

## OTIMIZAÇÃO AERODINÂMICA DE UMA FUSELAGEM PARA A COMPETIÇÃO SAE BRASIL DE AERODESIGN

Otacílio Pires de Freitas Neto; Maria Adalia de Almeida Ramos; Gabriel Silva Vieira;  
Orientador: Francisco José Simões.

*Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); [adalia082@gmail.com](mailto:adalia082@gmail.com) ;  
[otacilio.engmecanica@gmail.com](mailto:otacilio.engmecanica@gmail.com); [gabrielsv063@gmail.com](mailto:gabrielsv063@gmail.com)*

**Resumo:** Este artigo apresenta a otimização aerodinâmica da fuselagem de uma aeronave não tripulada, rádio controlada, participante da competição SAE *Aerodesign* Brasil 2017 na classe micro, representada pela Equipe ParahyAsas Micro. Com exceção da asa, geralmente para aeronaves cargueiras a superfície que gera maior arrasto é a fuselagem, contribuindo negativamente para a aceleração, conseqüentemente diminuindo a carga final a ser sustentada em voo. Como a resistência ao escoamento do fluido varia com a geometria da superfície, e o intuito era voar com a maior carga possível dentro dos limites geométricos de projeto criados baseados no regulamento da competição, buscou-se por meio de simulação CFD (*computational fluid dynamics*) otimizar a geometria original da fuselagem para que gerasse o menor arrasto possível. Primeiramente procurou-se validar o software utilizado, simulou-se uma esfera e posteriormente comparou-se os dados obtidos com dados experimentais já existentes, obtendo um erro de 3,3%. As simulações seguintes foram feitas em duas etapas, ambas assim como a esfera, no software Autodesk CFD®, com número de Reynolds de 119273, utilizando o modelo de turbulência SST-k ômega. Na primeira, com objetivo comparativo, foram feitas simulações numéricas em 2D, a princípio com a configuração inicial da fuselagem, a partir dela foram criadas outras até se chegar a configuração considerada ideal. Na segunda etapa, foram realizadas simulações em 3D com a configuração original e a escolhida, obtendo-se uma redução de pouco mais de 30% da força de arrasto, o que se mostrou satisfatório.

**Palavras-chave:** CFD, força de arrasto, otimização.

### INTRODUÇÃO

Atualmente com a evolução da eficiência de processamento dos computadores e a decorrente diminuição do seu valor financeiro, e também com o advento da indústria 4.0 (4ª revolução industrial), na qual é possível fazer simulação em nuvem (*cloud computing*), possibilitando a análise e processamento massivo de dados (*Big data Analytics*), técnicas computacionais mostram-se expandir em diversas áreas científicas, aerodinâmica é uma delas. Simulações CFD passaram a ser utilizadas com maior frequência, pois estão em contínuo progresso, fornecendo resultados de forma mais exata cada vez em menor tempo.

A aerodinâmica passou a ganhar notoriedade somente a partir da manifestação do desejo de diminuição de atrito para os meios de transporte. Com isso, tornou-se de extrema importância a criação de superfícies que possibilitem maiores velocidades e pouco atrito com o ar, o que gerou um avanço no estudo da aerodinâmica. (Anderson, 2001).

A fuselagem de uma aeronave tem como papel acoplar todos os componentes estruturais, tal como o compartimento de carga, a carga paga (carga útil) e a fixação dos componentes.

A maior desventura da fuselagem é que com exceção da asa, em geral para aeronaves cargueiras ela é a superfície que gera maior força de oposição ao movimento.

Em projetos como os destinados a competição SAE Aerodesign na classe micro, produzem-se aeronaves cargueiras, rádio controláveis. De acordo com a Equipe ParahyAsas Micro, no ano de 2017 projetou-se uma aeronave com limitações geométricas conforme o regulamento da competição, assim sendo, ela deveria ser leve, ocupando o menor espaço possível dentro de uma caixa.

