

ESTUDO AERODINÂMICO DE UMA PLATAFORMA DIRIGÍVEL

Douglas Souza da Silva

Relatório final de Iniciação Científica,
realizado por Douglas Souza da Silva.
Bolsista PIBIC. Orientado pelo do Dr.
Ângelo da Costa Ferreira Neri,
Tecnologista Sênior – DAS-CEA-INPE.

INPE

São José dos Campos

Versão: 2015-15-07

ESTUDO AERODINÂMICO DE UMA PLATAFORMA DIRIGÍVEL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Douglas Souza da Silva (FATEC - SJC, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: douglas.gmor@gmail.com

José Ângelo da Costa Ferreira Neri (INPE, DAS - CEA, Orientador)

E-mail: angeloneri@gmail.com

COLABORADORES

Dr. Demétrio Bastos Netto (DAS - CEA/INPE)

Lúcia Eutímia de Q. V. Alves (DAS - CEA /INPE)

Dra. Viviane Ribeiro de Siqueira (FATEC - SJC)

Julho de 2015

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo aerodinâmico de uma plataforma dirigível aplicada ao projeto TUCUXI. Sabe-se que um objeto se movendo com velocidade V relativa à atmosfera está submetida às forças aerodinâmicas que podem ser decompostas em duas componentes, o arrasto D que ocorre na direção oposta a V , e uma força L , chamada de sustentação, no plano perpendicular à V . O coeficiente de arrasto para o formato a ser utilizado, em que R é a força de arrasto, ρ é a densidade do ar, VOL é o volume do objeto, V é a velocidade do fluido no qual o objeto está submerso. C_D é o coeficiente de arrasto (o qual é adimensional). Os processos de simulação são realizados no ambiente virtual, o qual utiliza softwares de fluido dinâmica. Esses processos por serem relativamente complexos são suscetíveis a erros inerentes aos métodos. Para que se possa garantir os resultados são realizadas simulações de formas geométricas já testadas experimentalmente e definidos os parâmetros aerodinâmicos, comparando-os a fim de obter a menor diferença possível entre eles, sendo possível a validação do método de simulação numérica. A aproximação dos resultados se dá no constante trabalho de refinamento e geração de malhas de elementos finitos permitindo uma maior precisão e análise dos resultados necessários. Após a validação dos métodos uma nova forma aerodinâmica então é desenvolvida e simulada para fins de obtenção da melhor relação energética do dirigível.

ABSTRACT

AERODYNAMIC STUDY OF A PLATFORM AIRSHIP

This paper aims to the aerodynamic study of an airship platform applied to TUCUXI project. It is known that an object moving with velocity V relative to the atmosphere is subject to aerodynamic forces that can be decomposed into two components, the drag D is the opposite direction to V and U strength, support call in the plane perpendicular V . the drag coefficient for the format to be used, where R is the drag force, ρ is the air density, Vol . It is the object of volume V is the fluid velocity at which the object is submerged. CS is the drag coefficient (which is dimensionless). The simulation processes are performed in the virtual environment, which uses fluid dynamics software. These processes are relatively complex are susceptible to errors inherent in the methods. So that we can ensure the results are carried out simulations of geometric shapes already tested experimentally, and defined the aerodynamic parameters and compare them in order to get the smallest possible difference between them, making it possible to validate the numerical simulation method. The approach of the results is given in constant refinement of work and generation of finite element meshes allowing greater accuracy and analysis of the necessary results. After validation of the methods, a new aerodynamic shape is then developed and simulated for obtaining the best energy relationship airship.

Lista de Símbolos

C_{Do}	=	coeficiente de arrasto de pressão
C_{Df}	=	coeficiente de arrasto de fricção
C_{DV}	=	coeficiente de arrasto volumétrico
C_{DVHW}	=	C_{DV} empírico
D	=	Força de arrasto (N)
F_L	=	Força de sustentação (N)
A	=	área (mm ²)
A_f	=	área frontal (mm ²)
V	=	volume (m ³)
U	=	velocidade (m/s)
T	=	temperatura (°C)
ρ	=	densidade (kg/m ³)
λ	=	relação entre comprimento e diâmetro
ℓ	=	comprimento (mm)
d	=	diâmetro máximo (mm)
S_{Wet}	=	área superficial
Re	=	Reynolds
l_k	=	escala de Kolmogorov
l_l	=	escala de comprimento integral
Re_t	=	Reynolds de turbulência
k	=	energia cinética (unidades de m ² /s ²)

Sumário

	Pág.	
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Apresentação do Trabalho	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo geral	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Projeto aeronáutico	2
2.2	Dirigível de Hindenburg	3
2.3	Introdução à aerodinâmica	4
2.4	Escoamento turbulento	5
2.5	Linhas de corrente, trajetórias e linhas de emissão	7
2.6	Análise analítica do coeficiente de arrasto volumétrico	7
2.7	Introdução a dinâmica dos fluidos computacional	8
2.7.1	Modelagem da turbulência	8
2.7.1.1	Características da turbulência	9
2.7.2	Limitações do CFD	10
3	MÉTODOS	12
3.1	Analítico	12
3.2	Simulação	15
3.2.1	Construção da malha	15
3.2.2	Configuração da simulação	16
3.2.3	Demonstração dos resultados	16
4	CONCLUSÃO	22
5	REFERÊNCIAS	23

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do Trabalho

No decorrer dos anos, com o aumento populacional, a necessidade de se ter sistemas de comunicação e vigilância se tornou um dos pilares governamentais.

O setor aeroespacial tem se destacado com o desenvolvimento de projetos, mostrando sua capacidade de inovação e seu alto nível de tecnologia implementado, tornando-se um dos segmentos mais importantes para a economia e segurança mundial.

As forças aerodinâmicas produzidas sobre a superfície provocam arrasto, sustentação, forças laterais e momentos. Estas forças resultam de duas fontes, as quais são: distribuição de pressão e fricção viscosa. Um dos maiores interesses na elaboração de projeto aerodinâmico é o arrasto. A geometria do balão é um parâmetro primordial para se estabelecer uma performance otimizada, com menores custos de operação do dirigível, sendo essencial para o bom êxito do projeto. Para se poder fabricar um dirigível, a definição do desenho e otimização da forma é necessário a confecção de vários protótipos com diferentes configurações para que simulações e testes sejam realizados afim de estabelecer os melhores parâmetros aerodinâmicos. O estudo e escolha da forma influí diretamente no desempenho, podendo resultar ganhos ou perdas energéticas com relação entre velocidade, alcance e tempo.

Considerando-se que o Brasil, devido a sua grande extensão territorial, suas fronteiras com outros países, necessita de sistemas que sejam capazes de permanecer por um grande espaço de tempo observando o espaço a sua volta, bem como câmeras para filmagem e meios de envio das informações para bases em solo.

