



**Mistura passiva de  
ar/combustível**  
**Estudo CFD e em motor Honda GX25**  
**(versão final após defesa)**

**António Maria Caldas Travassos de Oliveira Duarte**

Dissertação para obtenção de grau mestre em

**Engenharia Aeronáutica**

Mestrado Integrado

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo Brojo

Dezembro 2023



## Declaração de Integridade

Eu, António Maria Caldas Travassos de Oliveira Duarte, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 41977 de Engenharia Aeronáutica da Faculdade da Beira Interior, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o Código de Integridades da Universidade da Beira Interior.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 30/12/2023





## **Dedicatória**

Dedico esta dissertação a quem me apoiou e suportou durante toda esta jornada na Universidade da Beira Interior. Dedico esta dissertação a quem tive grandes conversas de Engenharias e de máquinas. Dedico esta dissertação a quem teve a paciência de me explicar sobre política e sobre vida.

Dedico esta dissertação ao meu avô, Senhor Jorge Travassos.



## Agradecimentos

Antes de mais, agradeço ao meu orientador **Doutor Francisco Brojo** que me acompanhou neste processo e descoberta. Que aceitou de braços abertos a minha ideia e que acima de tudo rapidamente solucionou problemas que me pareciam sem solução. Em segundo lugar, ao Engenheiro Técnico João Antunes e ao Doutorando Pedro Pais que me ajudaram na componente laboratorial deste trabalho e na resolução de problemas. Em terceiro lugar, agradeço aos meus amigos, em particular ao João Cristóvão que por muitas noites cozinhava e me apoiava nas minhas tarefas de casa libertando o meu horário para trabalhar. Por fim, agradeço à minha família, cuja me apoiou das mais diversas formas e sempre esteve presente nas minhas demais escolhas.



## Prefácio

É palpável o declínio das condições ambientais. Por outro lado, a economia mundial demonstra uma melhoria a todos os segundos que passam. Existe portanto uma correlação entre a melhoria e um declínio de outro.

Ao estudar Propulsão uma das ideias que imediatamente se fixou foi a fraca eficiência de um motor a explosão. Não só, são incrivelmente pouco eficientes [40] como se propagaram pelo mundo inteiro. Desde a máquinas para cortar a relva até a motores capazes de transportar toneladas pelo ar. Propagaram-se pelo mundo todo como apoiando-nos e aos nossos feitos tecnológicos incríveis.

Na corrida contra o próprio planeta que atualmente todos somos obrigados a correr, um pequeno aumento de eficiência nestes motores pode ter consequências incríveis.

Nesta dissertação começa-se retirar uma peça de um motor emprestado pela Universidade da Beira Interior para se fazer a leitura das suas medidas. Posto isto, é criado um pequeno estudo aerodinâmico com o objetivo de se obter as medidas em falta. Em segundo lugar, é realizado um estudo CFD nessa mesma peça no qual se compara os resultados ao mudar a posição dos geradores de vórtice. Finalmente, após obter a melhor configuração, a modificação é construída e colocada no motor com o objetivo de validar os resultados.

*Há sem dúvida quem ame o infinito,  
Há sem dúvida quem deseje o impossível,  
Há sem dúvida quem não queira nada —  
Três tipos de idealistas, e eu nenhum deles:  
Porque eu amo infinitamente o finito,  
Porque eu desejo impossivelmente o possível,  
Porque quero tudo, ou um pouco mais, se puder ser,  
Ou até se não puder ser...*

*Alvaro de campos, 1944*



## Resumo

É observável, no estado atual da economia global, um declínio das condições ambientais. De facto, alguns países registaram temperaturas recorde durante o ano de 2022 devido a este declínio. [69]. É conhecimento comum que o rendimento dos motores de combustão a 4 tempos é baixo [40]. Estes motores são usados em várias aplicações, desde máquinas de cortar relva até aeronaves de várias toneladas. Assim, um pequeno aumento neste rendimento pode ter consequências gigantes no futuro. Esta dissertação tem como objetivo a melhoria do rendimento de um motor a 4 tempos. O sistema de admissão irá receber geradores de vórtices no seu túnel de venturi com o objetivo de melhorar a mistura entre os dois fluidos envolventes no processo. Inicialmente, toda a teoria envolvida neste tipo de trabalho foi estudada e revista. Em seguida, o sistema de admissão foi medido e foi feito um estudo CFD (cerca de 20 simulações no total) alterando a posição de vários geradores de vórtice e observando o seu impacto na distribuição do combustível imediatamente antes da admissão de ar do motor usando, um programa criado em Visual Basic Applications. Finalmente, após chegar a uma conclusão no estudo teórico CFD (dois geradores à entrada do difusor espaçados em 180 graus) é transportado o conhecimento obtido para uma componente mais prática, observando o impacto que a alteração tem comparando com a peça original usando uma mesa de testes construída e adaptada ao motor em questão usando sensores lidos através de um microprocessador (arduíno). Conclui-se que a peça construída usando conhecimento de engenharia obterá os melhores resultados. A peça no qual foram colocados os geradores tem resultados intermédios. Finalmente a peça original tem os piores resultados.

**Palavras-chave**-Geradores de vórtice,mistura,CFD,análise,combustível,motor 4 tempos



## Abstract

Given the current world conditions, its clear the worsening of climate conditions. In fact, some countries are registering record high temperatures in 2022 due to climate change [69]. A common knowledge is that the 4 stroke engine have a low efficiency [40] and is used, everywhere between the smallest machine like in lawn mowers to machines capable of transporting tons of weight in the skies. In the race against the clock that we all are currently forced to participate, a small improvement can be responsible for great consequences.

The objective of this dissertation is to passively improve the efficiency of a 4-stroke engine placing vortex generators in the intake to improve the mix between air and fuel and consequently improve the overall efficiency. Measurements of current intake and a CFD analysis were performed to improve geometry and placement of the vortex generators. Finally, these results were implemented in a 4-stroke engine (Honda GX25), allowing conclusions about the effectiveness of the proposed solution. In this work it will be seen that simulation results present better values of SFC and torque than the original part. It will also be seen that the new intake using vortex generators still has better values than the original value but worse than the simulated ones. This could be since the vortex generators choke the airflow too much. Considering this aspect, further analisys is required.

**Keywords-**Vortex generators,mixture,CFD,analysis,fuel,4-stroke engine



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>29</b>
1.1	Objectivo . . . . .	29
1.2	Estrutura da dissertação . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Revisão de conhecimentos</b>	<b>30</b>
2.1	Fundamentos de fluidos . . . . .	30
2.1.1	Revisão histórica e sua importância . . . . .	30
2.1.2	Conceito de Fluido . . . . .	30
2.1.3	Fluido como meio contínuo . . . . .	30
2.1.4	Classificação de escoamentos . . . . .	31
2.1.5	Descrições do movimento dos fluidos . . . . .	31
2.1.6	Propriedades principais de um fluido . . . . .	31
2.1.7	Componente de mistura passiva . . . . .	32
2.2	Efeito de Venturi . . . . .	33
2.3	Geradores de vórtice . . . . .	34
2.3.1	Análise de misturas . . . . .	35
2.4	Motores de combustão interna . . . . .	35
2.4.1	Revisão histórica . . . . .	35
2.4.2	Introdução . . . . .	35
2.4.3	Operação de motores por ignição . . . . .	36
2.4.4	Componentes do motor . . . . .	37
2.4.5	Detalhes importantes . . . . .	37
2.4.6	Propriedades geométricas . . . . .	38
2.4.7	Binário, Freio e Potência . . . . .	39
2.4.8	Eficiência Mecânica . . . . .	39
2.4.9	Pressão média efetiva . . . . .	39
2.4.10	Consumo específico e eficiência . . . . .	39
2.5	Análises <i>CFD</i> . . . . .	39
2.5.1	Revisão Histórica . . . . .	39
2.5.2	Introdução . . . . .	40
2.5.3	Métodos dos volumes finitos . . . . .	41
2.5.4	Modelo de turbulência k-omega SST . . . . .	41
2.5.5	Resíduos . . . . .	41
2.5.6	Número de Courant . . . . .	42
2.5.7	Equação de energia . . . . .	43
2.5.8	Algoritmo SIMPLE . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Medidas, Cálculos e decisões preliminares</b>	<b>44</b>
3.1	Medidas Iniciais . . . . .	44
3.2	Dimensionamento do difusor e bocal . . . . .	45
3.2.1	Dimensionamento do difusor . . . . .	45
3.2.2	Dimensionamento do bocal . . . . .	47
3.3	Modelação das peças . . . . .	47
3.4	Velocidade de escoamento . . . . .	48
3.5	Geradores de Vórtice . . . . .	52
3.5.1	Posicionamento . . . . .	52
3.5.2	Dimensionamento . . . . .	54

<b>4</b>	<b>Análise CFD</b>	<b>57</b>
4.1	Variáveis de interesse, critérios e nomenclatura . . . . .	57
4.2	Independência da malha . . . . .	57
4.2.1	Exemplo/Controlo . . . . .	57
4.3	Resultados do controlo . . . . .	59
4.3.1	TKE e Combustível . . . . .	59
4.4	Resultados da primeira e segunda fase . . . . .	60
4.4.1	Análise preliminar da 1ª fase . . . . .	60
4.4.2	Análise preliminar da 2ª fase . . . . .	62
4.4.3	análise preliminar da 3ª fase . . . . .	63
4.4.4	Análise exata da 1ª fase, 2ª fase e 3ª fase . . . . .	63
4.4.5	Sub-fase . . . . .	65
4.5	Resultados da 4ª fase . . . . .	66
4.5.1	Objetivos . . . . .	66
4.5.2	Resultados . . . . .	66
4.6	Conclusões da análise CFD . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Validação de resultados</b>	<b>68</b>
5.1	Preparação . . . . .	68
5.1.1	Criação dos coletores . . . . .	68
5.1.2	Mesa de testes . . . . .	68
5.1.3	Sensores . . . . .	68
5.1.4	Método de teste . . . . .	69
5.2	Resultados . . . . .	70
5.2.1	Binário . . . . .	70
5.2.2	Consumo . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>72</b>
6.1	Problemas inerentes à dissertação . . . . .	72
6.1.1	Parte teórica . . . . .	72
6.1.2	Parte prática . . . . .	72
6.2	Estudos futuros . . . . .	73
<b>A</b>	<b>Vistas ortogonais da conduta de controlo</b>	<b>79</b>
<b>B</b>	<b>Motor Honda GX25</b>	<b>80</b>
<b>C</b>	<b>Setup Ansys Controlo</b>	<b>82</b>
<b>D</b>	<b>Independências de Malha</b>	<b>87</b>
<b>E</b>	<b>Resultados 1ª fase</b>	<b>96</b>
<b>F</b>	<b>Resultados 2ª fase</b>	<b>104</b>
<b>G</b>	<b>Resultados da 3ª fase</b>	<b>112</b>
<b>H</b>	<b>Programa de análise exatas</b>	<b>120</b>
<b>I</b>	<b>Gráficos de análise exata da 1ª, 2ª e 3ª fase</b>	<b>122</b>
I.1	1ª Fase . . . . .	122
I.2	2ª Fase . . . . .	126
I.3	3ª Fase . . . . .	130
<b>J</b>	<b>Análise exata da conduta de controlo</b>	<b>134</b>