Portanto, a configuração escolhida para a fuselagem desta foi a treliçada, no entanto robusta, o ponto de refino encontrado para solucionar tal problema foi a redução de arrasto. Assim sendo, o objetivo desse estudo foi realizar uma otimização aerodinâmica com auxílio de simulação CFD para modelar a estrutura da fuselagem de modo com que ela oferecesse a menor resistência ao escoamento, assim aumentando a velocidade final e conseqüentemente aumentando a capacidade de carga da aeronave, tornando a equipe mais competitiva.

## METODOLOGIA

### Geometria da fuselagem

A grande vantagem das estruturas treliçadas usadas na fuselagem estão na sua leveza e resistência, características amplamente buscadas em projetos aeronáuticos, entretanto seu grande problema está no alto coeficiente de arrasto quando comparado a outros tipos de estruturas mais “arredondadas”, como por exemplo a monocoque e a semi-monocoque.

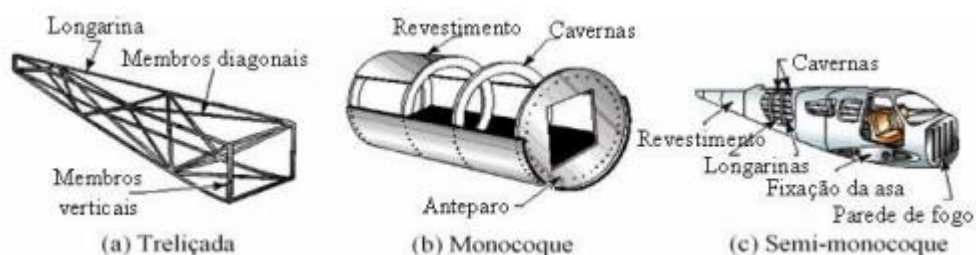


Figura 1. Exemplos de formas construtivas da estrutura da fuselagem. Fonte: Miranda (2009, p. 16)

Para tentar contornar esse inconveniente da melhor maneira possível, pegou-se uma geometria inicial simplificada (Figura 2), onde observa-se uma brusca descontinuidade ao fim da mesma responsável por uma grande parcela do arrasto de pressão.

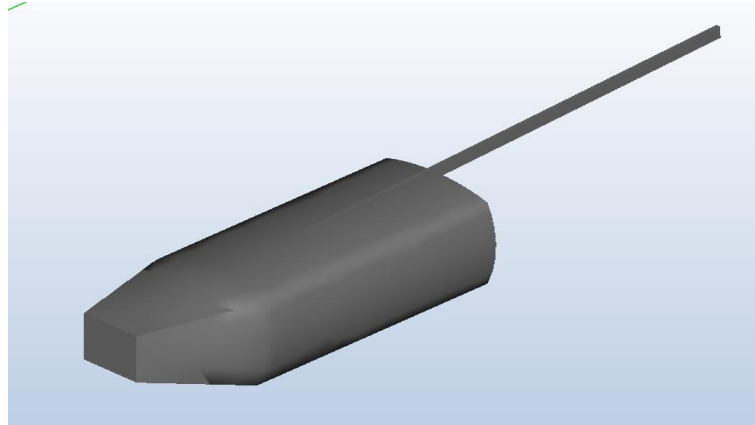


Figura 2. Concepção inicial da fuselagem. Fonte: Autoria própria.

A partir disso foram feitas alterações a fim de perfilar essa descontinuidade para reduzir os efeitos do arrasto na mesma. Gerou-se diversos modelos com diferentes ângulos de perfilamento, também se adicionou um abaulamento na parte inferior de algumas com objetivo de imitar uma estrutura monoque e permitir uma transição mais suave ao longo do corpo e conseqüentemente menor arrasto.