Baseando-se nos aspectos citados procura-se analisar geometrias e formatos de dirigíveis existentes, os quais foram testados experimentalmente e definidos os coeficientes inerentes ao processo, demonstrando os principais fatores que incidem sobre o comportamento aerodinâmico, e desenvolver um formato para aplicação e desenvolvimento da plataforma dirigível TUCUXI, tendo em vista a necessidade de simplificar os processos atuais de fabricação, e, diminuição de custos. Os métodos analíticos simplificados são importantes logo ao início do projeto, possibilitando resultados e observações básicas e teóricas para uma análise preliminar. As simulações utilizando-se de métodos da Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD (Computer

fluid dynamics) são de extrema utilidade durante fases iniciais de um projeto, realizando análises aerodinâmicas e de forças existentes, possibilitando modificações e novas análises tendo em vista a redução de custos com a fabricação de protótipos e diminuição do tempo envolvido na preparação e condução de testes experimentais. Proporciona o estudo e a geração de conhecimentos em problemas de difícil reprodução em laboratório. Promovendo rápidas soluções das equações de Navier-Stokes cuja complexidade e não linearidades tornam soluções analíticas dispendiosas e complexas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Analisar formas de dirigíveis da literatura testados experimentalmente, a fim de determinar os parâmetros envolvidos no comportamento aerodinâmico baseado em métodos analíticos e experimentação em túnel de vento virtual, sugerindo-se, em função da polar de arrasto obtida, condições aerodinâmicas ótimas para utilização em uma plataforma dirigível experimental TUCUXI.

1.2.2. Objetivos específicos

- a. Certificar e validar métodos de simulação computacional em software para mecânica dos fluidos;
- b. Demonstrar as principais características aerodinâmicas aplicáveis aos dirigíveis e suas relações;
- c. Selecionar os melhores parâmetros de forma dos dirigíveis analisados;
- d. Desenvolver uma nova forma aerodinâmica, a fim de obter valores ótimos para relação energética da plataforma dirigível TUCUXI.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema estudado, por meio da qual se buscou demonstrar algumas das inúmeras definições, abordagens sobre aerodinâmica de dirigíveis e seus elementos, os métodos e ferramentas de simulação numérica para a análise fluidodinâmica das formas.

2.1. Projeto aeronáutico

Um projeto aeronáutico que visa cumprir com uma missão de atender aos requisitos de mercado e de certificação aeronáutica, oferece aos engenheiros responsáveis o desafio de administrar os conflitos inerentes da interdisciplinaridade envolvida. O projeto aeronáutico pode ser dividido em três grandes etapas: conceitual, preliminar e detalhado [1].

O projeto conceitual envolve a discussão de questões básicas relacionadas ao desempenho, capacidade de carga, formato aerodinâmico e dimensões, por exemplo. Essas questões são analisadas de forma desigual com as disciplinas envolvidas (aerodinâmica, estrutura, performance, propulsão) o que resultados superficiais do projeto.

Na etapa preliminar, o projeto se vê em subsistemas aplicados ao dirigível, o que aumenta conseqüentemente os detalhes do projeto, implicando também em menores mudanças na configuração do dirigível. O projeto detalhado já com todas as informações em mãos, um protótipo do produto em escala real é fabricado com o objetivo de testar os equipamentos, sistemas e validar o produto.

As fases de projeto demonstram a necessidade de várias disciplinas, expondo a necessidade de se abster de outras áreas.

Neste estudo apenas a questão aerodinâmica é observada e estudada, afim de gerar resultados aplicáveis a um produto final, a plataforma dirigível TUCUXI.

2.2. Dirigível de Hindenburg

No início do século XX, havia grande interesse no uso comercial e militar de dirigíveis mais leves do que o ar, devido à sua maior capacidade de carga do que os aviões da época. A indústria de dirigíveis entrou em colapso após o desastre com o dirigível Hindenburg em 1937. O incêndio e a destruição do mesmo despertaram a opinião popular de que o hidrogênio é extremamente perigoso. Entretanto, a causa do desastre do Hindenburg não foi o hidrogênio, que propiciava uma força de sustentação, mas sim uma cola inflamável utilizada na membrana externa. A chama do hidrogênio é mais difícil de ser percebida porque muito da luminosidade ocorrente em outras queimas vêm de radicais ou fuligem que contém carbono [2].

Como o hidrogênio é o gás mais leve, ele é muito difuso, e é mesmo difícil de entrar em ignição quanto um tanque cheio do gás é furado, porque ele é rapidamente diluído no ar a concentrações inferiores ao limite da inflamabilidade. Ao contrário, a gasolina, por exemplo, é mais perigosa, porque os vapores são relativamente pesados e tendem a se concentrar nas vizinhanças de um vazamento [2].

Os balões podem ser construídos para flutuar no ar tanto por seu preenchimento com um gás cujo peso molecular seja inferior ao do ar, como hidrogênio ou hélio, conforme mostrado na Figura 1, quanto pelo aquecimento do ar no interior, de modo a diminuir sua massa específica. Os submarinos devem ser capazes de manter um empuxo neutro para que sua profundidade se mantenha em relação à superfície do oceano. Eles conseguem essa situação através dos tanques de lastro, que podem ser preenchidos com ar ou água para alterar a massa específica global do submarino [3].

Figura 1: Balão de Hélio



Fonte: NASA. (2006)

2.3. Introdução à Aerodinâmica

Arrasto é o nome dado à resistência a que está sujeito um objeto quando se move através de um fluido. Quando um objeto se move através do ar, a força é chamada resistência do ar, e quando ele se move através da água, ela é denominada arrasto hidrodinâmico. No regime estacionário, a força de arrasto pode ser decomposta em duas componentes, conforme mostrado na figura 2.

O arrasto viscoso é o resultado das tensões cisalhantes atuantes ao longo da superfície, enquanto o arrasto de forma é a resultante da força devida à pressão normal atuante ao longo da área da superfície. Em um objeto com linhas de corrente bem delineadas, a maior parte do arrasto será viscoso [3].

$$F_{arrasto} = F_{cisalhante} + F_{normal} = \int_A \tau dA + \int_A -P dA \quad (1)$$

A aerodinâmica, em geral, é auxiliada por uma análise dimensional. A velocidade e as dimensões do objeto, naturalmente, são determinantes, e a viscosidade do fluido e sua massa específica também são importantes. Quanto mais denso um fluido, maior a quantidade de massa que deve se mover no entorno do objeto. Assim pode-se estabelecer que

$$F = f(U, \ell, \mu, \rho) \quad (2)$$

A análise dimensional permite simplificar a relação entre as variáveis. O coeficiente de arrasto adimensional é definido como

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (3)$$

e o coeficiente de sustentação é

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (4)$$

Em que C_D e C_L são funções do número de Reynolds. Isto é, $C_D = C_D(Re)$.

Nos escoamentos de alta velocidade, o número de Mach também é importante, o qual não será utilizado ou demonstrado no atual trabalho devido aos regimes de escoamento de baixa velocidade [3].