<b>K Subfase</b>	<b>135</b>
<b>L Peças imprimidas em 3D</b>	<b>137</b>
<b>M Programação Arduino</b>	<b>140</b>



## Lista de figuras

1	Micro-estruturas de mistura passiva. Imagem cortesia de [16]. . . . .	33
2	Componente presente entre a admissão e o carburador do motor Honda Gx25. Figura meramente ilustrativa . . . . .	33
3	Comparação do coeficiente de pressão no escoamento de um perfil alar no seu sobredorso. É possível observar o impacto que a inserção dos geradores teve no escoamento. Este mecanismo permite ao escoamento descolar mais tarde e conseqüentemente atrasar a perda de sustentação da asa. Imagem cortesia de [12] . . . . .	34
4	Geradores de vórtice longitudinais na asa de uma aeronave (Cessna 182K.Imagem cortesia de [81]. . . . .	35
5	Secção transversal de um pistão de um motor de explosão interna a 4 tempos [13] . . . . .	36
6	Os 4 tempos do ciclo de operação. Imagem cortesia de Paula Cordeiro [31]. . . . .	37
7	Esquema de um motor e algumas propriedades geométricas [15] . . . . .	38
8	Contornos de velocidade num perfil alar simétrico a $Ma=1$ [55] . . . . .	40
9	Exemplo do aspeto de um gráfico de residuais numa simulação CFD transiente com equação de energia ativada. . . . .	42
10	Componente a ser alterado. À esquerda foto da peça original do motor em questão. À direita vista isométrica da mesma peça cortesia de [30]. Para efeitos de referencia é apresentado a largura da peça com um paquimetro. A figura é meramente ilustrativa. . . . .	44
11	Esquema transversal do elemento de ligação entre o carburador e a admissão de o motor Honda GX25. As medidas representam os respetivos diâmetros. . . . .	45
12	"Performance de um difusor". Em cima a situação ideal. Abaixo esquema de um difusor real com separação da camada limite. Figura retirada de [62] . . . . .	46
13	Mapa de desempenho para um difusor cónico típico. . . . .	47
14	Esquema 2D da conduta a ser estudada em <i>CFD</i> . . . . .	47
15	Esquema 3D da conduta desenhada em SpaceClaim ferramenta de modelação . . . . .	48
16	Perdas K em expansões e contracções subtidas . . . . .	50
17	Representação do desenvolvimento do escoamento ao longo da análise. . . . .	53
18	Gerador de vórtice <i>Delta Winglet</i> (à esquerda) e possíveis distribuições na secção transversal da conduta (à direita). . . . .	54
19	Magnitude da velocidade do escoamento na conduta de controlo. . . . .	55
20	Gráfico das camadas limites ao longo da conduta de menor secção transversal na parte de "baixo". . . . .	55
21	Imagem de referencia para a análise . . . . .	58
22	Balanço de massa na conduta de controlo. A vermelho o local da zona de teste. . . . .	58
23	Convergência de residuais durante os 0.09 segundos de escoamento . . . . .	59
24	Comportamento do combustível durante toda a análise . . . . .	60
25	Comportamento de TKE durante toda a análise . . . . .	60
26	Gráficos de dispersão de combustível na zona de teste.A figura a) representa o gráfico criado na direção de Z. A figura b) representa em Y . . . . .	61
27	Banca de testes criada para o Motor Honda Gx25 . . . . .	69
28	Curvas de desempenho obtidas em testes práticos da peça original do motor Honda GX25 . . . . .	70
29	Curvas de desempenho obtidas em testes práticos dos três coletores ensaiados . . . . .	71
30	Vistas ortogonais da conduta de controlo (exterior) . . . . .	79
31	Curvas de desempenho cortesia de [53] . . . . .	81
32	Posições das 6 divisórias na conduta. . . . .	85
33	Esfera de influencia de alteração dos tamanhos dos elementos da malha na conduta. . . . .	85
34	Comparação entre dois mapas de cores presentes no Ansys Fluent. À esquerda o mapa definido como "Brg". À direita o mapa definido como "Brg-modern" . . . . .	86
35	Balanço de massa de um gerador de vórtice colocado a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	87
36	Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	88

37	Balço de massa de um gerador de vórtice colocado a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	89
38	Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	89
39	Balço de massa de um gerador de vórtice colocado a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	90
40	Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	91
41	Balço de massa de um gerador de vórtice colocado a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	92
42	Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	92
43	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	96
44	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	96
45	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	97
46	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	97
47	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	98
48	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	98
49	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	99
50	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	99
51	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	100
52	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	100
53	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	101
54	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	101
55	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	102
56	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	102
57	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	103
58	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	103
59	Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	104
60	Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	104
61	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	105

62	: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 5 mm de distância do referencial global. . . . .	105
63	Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	106
64	Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	106
65	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	107
66	: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 10 mm de distância do referencial global. . . . .	107
67	Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	108
68	Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	108
69	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	109
70	: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 15 mm de distância do referencial global. . . . .	109
71	Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	110
72	Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	110
73	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	111
74	: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 20 mm de distância do referencial global. . . . .	111
75	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 5 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior. . . . .	112
76	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior . . . . .	112
77	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	113
78	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	113
79	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 10 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior. . . . .	114
80	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior . . . . .	114
81	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	115
82	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	115

83	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 15 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior. . . . .	116
84	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior . . . . .	116
85	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	117
86	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	117
87	Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 20 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior. . . . .	118
88	Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior . . . . .	118
89	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	119
90	Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global na zona superior. . . . .	119
91	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	122
92	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	122
93	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	123
94	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	123
95	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	124
96	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	124
97	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	125
98	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	125
99	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	126
100	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	126
101	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	127
102	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	127
103	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	128
104	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	128
105	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	129
106	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	129

107	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	130
108	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	130
109	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	131
110	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	131
111	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	132
112	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	132
113	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y. . . . .	133
114	Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z. . . . .	133
115	Gráficos da variância da média de distâncias verticais da conduta de controlo relativo ao conjunto de pontos em Y . . . . .	134
116	Gráficos da variância da média de distâncias verticais da conduta de controlo relativo ao conjunto de pontos em Z . . . . .	134
117	Contornos da fração mássica de combustível na zona de teste de 4 geradores colocados a 20 mm de distância do referencial global . . . . .	135
118	Contornos de TKE de 4 geradores de vórtice distanciados 20 mm do referencial global. . .	135
119	Gráfico de pontos dos de fração mássica de combustível. Desenhado em Y . . . . .	136
120	Gráfico de pontos dos de fração mássica de combustível. Desenhado em Z . . . . .	136
121	Três vistas ortogonais da peça de União entre a conduta e o motor. . . . .	137
122	Três vistas ortogonais da peça de Offsett. . . . .	138
123	Três vistas ortogonais da peça da conduta de controlo . . . . .	139
124	Ligações elétricas usadas no Arduino para testar . . . . .	140



## Lista de tabelas

1	Tabela da velocidade média do pistão, do tempo mínimo desde o PMS ao PMI e do caudal	49
2	Velocidade do escoamento na entrada do túnel de venturi do motor em função das suas Rotações por minuto . . . . .	51
3	Velocidade de entrada do escoamento de ar e de combustível (no carburador) em função das RPM do motor Honda GX25 . . . . .	52
4	Tabela da espessura da camada limite ( $y^+$ ) em função da sua posição na conduta (Distância X) na parte de "baixo". . . . .	55
5	Tabela da espessura da camada limite ( $y^+$ ) em função da sua posição na conduta (Distância X) na parte de "cima". . . . .	56
6	Coefficientes de distribuição obtidos no testes da primeira fase. O melhor valor obtido é do gerador posicionado a 20 mm do referencial global. . . . .	65
7	Coefficientes de distribuição obtidos na segunda fase. O melhor valor obtido é dos geradores posicionados a 20 mm do referencial global. . . . .	65
8	Coefficientes de distribuição obtidos na terceira fase. O melhor valor obtido é do gerador posicionado a 10 mm do referencial global. . . . .	65
9	Tabela de valores de coeficiente de distribuição das alterações dos ângulos de ataque . . .	66
10	Tabela do consumo específico do motor às 6000 RPM . . . . .	71
11	Dados gerais do motor Honda GX25 . . . . .	80
12	Dimensões do motor Honda GX25 . . . . .	80
13	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 5 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>206690 elementos</u> . . . . .	87
14	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 10 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>313129 elementos</u> . . . . .	88
15	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 15 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>294048 elementos</u> . . . . .	90
16	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 20 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>347840 elementos</u> . . . . .	91
17	Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 5 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>131793 elementos</u> .	93
18	Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 10 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>118672 elementos</u> .	93
19	Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 15 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>228996 elementos</u> .	93
20	Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 20 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>106200 elementos</u> .	93
21	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 5 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>156960 elementos</u> . . . . .	94
22	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 10 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>125777 elementos</u> . . . . .	94
23	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 15 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>375692 elementos</u> . . . . .	94
24	Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 20 mm de distância do referencial global. Foi obtida com <u>265383 elementos</u> . . . . .	94
25	Tabela de independência da malha na sub-fase. Foi obtida 106817 elementos . . . . .	135



## Lista de Acrónimos

- UBI-Universidade da Beira Interior
- CFD-Dinâmica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
- RTD-Tempo de residência das partículas (Particle Residence Time)
- TKE-Energia Cinética de Turbulência (Turbulence kinetic energy)
- GV-Geradores de Vórtice
- NS-Navier-Stokes
- PMS-Ponto Morto Superior
- PMI-Ponto Morto Inferior
- LVG-Geradores de vórtice longitudinal (Longitudinal vortex generator)
- VBA-Visual Basic for Applications
- PIC-Particle in Cell
- MAC-Marker and Cell
- ALE-Arbitrary Lagrangian Eulerian



# 1 Introdução

## 1.1 Objectivo

O presente trabalho tem como objetivo a melhoria da eficiência de um motor a 4 tempos. Esta melhoria será obtida pela alteração da admissão, usando geradores de vórtices. Desta forma e adicionando este nova componente pretende-se criar uma mistura mais homogénea que consequentemente possa levar a uma melhoria na eficiência da combustão.