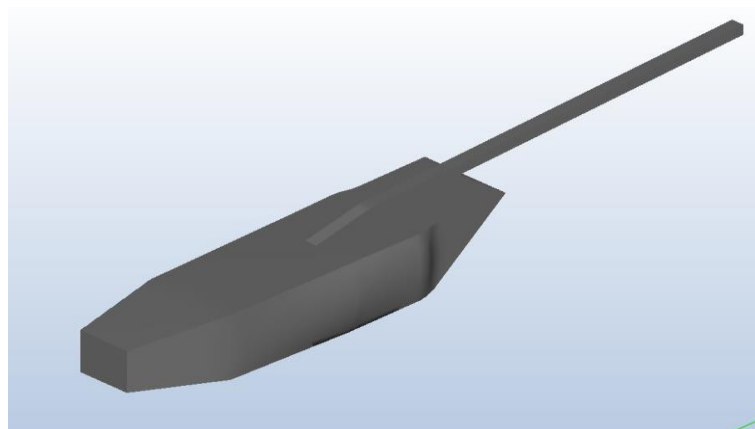


Figura 3. Concepção final da fuselagem. Fonte: Autoria própria.

### **Fluidodinâmica computacional**

Fluidodinâmica Computacional, do inglês Computational Fluid Dynamics (CFD), é uma ferramenta computacional para simulação do comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. CFD resolve as equações de escoamento do fluido sobre uma região de interesse, com condições iniciais e de contorno conhecidas.

Atualmente esta ferramenta trabalha com três tipos de abordagem diferentes:

- O método das diferenças finitas;
- O método dos volumes finitos;
- O método dos elementos finitos.

Para o escopo do trabalho focou-se no método dos elementos finitos, pois esta é a abordagem empregada pelos softwares comerciais de CFD e é a mais empregada atualmente em todas as áreas, principalmente na aeronáutica.

Segundo White (2011), o método de elementos finitos aplica-se a todos os tipos de equações diferenciais parciais lineares e não lineares em física e engenharia. O domínio computacional é dividido em pequenas regiões, normalmente triangulares ou quadrilaterais. Essas regiões são delimitadas com um número finito de nós, onde as variáveis de campo — temperatura, velocidade, pressão, função corrente, etc. — devem ser calculadas. A solução em cada região é aproximada por uma combinação algébrica dos valores nodais locais. Em seguida, as funções aproximadas são integradas sobre a região e seu erro é minimizado, em geral pelo uso de uma função peso. Esse processo conduz a um sistema de  $N$  equações algébricas para os  $N$  valores nodais incógnitos. As equações nodais são resolvidas simultaneamente, por inversão de matrizes ou iteração.

Para encontrar qual dos modelos gerados apresenta melhor comportamento durante o voo é necessário que seja calculado com a devida precisão o arrasto gerado por cada uma delas. Portanto utilizando a ferramenta da fluidodinâmica computacional fez-se uso do software Autodesk CFD®. Inicialmente para fins de comparação das geometrias foram feitas as simulações em 2D, ao se escolher a mais apropriada, fez-se uma nova simulação em 3D para obter com precisão os campos de velocidade e pressão, e a força de arrasto.

Em qualquer simulação de elementos finitos é fundamental a validação do modelo para garantir que os resultados obtidos e o modelo de simulação em uso estejam em concordância com a realidade, para tal, foi feita uma simulação de uma geometria com resultados conhecidos na literatura, no caso presente foi uma esfera, fazendo uso da mesma modelagem que posteriormente foi empregada nas fuselagens. Em posse desse resultado comparou-se os valores oferecidos pelo modelo computacional com os valores já conhecidos de dados experimentais e a partir disso calculou-se o erro obtido.

A malha é onde serão discretizados os elementos que compõe a geometria do modelo de simulação, logo, quanto menor os elementos de malha maiores serão os detalhes com que se observa o fenômeno estudado e mais preciso serão os resultados finais obtidos, entretanto maior será a quantidade de memória alocada ao computador e maior a quantidade de equações a se resolver por ciclo, tornando assim o processo iterativo mais lento. É interessante, pois, que tenhamos uma malha mais refinada nas regiões de maior importância para o estudo e que as regiões de menor relevância tenham uma discretização mais grosseira, afim de não comprometer o poder de processamento da máquina. Na figura abaixo vemos como isso foi feito para este modelo de estudo.