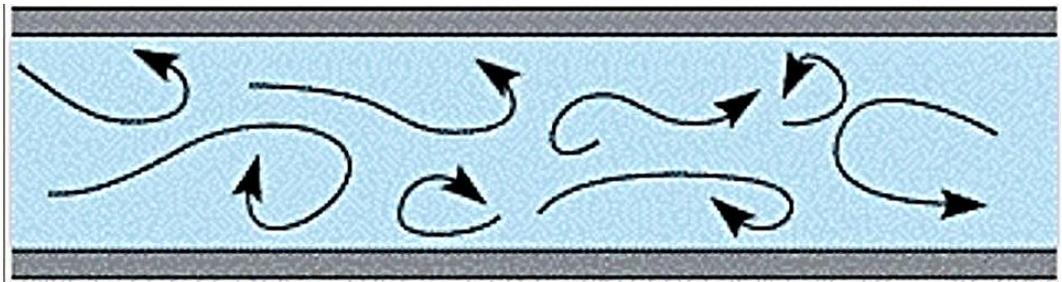
2.4. Escoamento turbulento

Um fenômeno interessante que ocorre na natureza é que, quando a velocidade crítica de um escoamento é excedida, o escoamento deixa de ser ordenado; ele passa para um estado caótico, turbulento. Mesmo para um escoamento que possa ser considerado em regime estacionário como um todo, haverá variações internas na velocidade em relação ao tempo devido a essa turbulência. As equações de Navier-Stokes são aplicáveis aos escoamentos turbulentos da mesma forma que são aplicadas aos escoamentos laminares mais

ordenados, porém, elas se tornam muita mais trabalhosas de serem solucionadas, em parte pelo fato de jamais admitir o regime estacionário. Osborne Reynolds procurou tratar desse problema reescrevendo as equações de Navier-Stokes na forma de médias, ao invés de sua forma tradicional instantânea. Suas ideias, com frequência, foram utilizadas como base para a modelagem de escoamentos turbulentos por meio de códigos computacionais em dinâmica dos fluidos CFD (Computer fluid dynamics), utilizados nas simulações numéricas de escoamentos turbulentos [3].

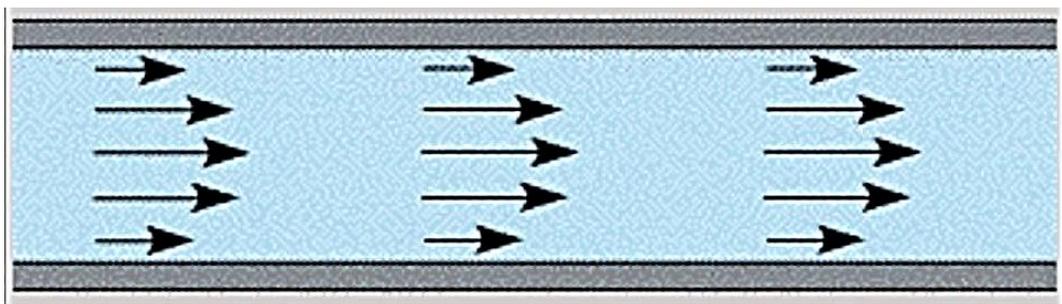
Turbulência é movimento desordenado ou caótico, com fortes variações de velocidade. As Figuras 2 e 3 mostram um exemplo de movimentos turbulento e laminar.

Figura 2: Escoamento turbulento



Fonte: Mecânica dos Fluidos. (2006)

Figura 3: Escoamento Laminar



Fonte: Mecânica dos Fluidos. (2006)

O critério de transição de um escoamento laminar ordenado para um turbulento caótico depende da razão entre as forças inerciais e viscosas. Essa razão é caracterizada pelo número de Reynolds, disposto na equação (5), a seguir

$$Re = \frac{\rho U \ell}{\mu} \quad (5)$$

Para escoamentos internos em tubos, o escoamento é laminar até um número de Reynolds de cerca de 2.300, porém, para um escoamento externo, o escoamento pode permanecer laminar até um número de Reynolds crítico de $Re_{crit} = 500.000$.

Abaixo desse número de Reynolds crítico, as forças viscosas se tornam suficientemente fortes para manter o escoamento da camada limite laminar, porém acima desse valor, o escoamento apresentará uma transição para turbulenta.

2.5. Linhas de Corrente, Trajetórias e Linhas de Emissão

Uma linha de corrente é definida como um conjunto de pontos que, em qualquer local do escoamento, estabelecem linhas paralelas ao movimento do fluido. Uma trajetória é uma linha no espaço traçada por uma única partícula do fluido liberada no escoamento a um determinado tempo inicial, t_0 . Uma linha de emissão é o lugar geométrico dos pontos representativos de todas as partículas que passaram por um ponto particular de escoamento em algum tempo anterior. Fisicamente, uma linha de emissão é gerada quando um pequeno injetor de corante é colocado em um escoamento para efeito de visualização e o corante é injetado continuamente no escoamento. A Figura 4 mostra linhas de corrente geradas pelo fluido ao longo de um perfil de asa utilizando de software CFD para visualização do escoamento [3].

Figura 4: Linhas de Corrente



Fonte: Mecânica dos Fluidos. (2006)

2.6. Análise Analítica do Coeficiente de Arrasto Volumétrico

Quando não se possui os valores de forças resultantes do arrasto, o coeficiente de arrasto volumétrico deve ser calculado através da equação empírica seguinte, onde é levado em consideração a geometria do modelo [4]:

$$C_{DVHW} = C_{Df} \frac{S_{wet}}{V^{2/3}} \left(1 + 1.5 \left(\frac{d}{\ell} \right)^2 + 7 \left(\frac{d}{\ell} \right)^3 \right) \quad (6)$$

Além do coeficiente de arrasto, o coeficiente de pressão deve ser observado. Considerando o fluxo turbulento, o C_{Df} é calculado através da equação (7) apresentada.

$$C_{Df} \cong \frac{0.044}{Re^{1/6}} \quad (7)$$

Observa-se que a eq. (3) faz o uso da área superficial do modelo. Tendo em vista a complexidade de se calcular tal parâmetro, para a exequibilidade do processo existe a necessidade de utilizar-se de softwares CAD (Computed aided design) os quais possibilitam após o desenho em vistas de 3 dimensões a verificação da área superficial do dirigível.

Para calcular-se o coeficiente de arrasto quando se tem o módulo força obtido através de experimentos ou simulações, a equação (3) é utilizada.

2.7. Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional

A dinâmica dos fluidos computacional CFD, é largamente utilizada em engenharia para se obter as soluções aproximadas dos problemas de escoamento de fluidos. O programa CFD utiliza as equações de Navier-Stokes e as resolve por aproximações numéricas. Para isso, devem ser estabelecidas aproximações para cada uma das derivadas contidas nas equações. Esses valores podem ser obtidos utilizando as séries de Taylor [3].

2.7.1. Modelagem da Turbulência

As simulações computacionais dos escoamentos laminares dos fluidos newtonianos geralmente são mais acuradas. Entretanto, os escoamentos turbulentos apresentam dificuldades mais desafiadoras. Conforme discutido anteriormente [3], as tensões de Reynolds que surgem nas equações de Navier-Stokes baseadas em médias de Reynolds devem ser modeladas. Os dois tipos de modelos de turbulência mais utilizados são

- RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). É o mais simples, o mais rápido, o menos acurado e fornece menos informações. Não apresenta bons resultados para escoamentos oscilatórios e transientes.
- LES (Large Eddy Simulation). Apresenta um bom compromisso entre acurácia e detalhes de um modelo e o tempo computacional de execução.

Em ambos os modelos são utilizados sistemas de referência eulerianos.