## 1.2 Estrutura da dissertação

Para a realização deste projeto, inicialmente será feita uma revisão dos temas envolvidos como **Motores de combustão Interna, Aerodinâmica, Misturas químicas, Análises CFD**. Numa segunda fase, são apresentadas as medidas, cálculos e decisões preliminares. O objetivo é sempre a implementação da melhor solução obtida em CFD num motor real. No capítulo 3, serão apresentados todos estes dados. Em seguida, são apresentadas as análises CFD realizadas e as conclusões dela retirada.

Em último caso, será apresentado o teste experimental, os resultados obtidos e as conclusões daí retiradas.

## 2 Revisão de conhecimentos

### 2.1 Fundamentos de fluidos

#### 2.1.1 Revisão histórica e sua importância

Com início no século XVIII e subsequente continuação no século XIX, a aerodinâmica teve uma evolução semelhante a outras áreas: lenta e progressiva. No entanto, apesar de atualmente o nosso conhecimento ser limitado, civilizações mais antigas já tinham técnicas para resolver imensos problemas na época.

Arquimedes escreveu leis de flutuação, os Romanos construíram aquedutos (no século quarto) que ainda hoje se mantêm em pé e os portugueses construíram e barcos à vela (Século XV) capazes de viajar pelo mundo todo. Desde o nascimento de Cristo até ao renascimento que existem centenas de vestígios de melhorias de escoamentos. No entanto, o conhecimento empírico fundamental não é encontrado. Apenas com *Leonardo da Vinci* (1452-1519) é que é criada a equação de conservação de massa numa dimensão. Duzentos anos mais tarde *Edme Mariotte* construiu o primeiro túnel de vento nos quais realizou testes [61].

Problemas envolvendo o momento de fluidos começaram a ser analisados com as Leis de Newton e as leis de viscosidade de fluidos. Inicialmente, a análise era feita assumindo fluidos perfeitos ou sem fricção por matemáticos do século XVIII como *Daniel Bernoulli*, *Leonhard Euler*, *Jean d'Alembert*, *Joseph-Louis Lagrange* e *Pierre-Simon Laplace*. Isto também deu origem a um paradoxo criado por *d'Alembert* o qual demonstra que um objecto imerso num fluido sem viscosidade não cria qualquer tipo de resistência ao avanço. Perante este paradoxo, teorias antes criadas foram rejeitadas e foi criada a ciência dos hidráulicos que tem os seus fundamentos em dados experimentais.

Nos finais do século XIX a Hidráulica experimental e a Hidrodinâmica começaram por ser unificadas através das leis criadas por *William Froude*, *Robert Froude*, *Lord Rayleigh*, *Osborne Reynolds*.

Escoamentos viscosos apesar de já serem conhecidos anteriormente, foram maioritariamente estudados por *Navier* e *Stokes*. Por fim, no início do século XX *Ludwig Prandtl* escreveu e publicou o que é considerado por muitos, o artigo mais importante na mecânica dos fluidos: **Escoamentos de baixa viscosidade (como água e ar) podem ser subdivididos perto de objectos sólidos dando origem ao que hoje conhecemos como camada limite.**

Para finalizar na segunda metade do século XX introduziu uma nova ferramenta: **Análise de fluidos Computacional** escrito por *A.Thom*.

O planeta terra é composto em 75% por água e completamente coberto por ar. Electricidade, Meteorologia, Oceanografia, Estudos médicos de respiração e circulação sanguínea, transporte por aviação ou Navios tornam possível dizer que este tema é dos mais importantes na humanidade [61].

#### 2.1.2 Conceito de Fluido

Do ponto de vista de mecânica dos fluidos existem dois estados de matéria: **Fluido e Sólido**. A distinção está na reacção ao ser aplicada uma força tangencial. Deste modo, um fluido deforma e move-se continuamente enquanto esta força é aplicada. Por outro lado, pode-se concluir que fluidos devem existir em estados no qual a tensão de corte é igual a zero levando ao círculo de *Mohr* respetivo a ser um ponto. Podemos ainda subdividir um fluido em dois **Gás e líquido**. A diferença técnica é as forças de coesão no qual os líquidos são compostos por moléculas compactas que tendem a manter o seu volume. Um gás tem volume indefinido quando deixado sem confinamento formando uma atmosfera essencialmente hidrostática [61].

#### 2.1.3 Fluido como meio contínuo

Já foi visto que fluidos são agregações de moléculas muito compactadas em líquidos e bastante espaçadas em gases que se movem livremente relativamente umas às outras. Desta forma, o valor da massa volúmica altera-se constantemente. No entanto, este efeito é desprezável se o volume de fluido é grande comparado com o volume que cada molécula ocupa pois o número de moléculas é constante apesar das trocas existentes.

Ao longo deste trabalho, apenas serão consideradas dimensões bastantes maiores que o volume limite ( $10^{-9} mm^3$ ) pelo que a massa específica é essencialmente constante e as propriedades do fluido variam de forma contínua no espaço. Isto significa que **A variação é pequena o suficiente, para que o cálculo diferencial possa ser usado.**[61].

#### 2.1.4 Classificação de escoamentos

A rigor, todos os escoamentos reais são **tridimensionais**, as grandezas que neles interferem, em cada secção transversal, variam em três direções. No entanto, a análise de escoamentos **bidimensionais** também existe, isto é, quando o escoamento puder ser completamente definido por linhas de corrente contidas em um único plano. Por exemplo, numa primeira aproximação, um escoamento ao redor de um cilindro é bidimensional caso este seja muito longo. Um escoamento **uni-dimensional** é considerado quando uma única coordenada é suficiente para descrever as propriedades do fluido ou por outras palavras quando as propriedades deste são constantes ao longo de toda a secção. Podemos classificar os escoamentos função da direção de trajetória. Isto é, **Laminar, Turbulento ou de transição**.

- **Laminar:** As trajetórias das partículas são suaves e paralelas. A viscosidade amortece a tendência de rotação (no inglês swirl) ou de mistura.
- **Turbulento:** Tem uma trajetória imprevisível e errática. A mistura entre fluidos é eficiente.
- **Transição:** Representa a passagem de laminar para o turbulento ou vice-versa.

A classificação dos fluidos quanto à variação no tempo é: **Permanente ou Transiente**. Um escoamento permanente, tem as propriedades médias estáticas das partículas fluidas como funções discretas e não dependem do tempo. Por outro lado, um escoamento não permanente, é um fluido no qual as suas propriedades físicas mudam no decorrer do escoamento.

Os escoamentos também podem ser **Incompressíveis ou compressíveis** e a sua classificação é dada perante o seu número de Mach. Se  $Ma > 0.3$  o escoamento é incompressível. Acima deste valor é considerado compressível.

Por fim, a última classificação pode ser consoante a sua rotacionalidade. Num escoamento **Rotacional** a maioria das partículas desloca-se com velocidade angular em torno do seu centro de massa. Um escoamento **Irrotacional** acontece quando as suas partículas se movimentam sem exibir movimento de rotação. Matematicamente isto é descrito por:

$$\vec{w} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1)$$

Naturalmente quando a equação 1 é igual a zero o escoamento é irrotacional.

#### 2.1.5 Descrições do movimento dos fluidos

Existem dois pontos de vista para analisar problemas na mecânica. O método **Euleriano** e o **Langrangiano**. O primeiro método é o mais adequado para a mecânica dos fluidos no qual temos uma abordagem de campo. Isto é, identificamos um determinado local fixo no campo e acompanhamos a mudança conforme diferentes materiais passam por esse mesmo local. Por outro lado, o método Langrangiano, observa uma parcela individual do fluido à medida que esta se move através do espaço e do tempo traçando ao longo do tempo a linha do caminho.

#### 2.1.6 Propriedades principais de um fluido

Num escoamento, calcular a velocidade é normalmente a principal preocupação. Assim, o vetor velocidade é uma das propriedades principais a ser estudada. Resumidamente este é um vetor de posição e tempo com três componentes e pode ser explicito pela equação 2.

$$V(x, y, z, t) = \mathbf{i}u(x, y, z, t) + \mathbf{j}v(x, y, z, t) + \mathbf{k}w(x, y, z, t) \quad (2)$$

É de salientar que o campo de aceleração é portanto a derivada temporal da equação 2. Dado que a sua demonstração é extensa é apenas dada a sua equação.

$$a = \frac{dV}{dt} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3)$$

Não obstante da importância da equação do campo de velocidades, outras propriedades intrínsecas ao escoamento também devem ser mencionadas como:

- **Pressão p**, o termo pressão é utilizado em diversas áreas da ciência como uma grandeza escalar que mensura a ação de uma ou mais forças sobre um determinado espaço, podendo este ser líquido, gasoso ou mesmo sólido. A pressão é uma propriedade intrínseca a qualquer sistema, e pode ser favorável ou desfavorável ao escoamento.
- **Temperatura T**. Temperatura é uma grandeza física que mede a energia cinética média de cada grau de liberdade de cada uma das partículas de um sistema em equilíbrio térmico. Em sistemas constituídos apenas por partículas idênticas, essa definição associa-se diretamente à medida da energia cinética média por partícula do sistema em equilíbrio térmico. No presente trabalho a temperatura será apresentada em Kelvin ou Celsius.
- **Densidade  $\rho$**  massa específica (também massa volúmica ou massa volumétrica) de um corpo define-se como o quociente entre a massa e o volume desse corpo.[1][2] Desta forma pode-se dizer que a massa específica mede o grau de concentração de massa em determinado volume

Finalmente é também necessário ter atenção a outras propriedades como a Energia interna, a entalpia, a entropia e os calores específicos. Por fim, a fricção e a condutividade de calor são governadas pelo coeficiente de viscosidade e condução térmica.

**Todas estas propriedades são termodinâmicas e são obtidas a partir do estado do fluido.**

### 2.1.7 Componente de mistura passiva

Em termos gerais, a mistura de fluidos está presente em inúmeros problemas atuais como **Análise de químicos, absorção de gás, emulsificação entre outros**. Dado o objetivo deste projeto ser a mistura entre dois fluidos, é necessário a apresentação do estado da arte.

No passado, misturadores tinham um único objetivo, o de começar ou iniciar reações. Estes beneficiavam, especialmente de volumes internos baixos [16], principalmente quando existia a necessidade de uma maior segurança tanto mecânica como térmica. Assim, estes eram colocados a montante de zonas com substâncias perigosas.

