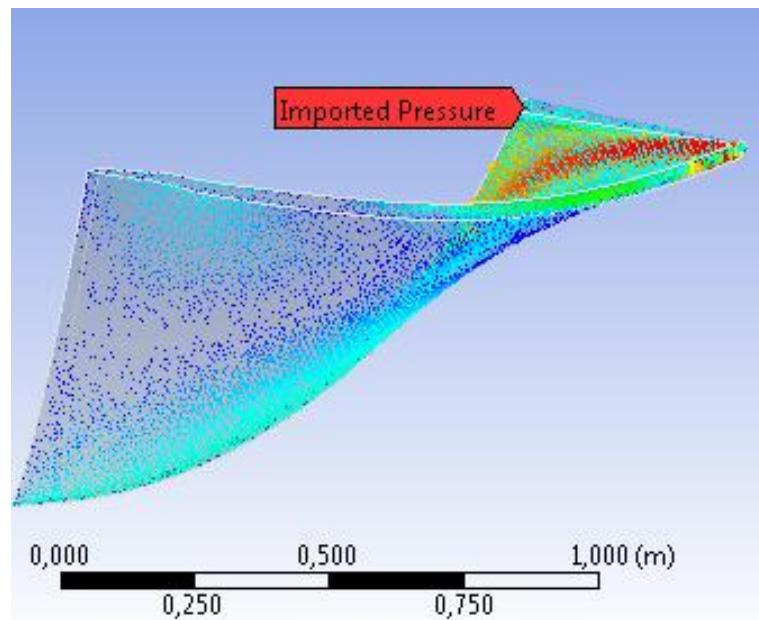


Figura 5.14 – Carregamento de pressão aplicado na pá

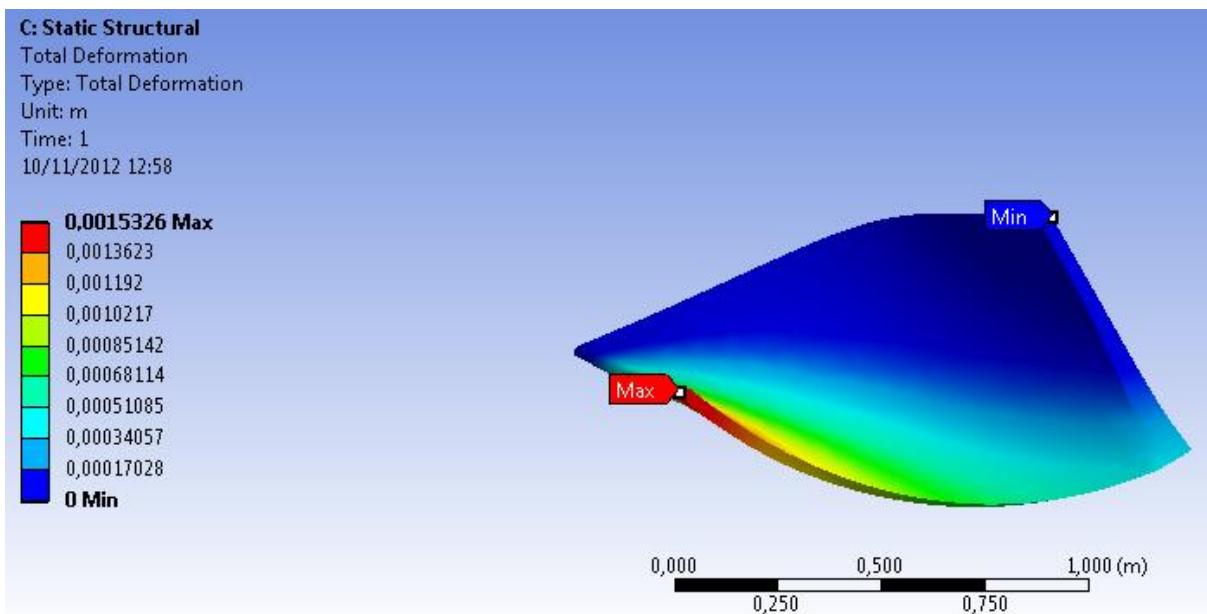


Figura 5.15 – Deslocamento Total

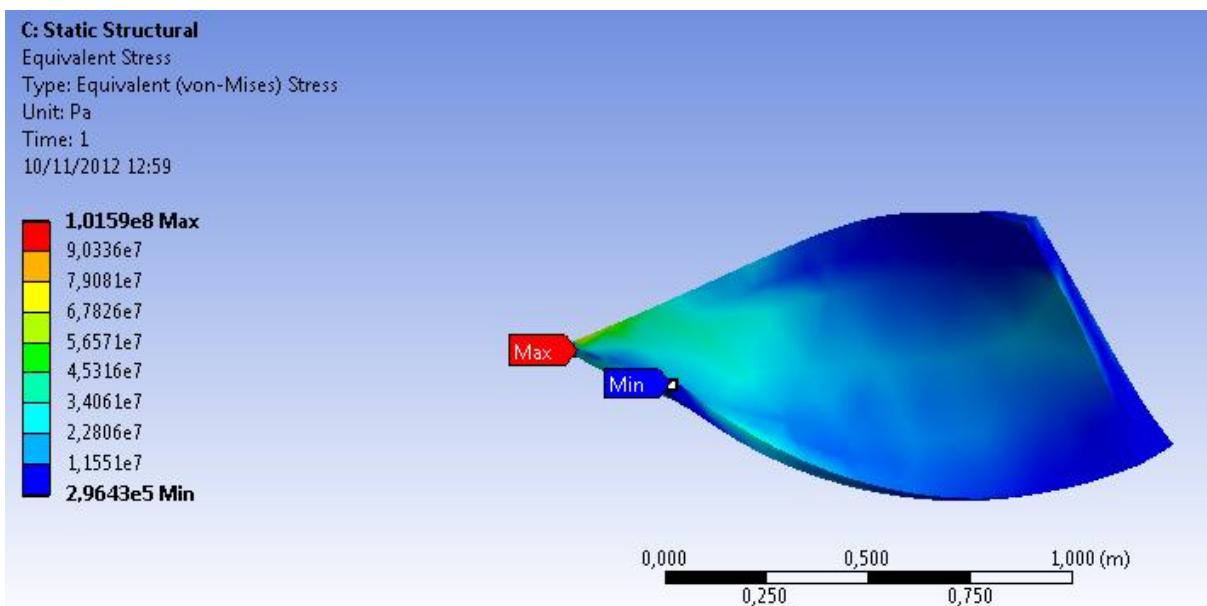


Figura 5.16 – Tensão Equivalente

Como expressado no início deste item, verifica-se um deslocamento bastante inferior à obtida inicialmente. Ainda, claramente as modificações na geometria principalmente perturbaram o modo como a pressão é distribuída ao longo da pá, de maneira a reduzir o deslocamento total máximo. Algo pouco intuitivo mostrado pelos resultados é a mudança do ponto de mínima tensão equivalente.

6 Conclusão

O problema proposto de desenvolver uma metodologia automatizada de otimização estrutural paramétrica de turbina Francis foi realizado com sucesso. Houve automatização do processo como um todo, com o uso somente dos softwares ANSYS® e ModeFrontier®, sem necessidade do MATLAB® utilizando análises FSI entre o CFX® e o Ansys Mechanical®.

Com a abordagem de otimização paramétrica estudou-se o efeito da espessura da pá com pequena influência dentro dos limites estabelecidos e do ângulo de *wrap* com grande influência nos resultados de deslocamentos máximos produzidos. Verifica-se que é possível através de um modelo conceitual de turbina, realizar otimização paramétrica (parâmetros bastante restritos no caso deste trabalho) com o fim de atender a um objetivo.