2.7.1.1. Características da Turbulência

A escala de comprimento integral, l_I , é a maior escala de movimento turbulento. Ela pode ser determinada experimentalmente realizando-se medias simultâneas da velocidade em dois pontos e procedendo-se a uma análise de correlação. A menor escala é a escala de Kolmogorov, l_k , que é a escala na qual as forças viscosas se igualam às forças inerciais/cinéticas. Nas escalas inferiores à escala de Kolmogorov os efeitos de amortecimento eliminam qualquer movimento turbulento. A razão entre a escala de Kolmogorov e a escala integral, é proporcional ao número de Reynolds de turbulência elevado à potência de $-3/4$,

$$\frac{l_k}{l_I} \approx Re_t^{-\frac{3}{4}} \quad (8)$$

em que Re_t é definido como

$$Re_t = \frac{u_{RMS} l_I}{\nu} \quad (9)$$

Nos motores, tem-se constatado que a raiz média quadrática (RMS) da intensidade da turbulência no interior de um cilindro é proporcional à velocidade média do pistão: $u_{RMS} \sim \left(\frac{1}{2}\right) U_{pistão}$. Em uma DNS (Direct Numerical Simulation) todas as escalas de comprimento em turbulência devem ser resolvidas. Nos casos em que a DNS não seja uma solução viável (quase sempre em todos os problemas práticos), as simulações do escoamento turbulento requerem a introdução de um modelo de turbulência. A LES e a RANS, com o modelo k-ε ou com o modelo das tensões de Reynolds, são duas técnicas para se tratar da turbulência sem resolver todas as escalas de comprimento [4].

No modelo k-ε o parâmetro k representa a energia cinética por unidade de massa média da turbulência e o parâmetro ε á a taxa de dissipação da energia cinética na turbulência. A viscosidade turbulenta efetiva ou difusividade é

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

A escala de comprimento turbulento média é

$$l \approx \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (11)$$

A escala de tempo é

$$\tau \approx \frac{k}{\varepsilon} \quad (12)$$

A escala de velocidade é

$$u_{RMS} \approx \sqrt{k} \quad (13)$$

As variações do modelo k-ε incluem o grupo de renormalização k-ε RNG (re-normalization group), k-ε realizável e k-ω, entre outros.

A formulação RANS não é um modelo, mas sim um sistema de referência que apresenta as equações transientes de Navier-Stokes de forma que as tensões de Reynolds são os únicos termos que devem ser modelados. Todos os demais podem ser resolvidos diretamente. Assim, é resolvida uma versão completa das equações de governo, as quais introduzem essas novas tensões aparentes conhecidas como tensões de Reynolds. Esse procedimento adiciona um tensor de segunda ordem de incógnitas, para o qual diversos modelos poder resultar em diferentes níveis de fechamento. Os modelos de turbulência utilizados para fechar as equações são válidos apenas enquanto ocorre o período ao longo das variações na média e, é grande em comparação às escalas de tempo do movimento turbulento contendo a maior parte da energia.

2.7.2. Limitações do CFD

É importante lembrar que os códigos CFD apresentam ferramentas de engenharia e, como qualquer outra ferramenta, ele tem ótimo uso e também limitações. É importante notar

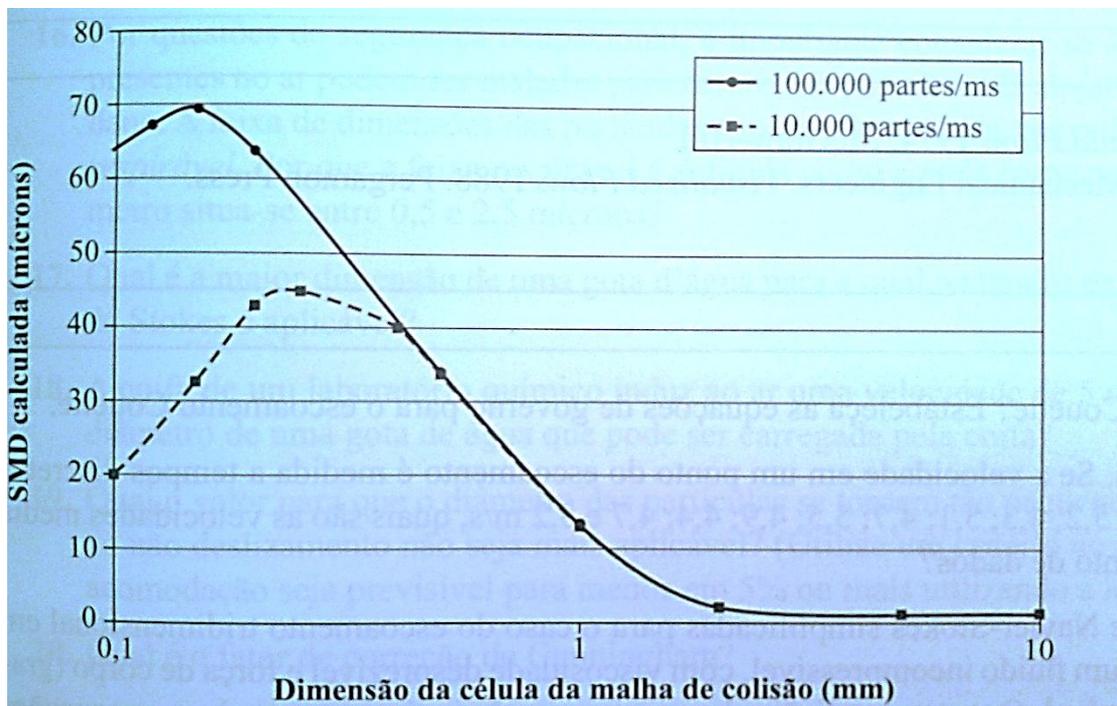
que os códigos CFD fornecem respostas aproximadas, e não soluções exatas, das equações de Navier-Stokes.

As principais limitações são:

- Erros numéricos
- Erros de modelagem
- Aplicações de condições de contorno
- Geometrias complexas
- Interpretação de resultados

Os erros numéricos incluem erros que surgem de o fato das células da malha de dimensão finita serem utilizadas para mapear uma função contínua. Quanto menores forem as células da malha, mais acurada será a solução numérica, porém sempre haverá algum erro numérico. Se o problema é altamente dinâmico e ocupa uma grande faixa de escalas, o uso de métodos de refinamento de malha adaptativa é recomendado. A figura 5 mostra um exemplo de alteração de parâmetro no cálculo de um borrifo quando a dimensão da malha utilizada na simulação é alterada [3].

Figura 5: Erro inerente à geração da malha



Fonte: Livro Mecânica dos Fluidos. (2006)

Os erros de modelagem geralmente surgem nos casos em que o entendimento da mecânica dos fluidos básica não está completo. Exemplos incluem a turbulência, o comportamento

da viscosidade de fluidos complexos, como polímeros e plásticos, e a interação entre múltiplos fluidos, como em um spray. As condições de contorno também podem ser de relativa complexidade. Nos casos de contornos rígidos, essas condições são implementadas diretamente. As condições de não deslizamento e sem vazamento geralmente podem ser admitidas. Os contornos abertos são mais problemáticos. Por exemplo, aplicando a modelagem de um escoamento através de um sistema de exaustão para a atmosfera, onde aplicado um valor de pressão ou velocidade na saída do fluxo, uma solução possa estar sendo pressuposta. Para qualquer modelo, as condições de contorno devem ser corretamente aplicadas. Essas podem de ser fechadas ou abertas, naturais, de pressões especificadas, ou de gradientes nulos.