A arte de *micro-misturas* pode ser traduzida na maximização eficiente da área superficial e no gradiente de concentração [16] em diferentes escalas [45]. Isto implica, que a dissipação viscosa e o consumo de energia estão conectados. O valor da eficiência [17] da amostra pode ser dada por:

$$M = 1 - \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}} \right)^2}$$

Existem dois princípios básicos de induzir mistura a uma *micro-escala*. Em primeiro lugar, a energia do exterior é fornecida ao sistema. Este método recebe o nome de **Mistura forçada ou ativa**. Por outro lado, é usada a energia do escoamento. É denominado de **Mistura passiva**. Na figura seguinte podemos observar alguns métodos de micro-estruturas que induzem mistura de forma passiva:

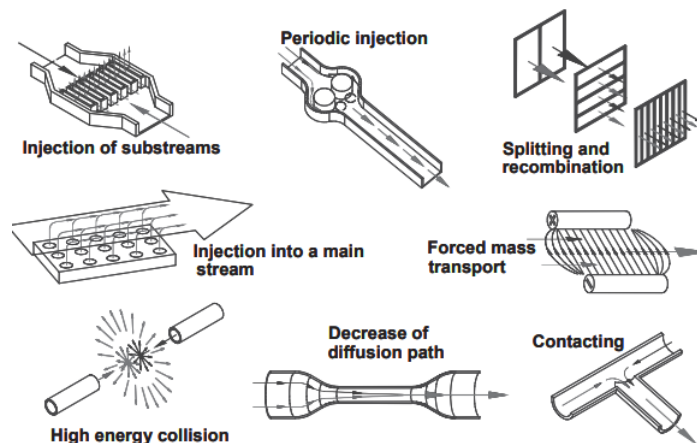


Figura 1: Micro-estruturas de mistura passiva. Imagem cortesia de [16].

## 2.2 Efeito de Venturi

Uma das "micro-estruturas" de mistura passiva é obtida pela diminuição da área transversal do escoamento. Dado que após a análise *CFD* o objectivo é transportar o conhecimento para uma fase experimental foi necessário entender as peças que compunham a admissão do motor fornecido pela UBI. A admissão é composta pelo carburador seguido de um túnel de Venturi. Este último componente pode ser observado na figura 2:



Figura 2: Componente presente entre a admissão e o carburador do motor Honda Gx25. Figura meramente ilustrativa

O efeito Venturi tem como base a equação de conservação de massa, conhecida como equação de

continuidade, que exprime o caudal mássico entre duas superfícies impermeáveis permanece constante, ou seja,

$$Q = \rho AU = \text{constante}$$

onde  $U$  é o vetor velocidade normal a área de secção transversal. Se tivermos em condições de escoamento incompressível ( $\rho = \text{constante}$ ), esta expressão diz que se a área de secção transversal aumentar/diminuir então a velocidade terá de diminuir/aumentar. Por Bernoulli podemos então demonstrar que:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2$$

onde o índice 1 e 2 representam diferentes locais do escoamento[27].

Nota: Em capítulos seguintes a equação de continuidade irá ser usada para obter cálculos preliminares.

## 2.3 Geradores de vórtice

Um vórtice pode ser gerado por qualquer saliência aerodinâmica consistindo numa pá ou "ressalto". Deste modo, geradores de Vórtice (GV's) têm bastantes usos e em diversas áreas, no entanto o mais comum é na industria aeronáutica com o objetivo de controlar a separação da camada limite com maior eficácia em relação aos outros métodos[12].

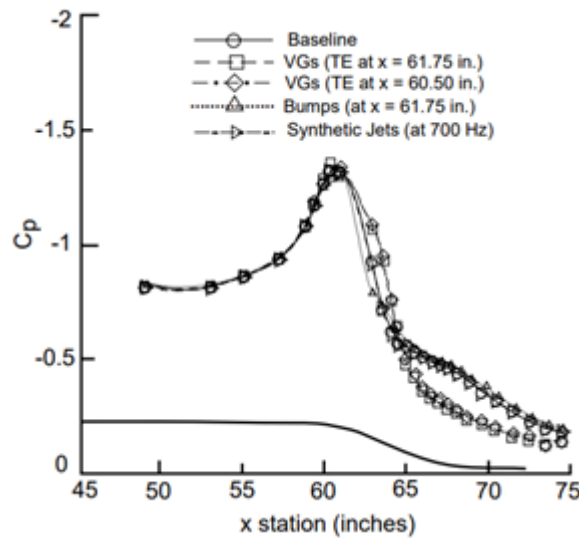


Figura 3: Comparação do coeficiente de pressão no escoamento de um perfil alar no seu sobre-dorso. É possível observar o impacto que a inserção dos geradores teve no escoamento. Este mecanismo permite ao escoamento descolar mais tarde e conseqüentemente atrasar a perda de sustentação da asa. Imagem cortesia de [12]

A **viscosidade** mede a resistência do fluido a escoar.

É difícil quantificar todos os tipos de geradores de vórtice existentes até à presente data de realização desta dissertação. Mais difícil é explicar as suas principais funções, aplicações mais comuns e estudos realizados. Por outro lado, grande parte dos estudos encontrados são realizados para induzir uma maior transferência de calor e não misturas entre dois fluidos. No entanto, existe um consenso entre autores: **Entre geradores de vórtice transversais e longitudinais, os últimos oferecem resultados semelhantes com penalizações menores** [38] ou [11]. Deste modo, na presente dissertação serão apenas considerados os geradores de vórtice Longitudinais ou *LVG*.

Dado que existe uma copiosa quantidade de diferentes geradores de vórtice, não serão diferenciados no presente trabalho. No entanto, artigos como [68] e [78] revelam alguns dos diferentes geradores



Figura 4: Geradores de vórtice longitudinais na asa de uma aeronave (Cessna 182K. Imagem cortesia de [81].

existentes e diversos estudos sobre estes. É de salientar que os dois artigos anteriormente referidos não servem como uma pesquisa completa de tudo existente até à data.

### 2.3.1 Análise de misturas

A forma mais comum de avaliar o estado de uma mistura é observando o escoamento através de câmaras de fotografia/vídeo microscópicas. Câmaras de alta velocidade foram também já usadas [16]. No caso de *CFD* esta análise pode ser muito mais extensa. Podem ser observados por exemplo, os "contornos" dos fluidos e as frações volúmicas de combustível. Para uma macro-escala, que depende da capacidade de dispersão será avaliado *Particle Residence Time* ou *RTD*[45]. Consecutivamente, podemos avaliar o movimento global do escoamento através deste parâmetro visto que representa o tempo que uma partícula necessita para viajar da entrada do volume de controlo até à respetiva saída. A escala intermédia (meso-mixing), é governada pelas flutuações da turbulência e pode ser caracterizada pela *Turbulent Kinetic Energy* ou *TKE*. Numa micro escala, avaliamos a *Turbulence Energy Dissipation Rate*. Visto que, esta escala representa a mistura a um nível molecular.[45].

## 2.4 Motores de combustão interna

### 2.4.1 Revisão histórica

Foi a partir do século XVII, que o homem começa a desenvolver conceitos para construir um mecanismo para "criar" força diferente de tração animal ou humana. Com a Revolução Industrial no século seguinte, ocorrem as transições de manufatura para os novos processos de fabrico. Assim, no ano de 1860 a ideia de construir uma máquina que utilizasse o benzeno como combustível começa a ser desenvolvida. Seis anos depois (1866), a ideia é concretizada por *Nikolaus August Otto*.

*Nikolaus August Otto (1832-1891)* engenheiro e inventor alemão, inventou e construiu o primeiro motor de combustão interna de quatro tempos e determinou o ciclo teórico sob o qual trabalha o motor de explosão (1876), conhecido por **ciclo Otto**.

O motor inventado por Otto mostrou ter inúmeras vantagens em relação ao motor a vapor utilizado na época como baixo peso, baixo consumo de combustível e maior potência [29].

### 2.4.2 Introdução

Um motor de combustão, tem como fim a transformação de energia química do combustível em energia mecânica. Isto é conseguido, de forma simplificada, devido a um pistão que se move num movimento oscilatório fornecendo essa energia a uma **cambota** através de uma **biela**. Antigamente as entradas e

saidas do motor eram controladas mecanicamente pela árvore de cames que estava interligada à cambota.

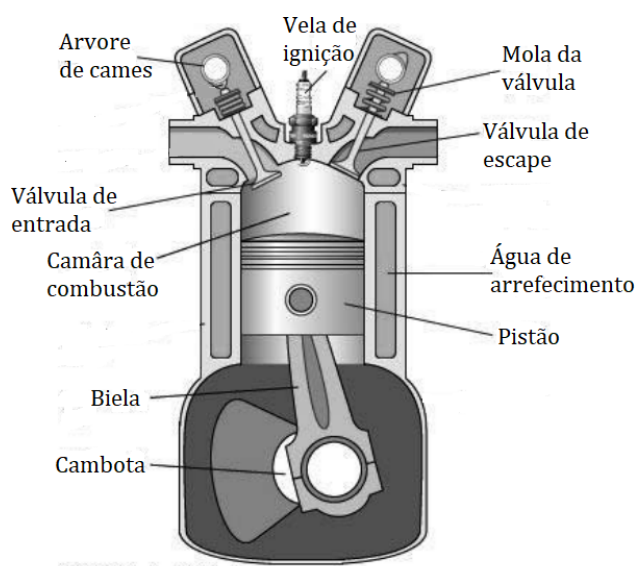


Figura 5: Secção transversal de um pistão de um motor de explosão interna a 4 tempos [13]

Este tipo de motores funcionam segundo o ciclo de Otto. Este ciclo até 1876 não viu grande uso até se realizar uma comparação direta entre um motor a funcionar segundo este ciclo e os motores presentes na atualidade. Após isto, cerca de trinta mil motores foram vendidos em 4 anos [46].

### 2.4.3 Operação de motores por ignição

Como o motor em questão (na parte final do trabalho) é de ignição por faísca (IF), apenas este tipo será abrangido neste subcapítulo.

Neste tipo de motores (IF) ar e combustível previamente misturados (num carburador ou outro sistema de injeção de combustível) entram na câmara de combustão antes da compressão pelo pistão. O controlo da potência gerada é através de uma válvula (acelerador) que controla o caudal de ar/combustível que entra no motor. Existem inúmeros motores distribuídos por diversas aplicações. Em motores naturalmente aspirados é "inserido" ar à pressão atmosférica. Por outro lado, em motores turboalimentados, o ar é comprimido por mecanismo impulsionado pelos gases de exaustão ou no caso dos motores com *Superchargers* por um mecanismo impulsionado mecanicamente pela cambota. Estes dois últimos mecanismos aumentam consideravelmente o desempenho do motor a custo de aumento do consumo de combustível. Em termos simples, para motores que trabalhem a velocidades mais altas é mais eficiente ter turbos enquanto a velocidades mais baixas um *Supercharger* é mais eficiente. Um bom exemplo do uso destes mecanismo está presente no Lancia Delta Integrale (usado no grupo B de WRC na década de 1980) que utilizou ambos para seu benefício [32]. Por fim, é de salientar que em motores de baixas dimensões, apenas dois tempos de operação começam a ser competitivos com quatro tempos de operação [47].