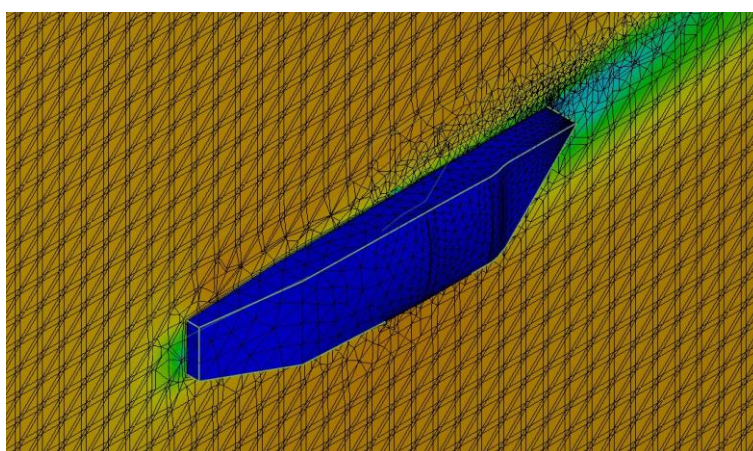


Figura 4. Malha tetragonal aplicada ao modelo. Fonte: Autoria própria

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Validação da Simulação CFD**

Inicialmente, para que fosse possível obter resultados coerentes utilizando o software Autodesk CFD, fez-se uma análise de validação da ferramenta. Simulando uma geometria já conhecida, no caso, uma esfera, foi possível obter a força de arrasto gerada pela mesma e, consequentemente, o coeficiente de arrasto.

Para que a validação pudesse ser realizada, foram comparados valores de coeficiente de arrasto obtidos pelo CFD e coeficientes de arrasto obtidos por curvas experimentais. Segundo MORRISON (2013), o coeficiente de arrasto de uma esfera se comporta em função do número de Reynolds, como mostra a figura 4.

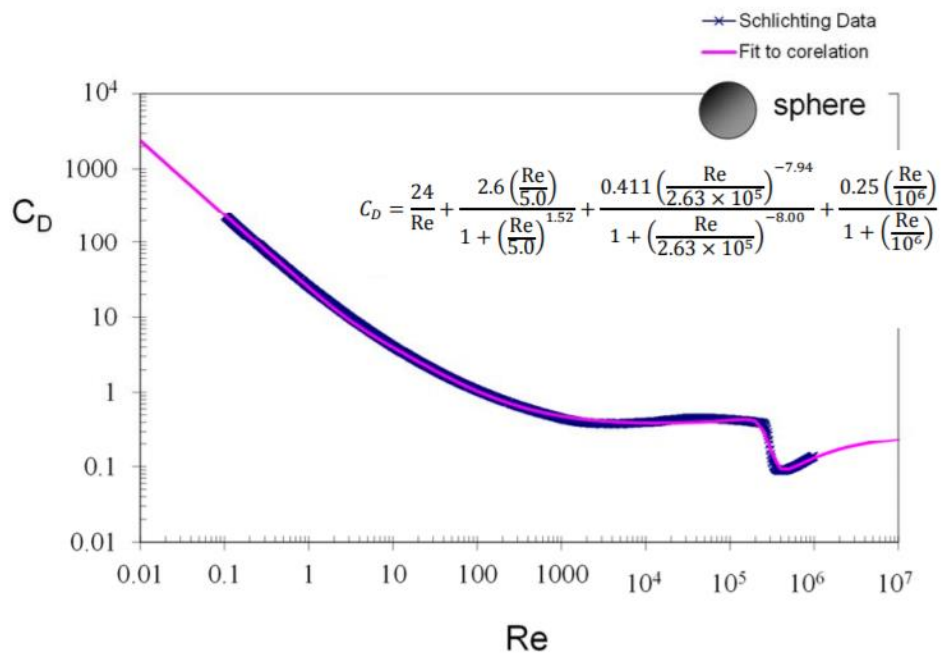


Figura 5. Dados experimentais do coeficiente de arrasto de uma esfera em função do número Reynolds. Também, equação obtida para o coeficiente de arrasto. Fonte Morrison, 2013.