Uma última limitação do CFD é a enorme quantidade de dados que um código moderno pode produzir em um computador relativamente rápido. Senda essa quantidade absurdamente alta.

É necessário analisar bem a situação inicial para que se possa compreender a aplicação do problema, quais os métodos de criação e refinamento de malha, aplicação de contorno e análise dos resultados. Levando em consideração que o software é apenas uma ferramenta, tendo o responsável saber interpretar os dados corretamente, sendo ele, engenheiro, um professor ou estudante que irá analisar os resultados. Podendo assim, oferecer as corretas soluções ao processo [3].

3. MÉTODOS

3.1. Analítico

O método analítico consiste no conjunto de passos necessários para se obter conhecimentos válidos por meio de instrumentos fiáveis. Possibilitando a capacidade de reprodutibilidade e na falseabilidade. Destacando-se a observação, a indução, a projeção da hipótese, a demonstração ou refutação da hipótese, e a apresentação, baseando-se na lógica empírica ao distinguir os elementos e dos fenômenos envolvidos no estudo da mecânica dos fluidos, mais propriamente em aerodinâmica, aplicando-os, e analisando seus resultados e relações.

Para tais análises empíricas, algumas formas da literatura são selecionadas afim de se obter e confirmar o resultados já existentes. Ao todo quatorze formas distintas de

dirigíveis foram selecionadas com diferentes relações de comprimento e diâmetro, as quais são demonstradas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1: relações geométricas dos modelos

Modelo	d	ℓ	λ	V	S_{Wet}
C-class⁶	195,6	195,5902	1,00	3,79E-3	1,20E-1
	195,6	292,1000	1,50	5,72E-3	1,60E-1
	195,6	391,0584	2,00	7,62E-3	2,04E-1
	195,6	586,7400	3,00	1,14E-2	2,915E-1
	195,6	903,7320	4,62	1,78E-2	4,38E-1
	195,6	1173,4800	6,00	2,29E-2	5,65E-1
	195,6	1564,5384	8,00	3,05E-2	7,48E-1
	195,6	1955,9016	10,00	3,81E-2	9,33E-1
Akron⁷	40000,0	239000,00	5,92	2,08E+5	2,42E+4
Esfera⁸	200,00	200,00	1,00	2,8E-3	9,62E-2
ZMC-2⁹	640,00	1720,00	3,00	3,1E-1	2,75E+0
SSZ¹⁰	183,00	869,00	4,75	1,5E-2	3,98E-1
Shenandoah¹¹	200,00	1720,81	8,60	3,5E-2	8,085E-1
R26¹²	120,13	1223,01	10,18	1,2E-2	4,285E-1
TUCUXI	4,801	16,7	3,48	4,88E+2	3,89E+2

Fonte: Autor (2015)

Utilizando-se dos dados das formas apresentados na tabela anterior e os aplicando na eq. (1) temos os resultados analíticos do coeficiente de arrasto, os quais são apresentados na tabela 2 a seguir, onde os mesmos são comparados com os resultados experimentais de cada modelo, fornecendo informações sobre o coeficiente de arrasto volumétrico analítico e experimental, de acordo com sua razão de espessura. Valor referenciado entre os existentes na literatura e os calculados e suas porcentagem de erro experimental, que consiste na subtração do $C_{DV} Exp.$ pelo C_{DVHW} , e os dividindo pelo C_{DVHW} .

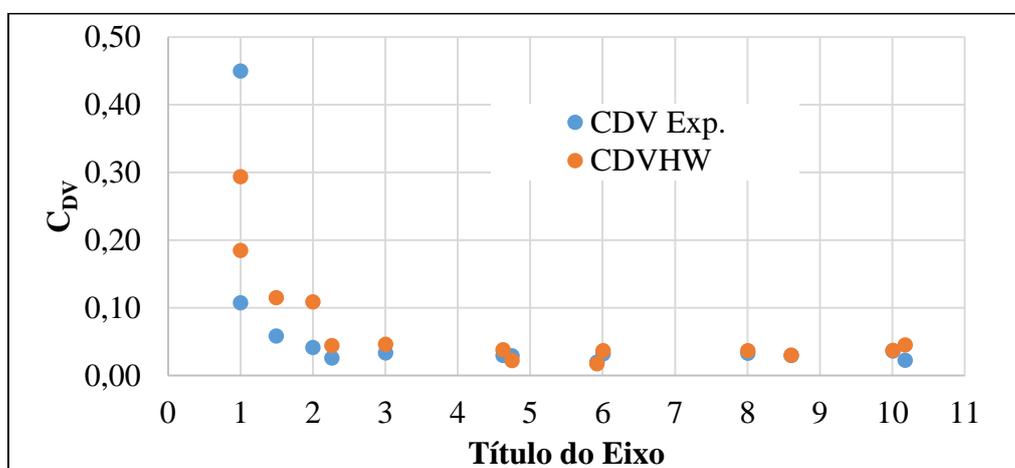
Tabela 2: Comparativo entre os resultados experimentais e analíticos

Modelo	λ	$C_{DV} Exp.$	C_{DVHW}	$C_{DV} Exp./C_{DVHW}$	%
C-class⁶	1,00	0,1075	0,2941	0,3656	63
	1,50	0,0585	0,1153	0,5075	49
	2,00	0,0415	0,1089	0,3814	62
	3,00	0,0336	0,0465	0,7229	28
	4,62	0,0299	0,0383	0,7801	22
	6,00	0,0324	0,0371	0,8716	13
	8,00	0,0330	0,0368	0,8974	10
	10,00	0,0364	0,0373	0,9780	2
Akron⁷	5,92	0,0199	0,0174	1,1443	14
Esfera⁸	1,00	0,4500	0,1851	2,4309	143
ZMC-2⁹	3,00	0,0260	0,0442	0,5876	41
SSZ¹⁰	4,75	0,0292	0,0332	0,8787	12
Shenandoah¹¹	8,60	0,0299	0,0305	0,9830	2
R26¹²	10,18	0,0228	0,0454	0,5024	50
TUCUXI	3,48	-	0,0233	-	-

Fonte: Autor (2015)

A figura 6 demonstra a proximidade dos valores de $C_{DV} Experimental$ e C_{DVHW} , onde este é calculado utilizando-se da equação empírica (6).

Figura 6: Gráfico Coeficiente de arrasto experimental e analítico



Fonte: Autor. (2015)

3.2. Simulação

As simulações foram realizadas em ambiente virtual através de aplicativo de mecânica dos fluidos, hospedado em nuvem o qual sua versão e licença de utilização é de caráter acadêmico, disponibilizado para o próprio autor.

Todas as formas de dirigíveis utilizadas para comparação através de equações empíricas foram ensaiadas utilizando software CFD, submetidas as velocidades 20, 30, 40, 50 e 60 M.P.H. (Milhas Por Hora), seguindo o padrão de medidas utilizados nos testes experimentais. A densidade e temperatura do ar em 1.2255kg/m^3 e 25° respectivamente. As dimensões do túnel virtual utilizado são aproximados aos valores do túnel empregado experimentalmente as quais são de quatro metros de altura e doze de comprimento.