Na figura 6 podemos observar um motor a 4 tempos típico.

- **Admissão:** Começa com o pistão no **Ponto Morto Superior** e acaba no **Ponto Morto Inferior**. Durante este processo, ar e combustível são aspirados para a câmara de combustão. Para melhorar a eficiência do subciclo, a válvula de admissão abre/fecha imediatamente antes/depois do ciclo começar/acabar.

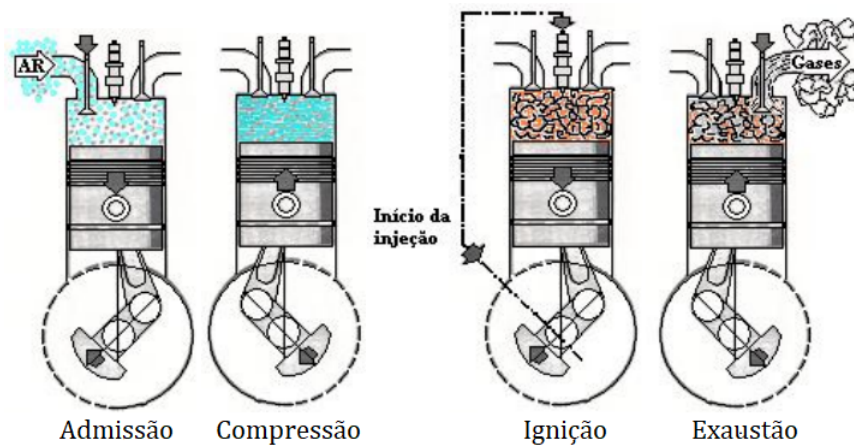


Figura 6: Os 4 tempos do ciclo de operação. Imagem cortesia de Paula Cordeiro [31].

- **Compressão:** Começa com as duas válvulas fechadas, imediatamente após o subciclo de admissão acabar. Com a subida do pistão para o PMS a mistura é comprimida para uma fração do volume inicial. No final do estágio de compressão a ignição é iniciada aumentando exponencialmente a pressão da câmara.
- **Expansão:** Começa com o pistão no PMI e acaba com este no PMS. Com a elevada temperatura e pressão, os gases empurram o pistão para baixo obrigando a cambota a rodar. O momento exato de ignição é dado entre 10 a 40 graus da cambota antes do PMS.
- **Exaustão:** Com o aproximar do pistão ao PMI, a válvula de escape abre iniciando o processo. Os gases excedentes do cilindro são libertados à medida que o pistão sobe novamente. Após este ciclo, o motor começa novamente o tempo de admissão.

Para se manter um bom desempenho a grandes rotações a válvula de entrada (que abre antes do PMS) tem de fechar após o PMI. Durante este processo, irá existir dentro do cilindro mistura fresca e gases já queimados do ciclo anterior [47].

#### 2.4.4 Componentes do motor

Na figura 5 é possível ver alguns componentes presentes no motor. Neste sub capítulo irão descrever-se detalhadamente os componentes.

#### 2.4.5 Detalhes importantes

Nos capítulos seguintes serão detalhados alguns aspetos geométricos e alguns parâmetros normalmente usados para analisar motores deste tipo. Mais tarde, no capítulo de análise do motor Honda GX25 fornecido pela UBI terão uma importância maior. Os parâmetros importantes são:

- O desempenho e as condições de operação.
- O consumo de combustível dentro das condições de operação e o preço desse combustível.
- O custo do motor e instalação do mesmo.
- A fiabilidade e durabilidade do motor, condições de manutenção e como estes afetam o motor e os seus custos de operação.

Quanto ao desempenho do motor os parâmetros que melhor definem são o **Binário máximo** disponível em todo o alcance do motor. Por outro lado, em qual velocidade o motor tem um comportamento satisfatório/ideal [48].

### 2.4.6 Propriedades geométricas

Em termos geométricos os parâmetros/formulas que merecem destaque são:

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (4)$$

$$R = \frac{l}{a} \quad (5)$$

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} \times (l + a - s) \quad (6)$$

Onde a equação 4 representa a razão do volume máximo do cilindro com o volume mínimo. A equação 5 representa a razão do comprimento da biela com o raio da cambota e por fim a equação 6 representa o volume do cilindro para qualquer ângulo na cambota [49]. A figura 7 representa visualmente algumas das propriedades acima mencionadas.

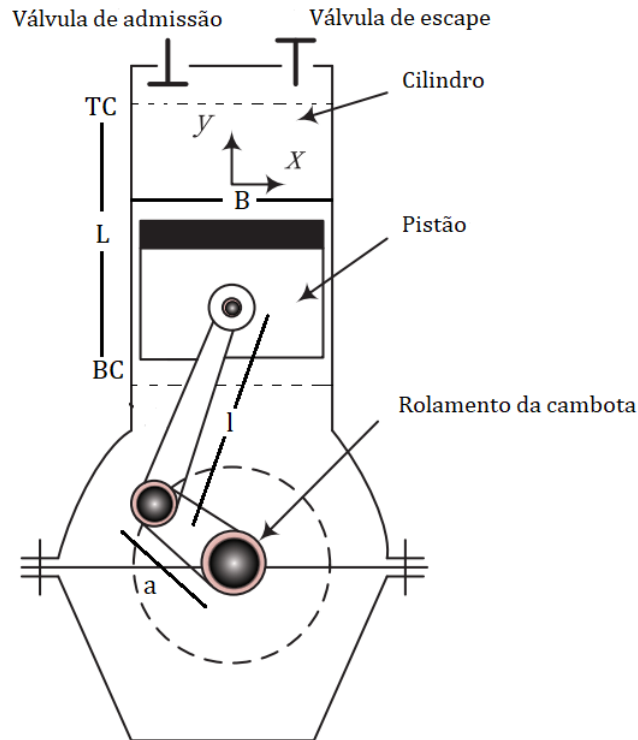


Figura 7: Esquema de um motor e algumas propriedades geométricas [15]

Outro parâmetro igualmente importante é a velocidade média do pistão [49]. Ao longo de todo o percurso a velocidade está sempre a variar pelo que futuramente para o estudo CFD usaremos a velocidade média do pistão em função das rotações por minuto. Isto é:

$$S_p = 2LN \quad (7)$$

### 2.4.7 Binário, Freio e Potência

O trabalho que um motor realiza é denominado de **Binário** e é dado em Nm por outras palavras é uma grandeza vetorial da física associada às forças que produzam rotação em um corpo. Potência ou no inglês *Power* é portanto a taxa a que este trabalho é realizado. Por último, o freio, é o valor disponível que o motor fornece no veio de saída [49]

Existem várias formas de avaliar este parâmetro num motor. Mais à frente será explicado o teste realizado.

### 2.4.8 Eficiência Mecânica

Durante o funcionamento do motor, parte do trabalho realizado é usado para a expulsão dos gases e para "encher" o cilindro com mistura fraca. Adicionalmente, outra parte é usada para contrariar as forças de fricção de componentes como o pistão, rolamentos etc. Se agruparmos todos estes componentes podemos criar uma variável  $P_f$  que representa a potência de fricção.

É de salientar que a velocidade do motor, temperatura do óleo, água e ambientes alteram o valor anterior por isso para testar devem ser mantidas iguais ao longo de estudos realizados no motor. Assim a eficiência mecânica pode ser definida como a razão do valor do freio com o valor indicado, ou seja como a eq 8 representa. Valores típicos para este valor estão entre os 75% a 90%.

$$\eta_m = 1 - \frac{P_f}{P_{ig}} \quad (8)$$

### 2.4.9 Pressão média efetiva

O binário é uma medida da capacidade de um motor para realizar trabalho. No entanto este está dependente do tamanho do mesmo [50]. Assim, se dividirmos o trabalho realizado por ciclo e pelo volume do cilindro deslocado conseguimos obter uma medida mais útil em termos de análise. Este parâmetro é denominado de "Pressão média efetiva" e é dado pela equação 9.

$$mep(kpa) = \frac{P_{nr} \times 10^3}{V_d N} \quad (9)$$

onde P é a potência, N a velocidade de rotação e Vd o volume deslocado.

A pressão media efetiva ao freio é um parâmetro já bastante estudado numa grande variedade de motores. Apresenta valores entre **850 a 1050 Kpa** para motores naturalmente aspirados e para motores de ignição por faísca sobrealimentados apresenta valores entre os **1250 a 1700 Kpa** [50].

### 2.4.10 Consumo específico e eficiência

Outro parâmetro importante, principalmente nos dias de hoje onde o combustível atinge preços recordistas [73] é o consumo medido de combustível em relação ao tempo. Ou um parâmetro mais interessante o consumo específico o que avalia o caudal de combustível por unidade de potência realizado pelo motor. Por outras palavras, o consumo específico de combustível avalia o quão eficientemente um motor utiliza o combustível para produzir potência [51] e é dada pela equação 10.

$$sfc(mg/Kw) = \frac{\dot{m}_f(g/s)}{P(KW)} \quad (10)$$

Pela equação vemos que são desejados os valores reduzidos para o consumo específico. Alguns valores típicos de valores de SFC para motores de ignição por faísca são cerca de 270 g/KWh [51].

## 2.5 Análises CFD

### 2.5.1 Revisão Histórica

As técnicas de Dinâmica de fluidos computacional foram desenvolvidas ao longo de bastantes anos com muitas tentativas e erros, refinamento e muitos processos de validação [58].

Não se sabe ao certo quem realizou os primeiros cálculos de CFD no entanto, *Lewis Fry Richardson* em Inglaterra desenvolveu o primeiro método numérico para previsão da meteorologia dividindo em múltiplas células e usando métodos aproximados das equações diferenciais primitivas de *Bjerkne's*. No entanto, este método acabou por falhar.

Em 1933 uma das primeiras soluções numéricas de um escoamento sobre um cilindro foi realizado por *Thom*. Trinta anos mais tarde o departamento teórico da NASA em Los Alamos começou a contribuir com inúmeros métodos numéricos ainda hoje usados como: PIC, MAC, Vorticity-Stream function, ALE e até o modelo de turbulência k-E. Em 1970 foram desenvolvidos algoritmos de resolução como SIMPLE e o TEACH. Também foi desenvolvida a diferenciação "Upwind" e alguns modelos de combustão.