Na validação, a simulação foi realizada utilizando uma esfera de dimensão 18 centímetros de diâmetro. A adaptação de um túnel de vento utilizado em CFD segue as recomendações do software, para que as paredes do túnel estejam a uma distância mínima que não interfiram o escoamento que inside na geometria.

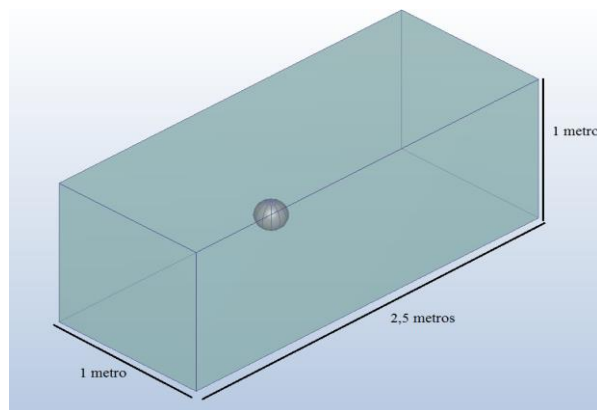


Figura 6. Dimensões túnel de vento. Autor: Autoria Própria.

Em seguida, determinaram-se as propriedades do fluido para que os valores obtidos se atinjam um número de Reynolds existente na figura 4 e assim a comparação possa ser realizada. Utilizou-se de um número de Reynolds de 119273, utilizando a seguinte expressão.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Sabendo que  $\rho$  referencia a densidade do ar,  $v$  a velocidade do escoamento,  $D$  o diâmetro da esfera e  $\mu$  a viscosidade do ar.

As condições de contorno utilizadas foram 10 m/s a velocidade do escoamento na entrada do túnel de vento e pressão de 1 atm na saída. O modelo de turbulência adotado foi o *SST k- $\omega$* , utilizado para resolução de um conjunto de equações que são resolvidas numericamente.

Buscou-se, com essa análise, adquirir um número de elementos de malha que gerasse um erro de no máximo 4% em relação aos dados experimentais. Simulações foram processadas até que se fosse obtido resultados satisfatórios. Na simulação obtida, foram gerados um número de 967.300 elementos de malha e 233.079 nós de malha. O valor final foi um coeficiente de arrasto gerado pela esfera de 0.403.

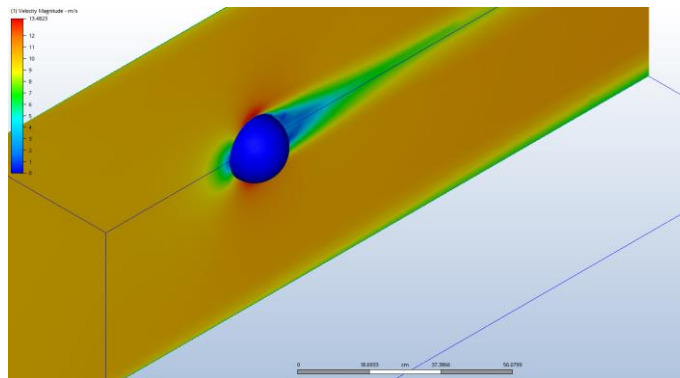


Figura 7. Gradiente de velocidade do escoamento sobre uma esfera em simulação CFD. Autor: Autoria Própria.

Comparando o coeficiente de arrasto obtido em simulação com o coeficiente extraído de dados experimentais expostos por MORRISON (2013), obteve-se um erro de 3,3%, concluindo que o método utilizado para a obtenção da força de arrasto em uma proposta de fuselagem é válido.