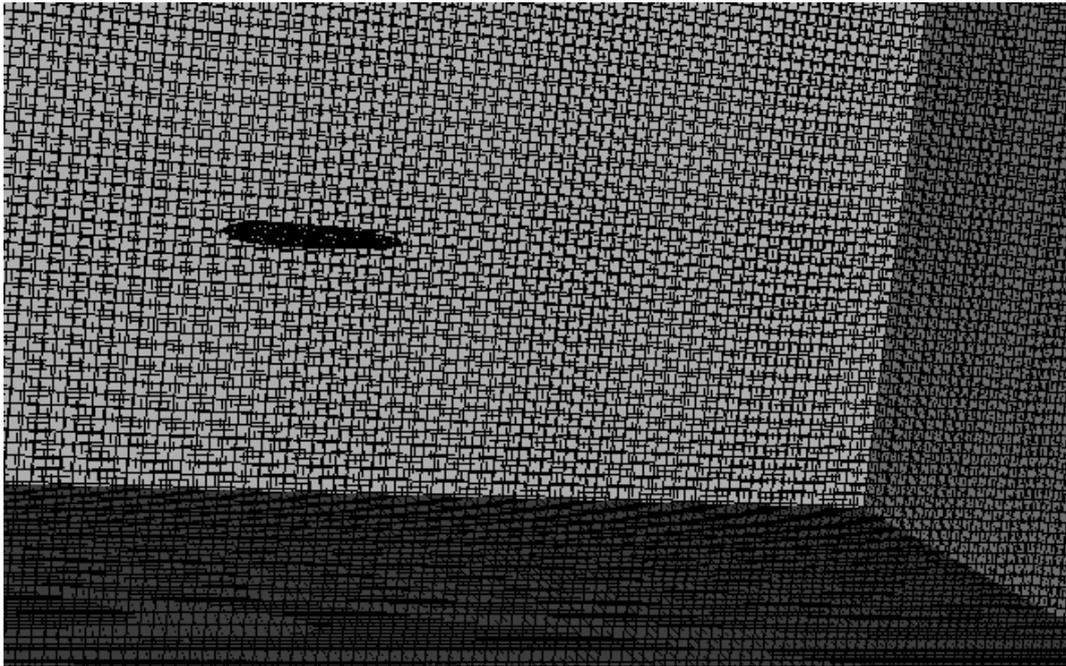
3.2.1 Construção da malha

O aplicativo utilizado oferece vários recursos de geração de malha para a criação de grids computacionais. Devido à sua robustez e aplicabilidade geral a funcionalidade atual concentra-se em três abordagens automatizadas, as quais são:

- Tetraedro automatizado
- Tetraedro parametrizado
- Tetraedro prismático de camada limite refinado
- Hexaedro automatizado dominante (SnappyHexMesh)

No presente trabalho utiliza-se o método de hexaedro dominante para escoamento externo [13]. A figura 7 a seguir demonstra o túnel virtual após a criação da malha.

Figura7: Malha do dirigível C-class 8



Fonte: Autor. (2015)

3.2.2 Configuração da simulação

As condições de contorno que se aplicam as simulações tem uma direta relação em todo processo, as quais envolvem, pressão, velocidade do fluido nas, entradas e saídas, bem como nas paredes e nos corpos submersos. Utilizou-se dos parâmetros de entrada sendo adotados a velocidade do fluido. A saída é a pressão zero e velocidade zero na superfície das paredes e do corpo submerso. Simulação de fluido incompressível e modelo de turbulência k-omega SST.

3.2.3 Demonstração dos resultados

Plotaram-se gráficos de curva polar de cada modelo a partir dos valores de coeficiente de arrasto relacionados com a força de arrasto de cada forma, a qual é fornecida pelo aplicativo utilizado. A tabela 3 contém os resultados dos métodos experimentais e simulados em aplicativo CFD, onde, os mesmos são comparados e demonstrados. Fornecendo informações sobre o coeficiente de arrasto volumétrico analítico e experimental, de acordo com sua razão de espessura. Valor referenciado entre os existentes na literatura e os calculados e suas porcentagem de erro experimental, que consiste na subtração do $C_{DV} Exp.$ pelo $C_{DV} Sim.$, e os dividindo pelo $C_{DV} Sim.$

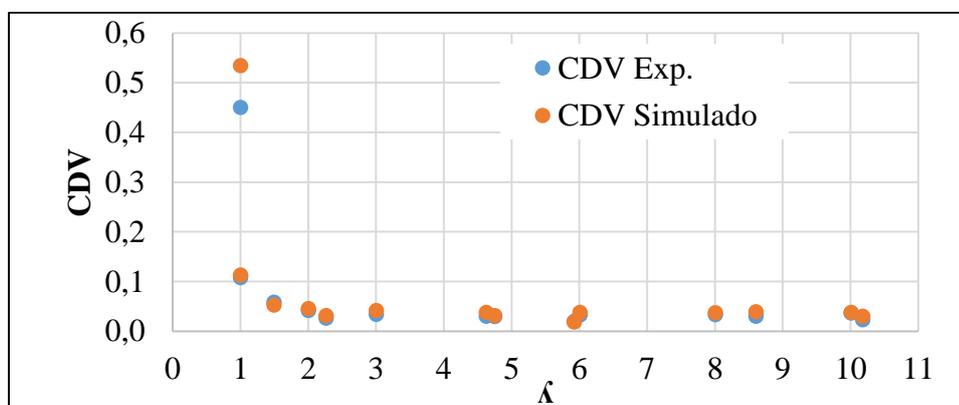
Tabela 3: Comparativo entre os resultados experimentais e simulados

Modelo	λ	$C_{DV} Exp.$	$C_{DV} Sim.$	C_{DV}	
				$Exp./C_{DV} Sim.$	%
C-class ⁶	1,00	0,1075	0,1128	0,9529	-5
	1,50	0,0585	0,0528	1,1082	11
	2,00	0,0415	0,0456	0,9101	-9
	3,00	0,0336	0,0414	0,8115	-19
	4,62	0,0299	0,0377	0,7930	-21
	6,00	0,0324	0,0375	0,8632	-14
	8,00	0,0330	0,0372	0,8888	-11
	10,00	0,0364	0,0375	0,9723	-3
Akron ⁷	5,92	0,0199	0,0184	1,0793	8
Esfera ⁸	1,00	0,4500	0,5341	0,8426	-16
ZMC-2 ⁹	3,00	0,0260	0,0315	0,8244	-18
SSZ ¹⁰	4,75	0,0292	0,0315	0,9258	-7
Shenandoah ¹¹	8,60	0,0299	0,0389	0,7690	-23
R26 ¹²	10,18	0,0228	0,0299	0,7615	-24
TUCUXI	3,48	-	0,0211	-	-

Fonte: Autor (2015)

Na figura 8 é plotado um gráfico no qual os resultados de $C_{DV} Exp.$ e $C_{DV} Simulado$ estão apresentados, onde é possível visualizar a proximidade dos resultados.