Por fim, com a publicação do livro "Numerical Heat Transfer And Fluid Flow" em 1980 por *Suhas V. Patankar* obteve-se o último evento chave até à data. De facto, este livro proporcionou ao mundo centenas de novos códigos CFD [36].

### 2.5.2 Introdução

A análise computacional de fluidos, é a área de engenharia que trata da simulação numérica de fluidos, transferência de calor e fenómenos relacionados. Isto é possível ao usar as equações presentes na mecânica dos fluidos e usando métodos de discretização como o métodos dos volumes finitos. Com este método conseguimos definir o domínio contínuo como um domínio discreto, onde um conjunto de volumes de controlo é utilizado, substituindo o domínio original.

Atualmente, esta área apoia diversos projetos e fabricação de centenas se não milhares de produtos desde os automóveis aos navios e aviões. A análise CFD pode ser usada desde a fase conceptual de um projeto ou até à etapa de produção do mesmo, ajudando na sua viabilidade e na melhor solução deste. Esta ferramenta permite [37]:

- Planear e gerir recursos hídricos;
- Analisar a aerodinâmica e termodinâmica de diversos veículos;
- Avaliar refrigeração de equipamentos industriais como reatores nucleares ou motores;
- Fazer estudos de dispersão de gases;
- Testar e desenvolver projetos de sistemas propulsivo e de geração de energia;

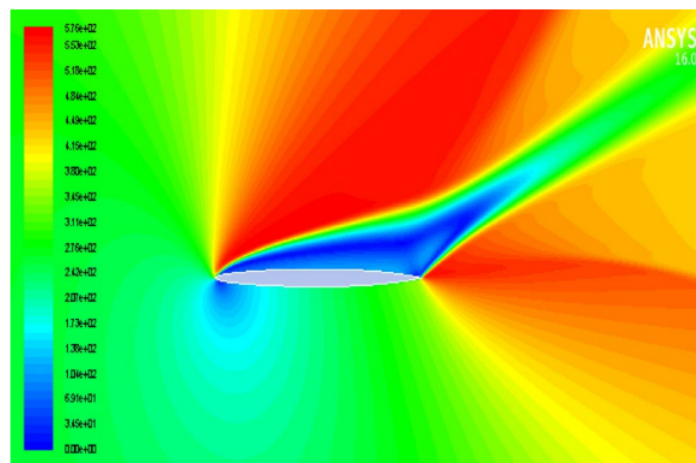


Figura 8: Contornos de velocidade num perfil alar simétrico a  $Ma=1$  [55]

### 2.5.3 Métodos dos volumes finitos

As equações que governam um sistema físico assumem normalmente a forma de equações diferenciais nas quais são expressos os princípios físicos mais fundamentais: **A conservação de massa, a quantidade de movimento e o balanço das trocas energéticas**. Se estimularmos um estado de equilíbrio independente da forma como, este obviamente será alterado.

O métodos dos volumes finitos discretiza um domínio de um sistema físico em pequenos elementos (ou volumes). Estes elementos devem ter uma morfologia simples e adequados à geometria que é pretendido modelar.

Assim, assume-se que as variáveis de campo, pretendidas para análise como **pressão, temperatura, velocidade** variam de forma linear de dentro de cada célula. Posto isto, é possível integrar as equações de Navier-Stokes ao longo de cada célula e os valores respetivos em cada nó. Estes nós estão usualmente colocados nas extremidades de cada volume ou no centróide. Com uma malha com mais elementos (e consequentemente nós) tem-se uma maior precisão, com o custo de maior tempo de computação.

Por outro lado, os valores entre cada célula ou faces são obtidos através de vários métodos de interpolação como: Método UpWind, Second-order/Linear Upwind, Central Differencing, QUICK entre outros [4]. Cada método tem as suas vantagens. No entanto, o próprio programa ANSYS Fluent declara que o método de Second-order Upwind tem resultados mais precisos pelo que será este o utilizado.

### 2.5.4 Modelo de turbulência k-omega SST

O modelo de turbulência k-omega SST (de duas equações) permite calcular o escoamento turbulento de forma precisa a um custo computacional razoável (ver [11] ou [19]). O modelo k-epsilon não apresenta soluções razoáveis em algum tipo de escoamentos. Por outro lado, no modelo k-omega, existe uma grande sensibilidade aos valores iniciais e em paredes lisas o escoamento não separa. Assim o modelo k-omega SST tem como objetivo resolver estes problemas e fornecer melhores dados de separação.

Em termos simples, os dois modelos anteriormente mencionados são multiplicados por uma função de união [eq. 11] e adicionados [22] :

$$(1 - F_1) \text{ onde } \begin{cases} F_1 = 0 \Rightarrow \text{Modelo k-}\epsilon \\ F_1 = 1 \Rightarrow \text{Modelo k-}\omega \end{cases} \quad (11)$$

Isto significa, que as equações de transporte ficam:

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu t}{\sigma k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \epsilon \quad (12)$$

$$\frac{\delta(\rho \omega)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu t}{\rho k} \right) \nabla k \right) + \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \underbrace{2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \nabla k : \nabla \omega}_{\text{Termo adicional}} \quad (13)$$

Com estas equações o modelo usado perto de paredes será o quando  $F_1 = 1$  ou seja modelo k-omega.

Quando estiver afastado das paredes será então o modelo k-epsilon [5]. Outra modificação, inclui a adição do termo adicional na segunda equação do modelo e da equação de união. Isto permite um comportamento adequado das equações tornando os resultados mais confiáveis e precisos [22].

Por fim, é de salientar que um limitador de viscosidade também é adicionado. Isto permite resultados mais precisos quando comparados com resultados experimentais [6].

Nota:  $\nabla k : \nabla \omega = \frac{\delta k}{\delta x_j} \frac{\delta \omega}{\delta x_j}$

### 2.5.5 Resíduos

Em qualquer simulação CFD é sempre necessário verificar e analisar gráficos de resíduos que podem ter o aspeto semelhante ao da figura 9.

Fisicamente, os resíduos representam a diferença entre a energia que "entra" e a energia que "sai".

Dado que computadores calculam equações e problemas matemáticos através de iterações, durante este

processo a lei de conservação de energia não é cumprida. Desta forma é adicionado uma variável  $r$  o qual representa esta diferença [1]. Por outras palavras, o termo residual representa **a diferença de energia local em cada célula.**

Após calcular o residual de todas as células na malha, é calculado um valor representativo deste vetor. Dependendo do programa este valor pode ser obtido de diferentes formas [1]:

- $L_1$  Norm =  $\sum_{i=0}^n |r_i|$
- $L_2$  Norm =  $\sum_{i=0}^n (|r_i^2|)^{0.5}$
- $L_\infty$  Norm =  $\max |r_i|$

No caso do programa usado nesta dissertação (Ansys Fluent) é a soma de total de todos os valores [25] ou a norma  $L_1$ .

Isto implica que os valores de residuais são **dependentes** do número de células.

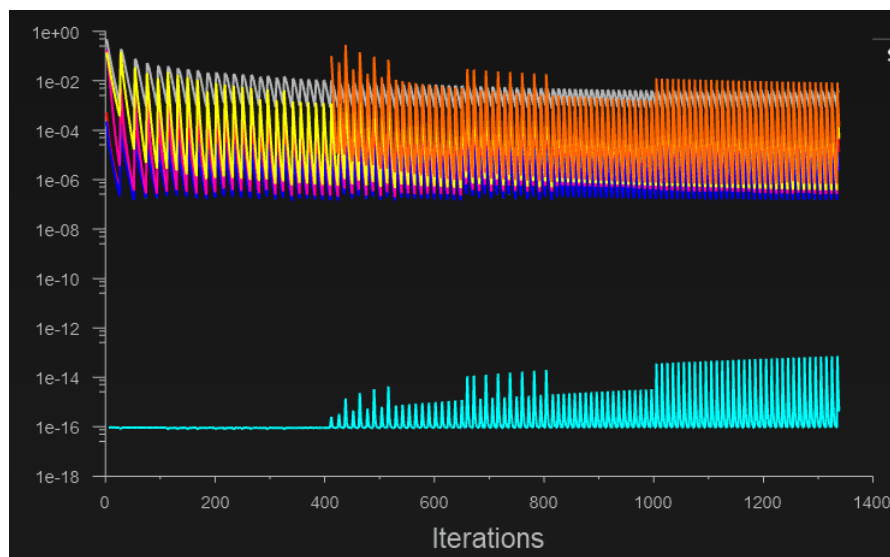


Figura 9: Exemplo do aspeto de um gráfico de residuais numa simulação CFD transiente com equação de energia ativada.

### 2.5.6 Número de Courant

O número de Courant ou o critério de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy é um valor adimensional que representa o tempo que uma partícula permanece em uma célula na malha [2].

Assim este valor é dado por :

$$C_0 = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \quad (14)$$

Este deve ser menor que 1 e idealmente menor que 0,7. Se o número de Courant for maior que 1 irá "saltar" células da malha e a análise perder informação. Isto significa que o passo de tempo é demasiado alto e que deve ser diminuído [74]. Assim, temos um valor que avalia a estabilidade da solução [2]. A variável  $U$  representa a velocidade,  $\Delta t$  o "time step" da simulação e o  $\Delta x$  o tamanho característico das células da malha.

### 2.5.7 Equação de energia

Para permitir ao software o calculado da evaporação de combustível líquido para vapor e vice-versa, é necessário considerar a teoria de transferência de calor. Transferência de calor é um processo dinâmico no qual energia/calor é transferida de um corpo mais quente para outro mais frio [3]. Esta área é demasiado extensa para entrar em detalhes neste capítulo e dissertação. Para consulta posterior nesta área podem ser consultado livros como [57] ou [52].

O programa *Ansys Fluent* resolve a equação de energia na seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial x} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( K_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\overline{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (15)$$

onde os primeiros três termos da equação da direita representam a energia transferida por condução, difusão de espécies e dissipação viscosa respetivamente. Esta equação também inclui o calor de reações químicas e outras fontes volumétricas de calor definidas pelo usuário [23].

### 2.5.8 Algoritmo SIMPLE

O algoritmo SIMPLE ou *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* é usado para resolver numericamente as equações de Navier-Stokes foi desenvolvido por *Brian Spalding e outros* no início da década de 70's [80].

Apesar de nas equações de Navier-Stokes existirem quatro incógnitas (as componentes XYZ de velocidade e uma incógnita de pressão) e quatro equações, estas são incrivelmente difíceis de resolver. Isto acontece pois não existe nenhuma equação para a pressão. As componentes de velocidade têm obrigatoriamente de satisfazer a equação de continuidade. Por outro lado, o termo de convecção é não linear e não podemos usar a equação de gases perfeitos para resolver a pressão pois a massa específica e a temperatura teriam de ser constantes.