### Otimização da Fuselagem

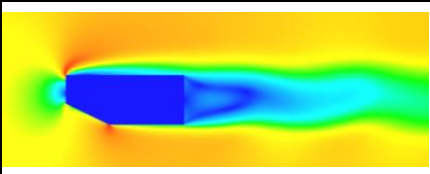
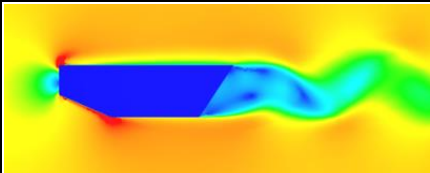
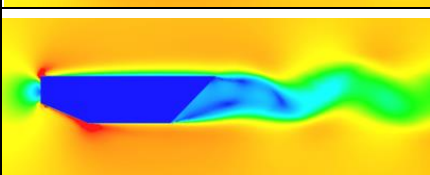
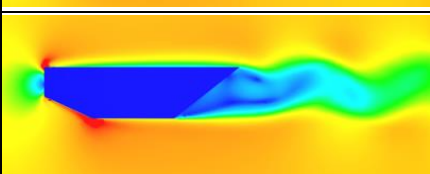
Analisando a geometria da fuselagem concebida pela equipe ParahyAsas de Aerodesign, foi concluído que a força de arrasto gerada pela mesma foi acima do previsto, necessitando que a mesma fosse otimizada para que a aeronave se tornasse hábil a carregar uma maior quantidade de carga paga, se tornando assim mais competitiva.

Em consulta com a equipe ParahyAsas, para que a aeronave mantivesse seu limite geométrico, foram determinados pontos específicos que a estrutura poderia ser modificada, sendo esses a parte traseira da fuselagem e um

aumento mínimo em espessura da mesma. Kentfield (1985), sugere que, adicionando um corpo após a fuselagem com o intuito de que o escoamento possa seguir de uma melhor maneira a geometria, e por consequência, diminuir a força de arrasto.

Inicialmente, a proposta abordada para diminuição da força de arrasto foi a adição de um corpo de formato triangular após a fuselagem. Essa geometria adicional tem o intuito de suavizar a separação do escoamento, sem que prejudique a função da aeronave. Foram selecionadas quatro diferentes angulações para esse corpo, sempre levando em consideração a missão da aeronave de extrair carga pelo final de sua fuselagem. Além da adaptação citada, foram testados pequenos arredondamentos na geometria, na tentativa de minimizar ainda mais a separação do escoamento.

Sabendo que simulações CFD em três dimensões requisitam muito do hardware a ser utilizado, adaptou-se a análise inicial a simulações em duas, para que de forma comparativa, fosse possível selecionar a melhor adaptação. A tabela 1 mostra com clareza as simulações realizadas das diferentes adaptações em comparação com a concepção inicial.

Tabela comparativa		
Simulação 2D Adaptações	Angulação corpo	Força de Arrasto(N)
	0° (concepção inicial)	0,146
	35°	0,122
	45°	0,119
	55°	0,1225



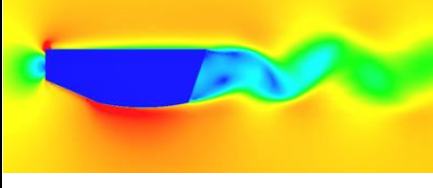
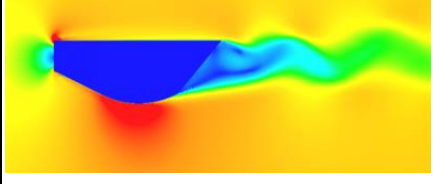
	20 ° + arredondamento	0,1243
	45 ° + arredondamento	0,114

Tabela 1. Comparação de diferentes adaptações para fuselagem. Fonte: Autoria própria.

Analisando os valores obtidos de força de arrasto, foi possível concluir que a adaptação com um corpo adicional a 45° e arredondamento na parte inferior da fuselagem obteve a maior diminuição da força de resistência ao movimento em comparação com a configuração inicial.

### **Concepção Final**

Após a obtenção da concepção adaptada, foi desenhada a geometria de forma espacial considerando as limitações já propostas pela equipe ParahyAsas, utilizando o software de desenho assistido por computador, Autodesk Inventor.

Para a obtenção de resultados mais próximos da realidade, foram realizadas duas simulações, uma utilizando a concepção inicial da fuselagem, como informado anteriormente, proposta pela equipe, e outra sendo a adaptação adquirida pela análise em simulações CFD em duas dimensões. Para que os valores obtidos se aproximassem ainda mais da realidade, foi adicionado às geometrias a serem simuladas o tailboom da estrutura, que também faz parte da aeronave.