Figura 8: Gráfico dos coeficiente de arrasto experimental e simulado



Fonte: Autor. (2015)

A tabela 4 realiza um comparativo entre os resultados analíticos, experimentais e simulados, assim, é possível a observação de todos os dados finais necessários

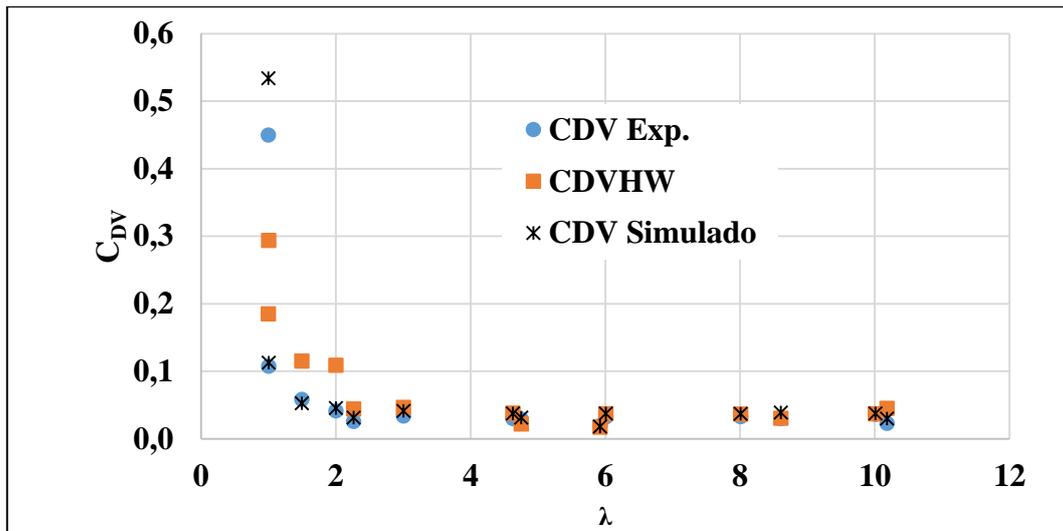
Tabela 4: Comparativo entre os resultados experimentais, analíticos e simulados

Modelo	λ	$C_{DV}Exp.$	$C_{DV}Sim.$	C_{DVHW}
C-class⁶	1,00	0,1075	0,1128	0,2941
	1,50	0,0585	0,0528	0,1153
	2,00	0,0415	0,0456	0,1089
	3,00	0,0336	0,0414	0,0465
	4,62	0,0299	0,0377	0,0383
	6,00	0,0324	0,0375	0,0371
	8,00	0,0330	0,0372	0,0368
	10,00	0,0364	0,0375	0,0373
Akron⁷	5,92	0,0199	0,0184	0,0174
Esfera⁸	1,00	0,4500	0,5341	0,1851
ZMC-2⁹	3,00	0,0260	0,0315	0,0442
SSZ¹⁰	4,75	0,0292	0,0315	0,0332
Shenandoah¹¹	8,60	0,0299	0,0389	0,0305
R26¹²	10,18	0,0228	0,0299	0,0454
TUCUXI	3,48	-	0,0211	0,0233

Fonte: Autor (2015)

Utilizando das informações da tabela 4, plotou-se o gráfico demonstrado na figura 9, onde podemos observar as relações dos coeficientes de arrasto experimental, empírico e analítico.

Figura 9: Gráfico dos coeficientes de arrasto experimental, analítico e simulado



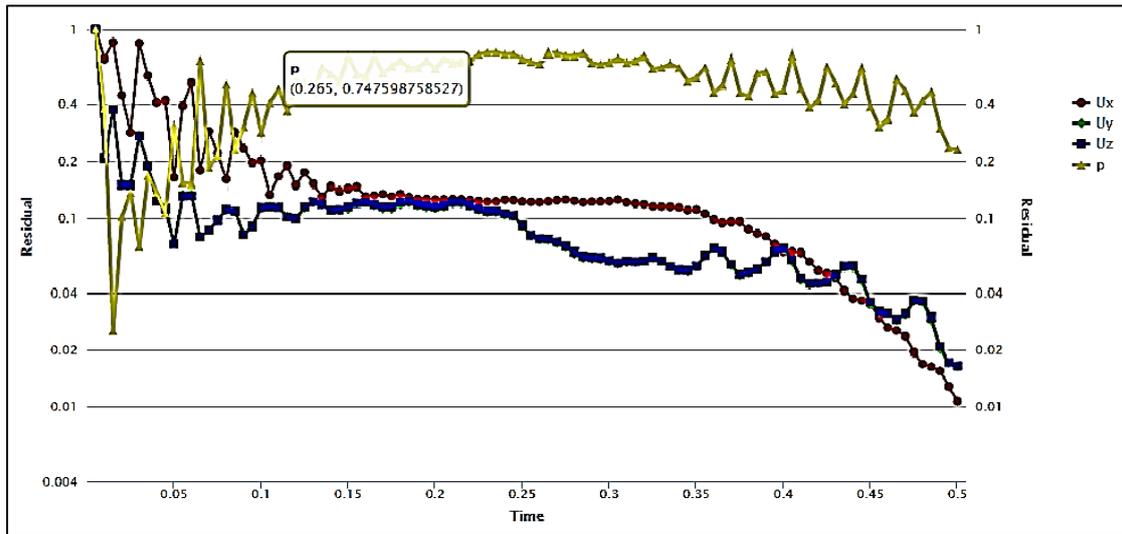
Fonte: Autor. (2015)

Comparando-se os parâmetros aerodinâmicos de cada dirigível foi comprovado os resultados em testes experimentais de acordo com (ZAHM 1928) da relação 4.62. Nos métodos analíticos e as simulações demonstram resultados aproximados.

A resolução e confiabilidade dos resultados através das simulações dependem principalmente dos aplicativos utilizados na geração de malha e solução das equações da continuidade e de Navier-Stokes.

Durante a realização das simulações, os gráficos de turbulência e energia podem ser observados, verificando-se o comportamento do escoamento durante do tempo de execução, observa-se na figura 10.

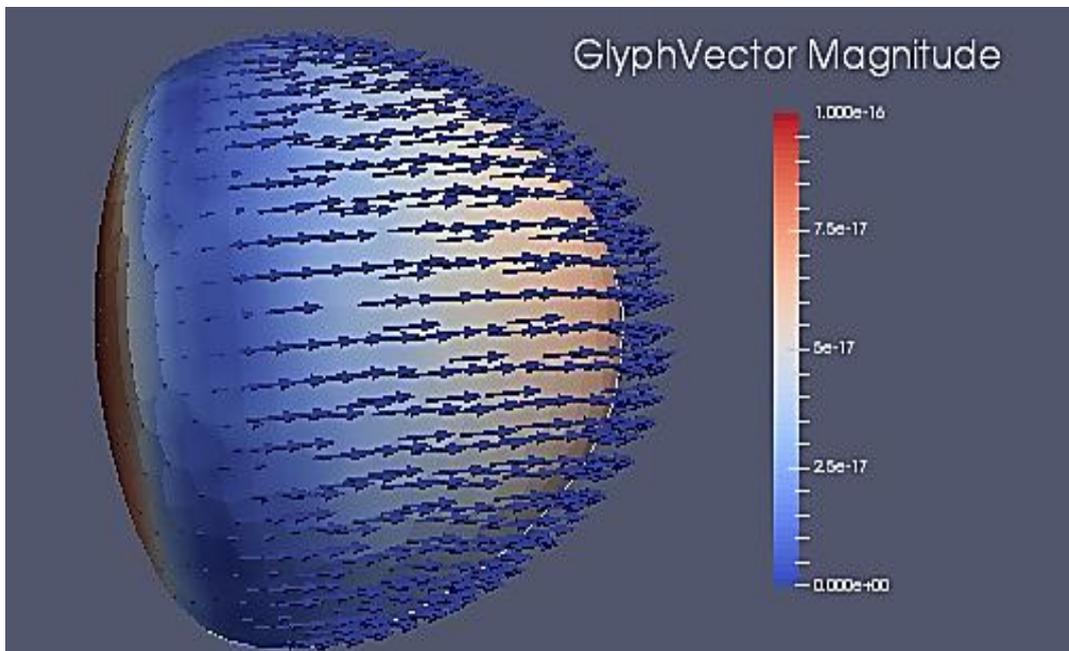
Figura 10: Gráfico da simulação em tempo real