Assim o algoritmo SIMPLE age neste problema derivando uma equação para a pressão proveniente das equações de continuidade e momento. Posto isto, deriva um campo de velocidades que respeita a equação de continuidade [7].

É de salientar que uma grande desvantagem deste algoritmo é que **O campo de velocidades não satisfaz a equação do momento**, pois o campo de velocidades é obtido usando esta equação. Após isto são feitas as correções necessárias para satisfazer a equação de continuidade. Consequentemente, depois das correções a equação de momento, deixa de ser satisfeita [7].

Durante esta dissertação este algoritmo foi o utilizado para o cálculo dos valores. Não só se revelou ser o mais rápido a convergir como também o mais rápido a calcular os valores de residuais. Existem de facto outros algoritmos que poderiam ser utilizados. No entanto, como o tempo de computação era necessário manter-se baixo dada a limitação de 4 processadores na licença, foi escolhido o algoritmo SIMPLE.

É de salientar que uma grande desvantagem deste algoritmo é que **O campo de velocidades não satisfaz a equação de momento** pois o campo de velocidades é obtido usando esta equação. Após isto são feitas as correções necessárias para satisfazer a equação de continuidade. Consequentemente, depois das correções a equação de momento deixa de ser satisfeita [7].

### 3 Medidas, Cálculos e decisões preliminares

#### 3.1 Medidas Iniciais

Antes de começar a análise *CFD* foi necessário obter as medidas das peças envolvidas no estudo. Isto revelou-se ser um desafio. Entre o carburador e o motor existe uma peça no qual o escoamento sofre um efeito de Venturi.

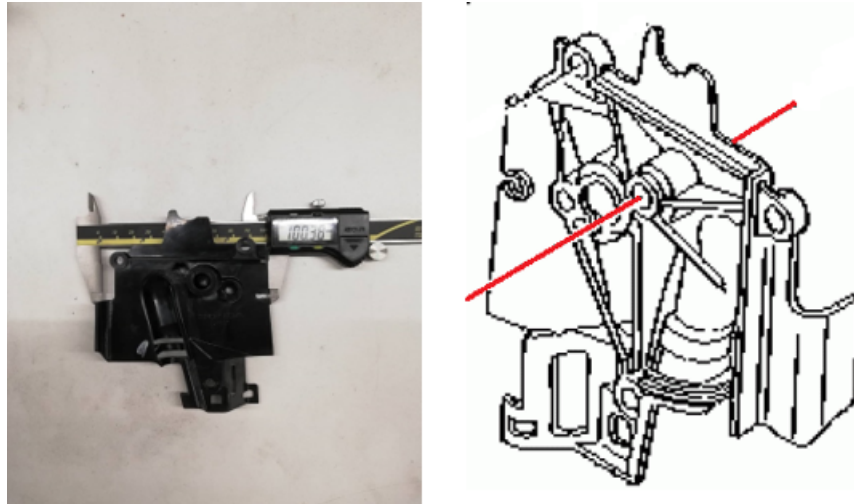


Figura 10: Componente a ser alterado. À esquerda foto da peça original do motor em questão. À direita vista isométrica da mesma peça cortesia de [30]. Para efeitos de referencia é apresentado a largura da peça com um paquímetro. A figura é meramente ilustrativa.

A vermelho podemos observar a passagem do escoamento. Esta conduta é cónica pelo que retirar as medidas dos diâmetros internos incluindo da secção intermédia com precisão foi deveras complicado. No entanto, com o auxílio de um paquímetro digital foi possível chegar ao esquema da figura 11.

Nota: O esquema não está à escala deste modo serve apenas de referência.

Como podemos observar, o esquema ainda não está completo. Faltam medidas como dos ângulos de entrada ou do comprimento do difusor e do bocal. Podemos no entanto avaliar o funcionamento do difusor e dimensioná-lo consoante a informação apresentada.

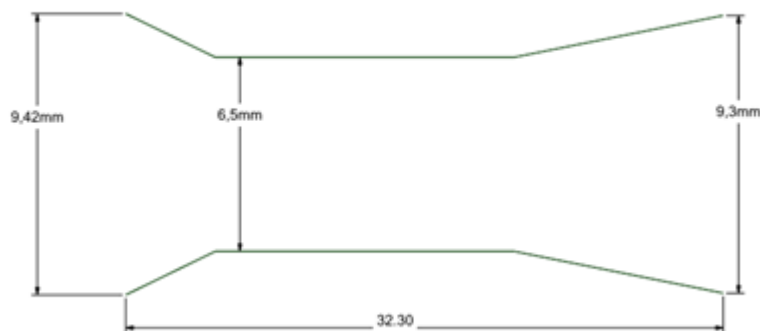


Figura 11: Esquema transversal do elemento de ligação entre o carburador e a admissão de o motor Honda GX25. As medidas representam os respectivos diâmetros.

## 3.2 Dimensionamento do difusor e bocal

### 3.2.1 Dimensionamento do difusor

A forma de avaliar o desempenho de um difusor é através do seu Coeficiente de pressão de recuperação.

Se assumirmos um escoamento sem fricção podemos retirar da Equação de Bernoulli e da Equação de conservação de massa a expressão 16.

$$C_{p,frictionless} = 1 - (AR)^{-2} \quad (16)$$

$$\text{onde } AR = \frac{A_2}{A_1}$$

É de notar que valores reais (medidos experimentalmente) têm valores entre 0,86 e 0,24. Esta discrepância é causada pela fricção das paredes que "obriga" o escoamento próximo a quebrar e reduzir a qualidade do difusor [62]. A análise dimensional diz que o valor de  $C_p$  numa conduta cônica depende dos seguintes parâmetros:

- Razão de áreas;
- Ângulo de divergência;
- Número de Reynolds de entrada;
- Número de Mach de entrada;
- Fator de bloqueio na camada limite de entrada.

Podemos então criar mapas de desempenho das condutas dependentes destes valores semelhantes ao da figura 13.

Sabemos que a razão de áreas do nosso difusor é  $AR = \frac{\pi \frac{9,3^2}{4}}{\pi \frac{6,5^2}{4}} \cong 2,0$ . Por outro lado, o valor  $\frac{L}{d}$  é obrigatoriamente menor que 3,47 visto que  $\frac{L}{d} = \frac{32,30}{9,3} = 3,47$ . Deste modo, na figura 13 foi destacado a **verde** a zona onde o difusor obrigatoriamente se encontra. Seguindo a linha

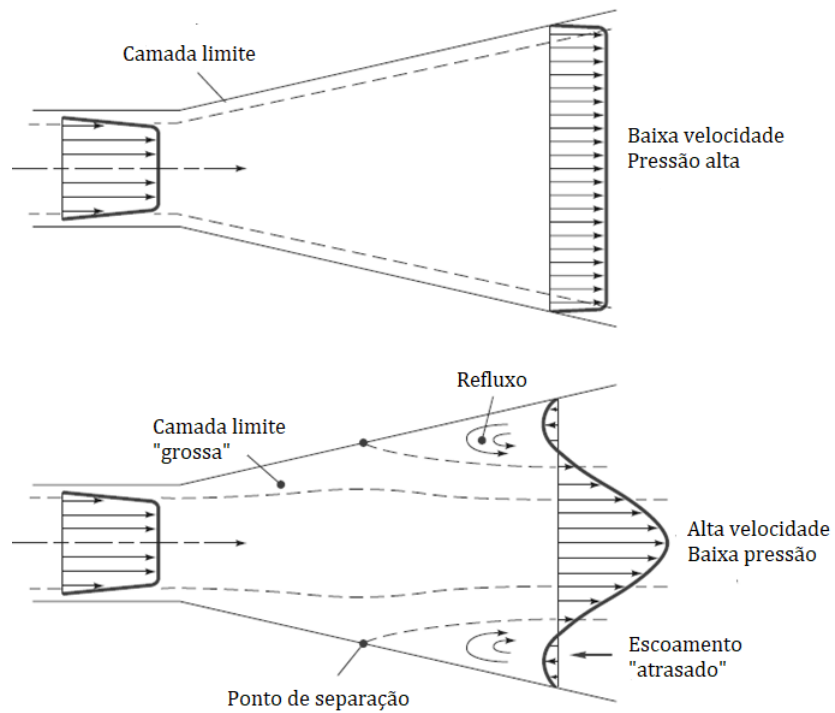


Figura 12: "Performance de um difusor". Em cima a situação ideal. Abaixo esquema de um difusor real com separação da camada limite. Figura retirada de [62]

**vermelho** até ao  $C_p$  do difusor ( $\cong 0,76$ ) podemos concluir que o difusor tem um ângulo de divergência de cerca de 10 graus. Estes valores são consistentes com o mapa de estabilidade presente em [62].

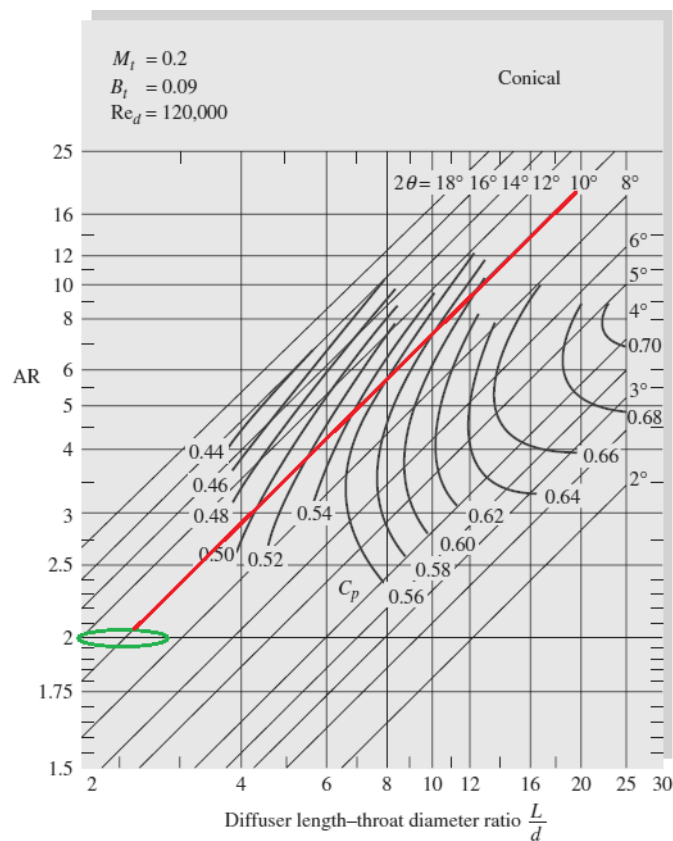


Figura 13: Mapa de desempenho para um difusor cônico típico.