Entende-se que o BladeGen® não é a melhor ferramenta para utilização em processo de otimização, já que não permite parametrização direta de diversos parâmetros geométricos como raios da turbina e ângulos de entrada e saída de fluido. Dessa maneira, um método substituto é necessário como a utilização de modelos de CAD complexos e parametrizáveis.

A interação entre fluido e estrutura ocorreu aplicando carregamentos de pressão sobre a malha de elementos finitos representativa da pá com análise “*one-way*”.

Nota-se que apesar de utilizar referências de outras duas metodologias, a desenvolvida neste trabalho é original ao realizar a interação fluido-estrutura e combinar funcionalidades utilizadas nas referência citadas no item 1.6. A integração entre CFD e MEF diferencia o trabalho em meio às publicações referenciadas, além disso, na otimização apresenta foco na análise estrutural a partir de carregamentos fluidodinâmicos e não na análise de escoamento somente.

Em trabalhos futuros, pode-se citar desenvolvimento de metodologia própria para análise, utilizando conhecimentos de otimização e análise FSI através de softwares *open source*, ou ainda, desenvolvimento de softwares a serem desenvolvidos nesta área. Seria também plausível a utilização de parametrização complexa e significativamente representativa da geometria da turbina produzindo resultados superiores e com aplicação prática mais confiável.

É possível utilizar a metodologia desenvolvida em projetos conceituais de turbinas e outras turbomáquinas como bombas e também utilização para reformas em máquinas do mesmo tipo, tendo em vista pequenas alterações nos parâmetros. Ainda, com inclusão de análises de fadiga mais complexas do que as apresentadas pelo ANSYS® seria possível estender a aplicação da metodologia desenvolvida, após realizar séries de melhorias nesta.

Referências

- ANFLUX, Inc and Red Cedar Technology. (s.d.). Optimization of an ANSYS CFD Model Using HEEDS MDO.
- Costa, A. S. (Março de 2003). Notas sobre Turbinas Hidráulicas, Disciplina de Dinâmica e Controle de Sistemas de Potência, UFSC. *Turbinas Hidráulicas e Condutos Forçados* .
- Gleiser, M. (2010). *Criação Imperfeita*. Rio de Janeiro: Record.
- Hou, Y.-h., Qi, X.-y., Li, R.-n., & Zhang, J. (20 de Dezembro de 2008). Numerical Simulation of 3-D Flow in Low Specific Speed Francis Runner with Splitter Blades. *Information Science and Engineering, 2008. ISISE '08. International Symposium on* , pp. 447-451.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press.
- Miracca, F. B. (26 de Março de 2007). *Otimização de estruturas com fluido contido sujeita a múltiplos carregamentos* . São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Silva, E. C. (2012). Apostila da disciplina PMR5215 - Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos. *Otimização em Engenharia Mecânica* .
- Silva, E. C., Buiochi, F., Adamowski, J., Carbonari, R. C., Rueda, R., & Tiba, H. (Outubro de 2008). *Desenvolvimento de Metodologia para Modelagem e Avaliação Estrutural de Componentes de Hidrogerador para Diagnóstico de Defeitos e Extensão da Vida Útil* .
- Silva, F. L. (2011). *Otimização estrutural acoplada à interação fluido-estrutura de uma asa de aeronave tipo UAV* . São Paulo.
- Song, W., Wang, H., & Li, J. (16 de Abril de 2011). Simulated calculation of interblade vortex in Francis turbine's whole flow passage. *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on* , pp. 4392-4396.
- Tancredi, T. P. (04 de Março de 2009). *Otimização Multidisciplinar Distribuída aplicada a Projetos de Engenharia* . São Paulo, São Paulo, Brasil.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman.

Xiao, H., & Yu, B. (25 de Junho de 2010). Hydraulic Design of Water Turbine Based on the Computational Fluid Dynamics. *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on* , pp. 2789-2792.

Xi-de, L., & Yuan, H. (27 de Março de 2009). Numerical Simulation-Driven Hydrodynamic Optimization for Rehabilitation & Upgrading of Hydro Turbines. *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific* , pp. 1-8.