Fonte: Autor. (2015)

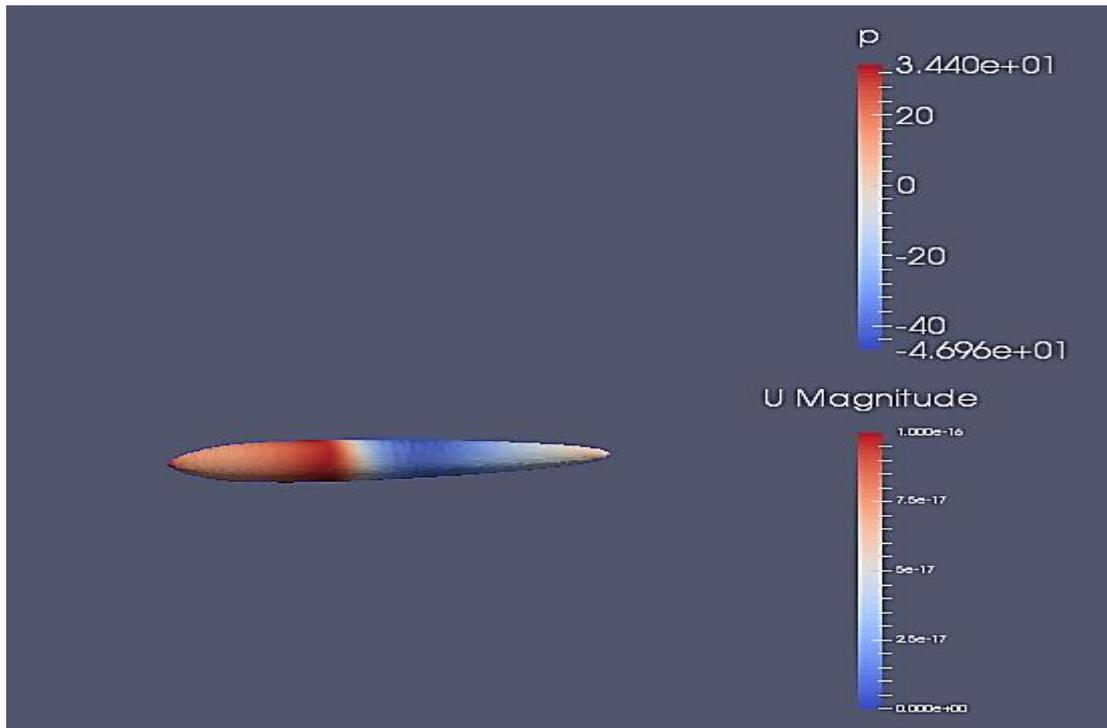
Nas figuras 11 e 12, podemos observar a qualidade final da simulação realizada em um software básico, onde temos a pressão e velocidade de escoamento do fluido envolvida no corpo submerso.

Figura 11: Escoamento ao redor do corpo



Fonte: Autor. (2015)

Figura 12: Gradiente de velocidade e pressão do escoamento ao redor do corpo



Fonte: Autor. (2015)

4 Conclusão

As análises de sistemas que envolvem transferência de energia e massa, dispendiosamente necessitam de longos estudos, aprimoramentos, testes, cálculos e simulações.

Através deste trabalho foi possível a demonstração dos estudos do coeficiente de arrasto volumétrico utilizando-se dos principais métodos, os quais foram possíveis graças a existência de aplicativos computacionais gratuitos para as simulações e então, comparações com os métodos tradicionais analíticos e experimentais.

Foi identificado o grau de confiabilidade dos resultados das simulações e equações empíricas através da proximidade dos valores obtidos com os experimentais existentes na literatura. Identificou-se que para certas razões de espessura do corpo e formato, o coeficiente de arrasto pode-se ser significativamente melhor.

Os longos estudos realizados sobre mecânica dos fluidos, CFD e aerodinâmica foram altamente satisfatórios e empregados no desenvolvimento de uma nova forma para um dirigível do projeto TUCUXI. Obtivemos baixo coeficiente de arrasto volumétrico quando observamos e comparamos com os demais dirigíveis da literatura.

Por se ter um baixo coeficiente de arrasto, a quantidade de energia necessária para se possa locomover o dirigível será relativamente baixa, necessitando equipamentos com menor peso, o que possibilita também melhor estabilidade e facilita sua locomoção. Sendo possível acrescentar equipamentos outros de observação à plataforma do dirigível

5 Referências

- [1] Dewachter. H. Lyrio, M. Macro factors and the term structure on interest rates. Ohio, USA: Ohio State University Press, 2006. Pp 119-140.
- [2] Talay, T. Introduction to the Aerodynamics of flight. NASA SP-367, 1975.
- [3] Post, S. Applied and computational fluid mechanics. Bradley, USA. Bradley University, 2011.
- [4] Hoerner, S.F. Fluid dynamic drag. s.I.: Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown, U.S.A., 1965.
- [5] White, F. Viscous Fluid Flow. McGraw-Hill. 1974.
- [6] Zahm, A. F. Smith, R. H. and Louden, F. A. Drag of C-Class airship hulls of various fineness ratios, NACA TR 291, Washington 1928.
- [7] Huger B. Fiebman. Force measurements on a 1/40-scale model of the U.S. Airship “Akron”, NACA TN 432, 1933.
- [8] Achenbach, E. Experiments on the flow past sphere at very high Reynolds numbers. Journal of fluid mechanics, vol 54, 1972, pp 565-575.
- [9] Dorrington, G.E. Drag of Spheroid-Cone Shaped Airship. JOURNAL OF AIRCRAFT, March-April 2006.
- [10] Frazer, R. A., B. A., B.Sc., and Simmons L. F. G., B.A., A.R.C.Sc. Investigation of the forces and moments upon a complete model airship of type S.S.Z. with an analysis of the effects of full and partial rigging, Reports and Memoranda, 457 Jul 1918.
- [11] Zahm, A. F. Smith, R. H. and Louden F. A. Air Forces, Moments and Damping on model of fleet airship Shenandoah, NACA TR 215, Washington 1922.
- [12] Pannell, J. R. A.M.I.M.E. and R. A. Frazer, B. A. Account of some experiments on rigid airship R.26, Reports and Memoranda, No. 674, January, 1920.
- [13] SimScale User Guide. 2015.