Para que os valores de força de arrasto obtidos pudessem servir não só como comparação, mas também nas análises de desempenho da aeronave, as simulações geradas para as duas concepções seguiram o mesmo método empregado anteriormente na análise da esfera. Utilizada por apresentar pequeno erro em comparação com o a realidade. À pedido, a equipe de aerodesign disponibilizou a velocidade de cruzeiro da aeronave, assim como também a altitude em que a mesma pratica seus voos, conseguindo adaptar as propriedades do fluido e calcular o número de Reynolds, podendo-se assim, realizar as simulações e obter resultados finais.

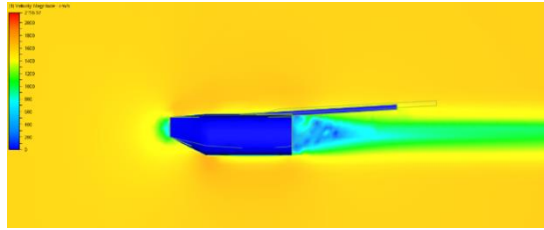


Figura 8. Resultado simulação concepção inicial. Autor: Aatoria Própria.

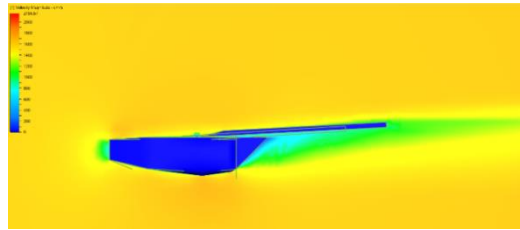


Figura 9. Resultado simulação concepção final. Autor: Aatoria Própria.

Em ambas as geometrias ocorrem o descolamento do escoamento de maneira prematura, no entanto, já se previa esse fenômeno pelos formatos pouco aerodinâmico que as mesmas apresentam. Analisando, pode-se notar que o escoamento da concepção adaptada após escoar pelo corpo, forma uma quantidade menor de vórtices, diferente da concepção inicial, possíveis de notar pela coloração mais escura de azul na figura 8, onde percebe-se uma mudança brusca na geometria. Essa mudança acarreta uma aparição mais intensa de vórtices e, por consequência, uma maior região com deficiência de velocidade, mais conhecida como esteira, fator que também contribui para o aumento da força de arrasto gerada pelo corpo.

A concepção final gerou uma força de arrasto de 1,31 Newtons. Já a concepção adaptada gerou 0,912 Newtons de arrasto, podendo concluir que houve uma diminuição de pouco mais de 30% de arrasto com a mudança.

## CONCLUSÃO

Por esse estudo, podemos ver como a configuração da fuselagem afeta diretamente na performance aerodinâmica do sistema. Observou-se, principalmente, como um encerramento abrupto da forma é capaz de gerar gradientes de pressão que levam a um maior arrasto e o aumento da angulação do corpo, nesse sentido, produz gradientes mais suaves e consequentemente menores forças de arrasto.

Entretanto, o aumento do ângulo tem suas limitações e, para ângulos acima de  $45^\circ$ , já não se apresentam melhores no aspecto aerodinâmico. Portanto, para que se otimizasse ainda mais a eficiência, fez-se necessário o uso de um

arredondamento da geometria, alcançando uma melhoria de aproximadamente 30%.

Na simulação da geometria otimizada, nas condições de voo normais da aeronave, temos um escoamento estável sobre todo o corpo com baixa formação de vórtices e a força total de arrasto contabilizada é de 0,912 Newtons.

## **REFERÊNCIAS**

ANDERSON, Jhon David. **Aircraft performance and design**. MCGRAW-HILL EDUCATION. 2001.

KENTFIELD, JAC. **Drag Reduction by Means of Controlled Separated Flow**. AIAA. 1985.

MORRISON, Faith A. **Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere**. Department of Chemical Engineering, MTU. 2016.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica – Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. 2009.

WHITE, Frank M. **Fluid mechanics, 6th edition**. MCGRAW-HILL EDUCATION. 2011.