### 3.2.2 Dimensionamento do bocal

De acordo com [41] sabemos que um túnel de Venturi típico tem 30 graus no seu bocal.

### 3.3 Modelação das peças

Com as medidas apresentadas na figura 11 e com os ângulos obtidos anteriormente podemos modelar a conduta por onde se dará a passagem do ar e do combustível.

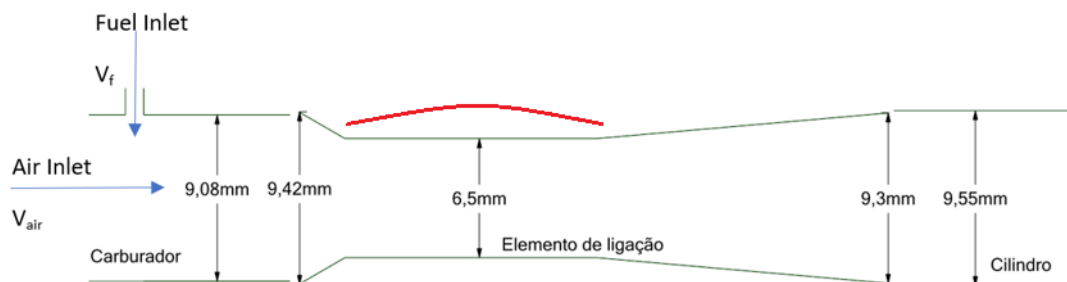


Figura 14: Esquema 2D da conduta a ser estudada em CFD

Destacado a vermelho, o local onde serão colocados os geradores de vórtices futuramente. Antes da zona destacada está a representação do carburador e o bocal. Após a zona a vermelho, temos então o difusor e a representação esquemática da conduta até ao cilindro no qual iremos observar os testes. O comprimento total de ambos será 4 mm. A entrada do combustível está centrada no carburador a 2 mm de distância da entrada no túnel de Venturi e é uma conduta cilíndrica de 2 mm de diâmetro. Esta medida não tem nenhum fundamento científico. Como não foi possível medir as componentes foi necessário tomar uma decisão que parece-se razoável ao autor. É de salientar que estas serão mantidas constantes ao longo de todo o estudo *CFD* pelo que não deve afetar as conclusões retiradas. Existirá no entanto uma maior diferença para a fase experimental.

**Nota:** A figura 15 não está à escala. Desta forma, serve apenas de esquema. Concluindo a breve explicação podemos modelar a conduta. Foi usado a ferramenta *Spaceclaim* integrada no software *Ansys Fluent*. Este software foi obtido através do link [26] usando uma licença de estudante, cortesia da Universidade da Beira Interior:

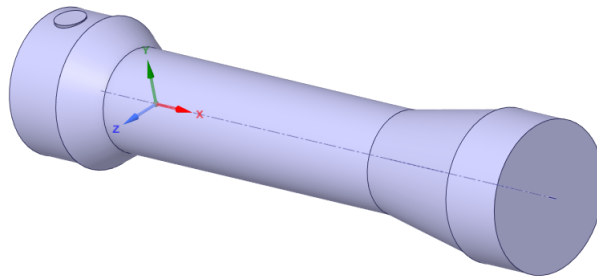


Figura 15: Esquema 3D da conduta desenhada em SpaceClaim ferramenta de modelação

É de salientar, que a figura 15 representa o **domínio completo do fluido**. Por motivos de cálculo foi necessário adicionar uma estrutura exterior. As três vistas da conduta exterior foi colocada no **Apêndice A-Vistas ortogonais da conduta de controlo**. Por fim, na figura anteriormente descrita, também é possível observar-se o referencial usado ao longo de toda a análise. Este está colocado no centro geométrico da conexão entre a saída do bocal e a entrada da secção intermédia (menor secção transversal) da conduta. Esta conduta foi denominada de **conduta de controlo**.

### 3.4 Velocidade de escoamento

O motor Honda GX25, está dimensionado para trabalhar entre as 6000 e 7000 RPM. Se analisarmos os gráficos fornecidos pela Honda vemos que o regime onde temos maior binário e potência é dado a cerca de 7000 RPM antes de começar uma queda de na potência criada devido as eficiências volumétricas do motor. Assim, as análises serão realizadas para 7000 RPM. Os gráficos e informações respetivas ao motor foram retiradas do Website [53] e serão devidamente resumidas e colocadas no **Apêndice B-Motor Honda GX25**.

Pelo Apêndice B, retiramos que o pistão percorre 26 mm. Como foi visto anteriormente, de acordo com *John B. Heywood* [46] retiramos a velocidade média do pistão em função das Rotações por minuto (RPM) através da equação 7.

Por outro lado, se dividirmos esta velocidade pelo o volume deslocado conseguimos obter o tempo necessário para "encher" o cilindro de combustível e ar ( $T_e$ ). Ou seja  $\frac{0,026}{S_p}$ .

Para calcular o caudal de escoamento é necessário descobrir o peso de combustível e de ar proveniente do carburador. Assumindo uma estequiometria de 15.14 kg de ar para 1 kg de

combustível [46]. As propriedades de fluidos foram retiradas a 20 Cº (ver [63]). Estes valores são  $\rho_{ar} = 1,20kg/m^3$  e  $\rho_{fuel} = 680kg/m^3$ .

Criamos então o seguinte sistema de equações:

+

$$\begin{cases} 1kg_{ar} = 15,14kg_f \\ 1,2K g_{ar} = 1m_{ar}^3 \\ 680kg_f = 1m_{ar}^3 \\ m_{ar}^3 + m_f^3 = 25 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (17)$$

Resolvendo, obtemos que para o volume do cilindro ( $25cm^3$ )

$$\begin{cases} kg_f = 3,5808 \times 10^{-8} \\ kg_{ar} = 5,421 \times 10^{-7} \\ m_{ar}^3 = 6,505 \times 10^{-7} \\ m_f^3 = 2,434944 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (18)$$

Somando o peso de ar e combustível, e dividindo pelo tempo máximo para encher o cilindro conseguimos então obter o caudal na entrada deste. Posto isto criamos a tabela 1:

Tabela 1: Tabela da velocidade média do pistão, do tempo mínimo desde o PMS ao PMI e do caudal

RPM	$S_p[m/s]$	Te[s]	$Q_0[kg/s]$
0100	0,0867	0,3000	1,9263E-06
0500	0,4333	0,0600	9,6318E-06
1000	0,8667	0,0300	1,9264E-05
1500	1,300	0,0200	2,8895E-05
2000	1,7333	0,0150	3,8527E-05
2500	2,1667	0,0120	4,8159E-05
3000	2,600	0,010	5,77908E-05
3500	3,0333	0,0086	6,74226E-05
4000	3,4667	0,0075	7,70544E-05
4500	3,9000	0,0067	8,6682E-05
5000	4,3333	0,0060	9,6318E-05
5500	4,7667	0,0054	1,0595E-04
6000	5,2000	0,0050	1,1558E-04
6500	5,6333	0,0046	1,25213E-4
<b>7000</b>	<b>6,0667</b>	<b>0,0043</b>	<b>1,3484E-4</b>
7500	6,5000	0,0040	1,4447E-04
8000	6,9333	0,0036	1,5411E-4

Para obter a massa específica da solução utiliza-se a seguinte equação  $\rho = \frac{m_1+m_2}{V_1+V_2}$  isto é,  $\rho_{ar+fuel} = 0,83483$  [72].

Pela figura 16 verifica-se que as perdas (**K**) devido às expansões são mínimas e foi calculado um difusor com o objetivo de minimizar as perdas neste [64]:

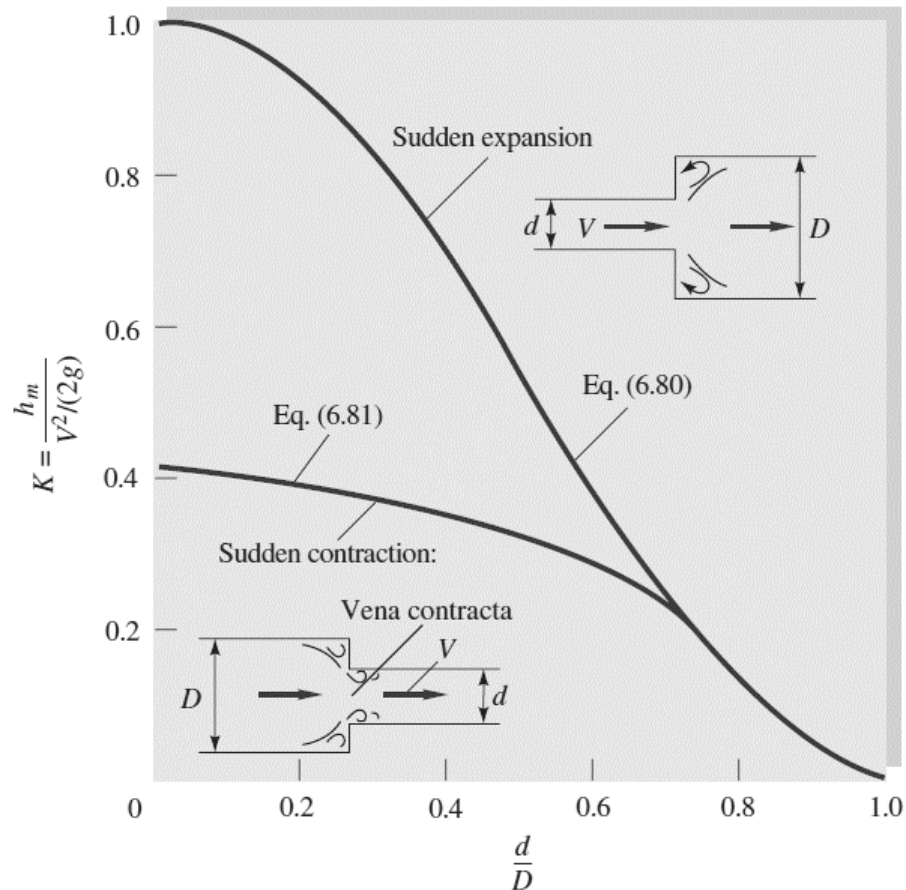


Figura 16: Perdas K em expansões e contrações subtidas

Por outro lado, a conduta tem um comprimento de 32,30 mm ou de 0,03230 m pelo que as perdas devido ao atrito podem ser desprezadas. Posto isto, pela lei de conservação de massa ( $Q = \rho AV$ ) obtemos que na entrada do cilindro o escoamento tem uma velocidade de:

$$V_e = \frac{Q_0}{0,834823 \times 6,475 \times 10^{-5}}$$

Para tal criamos a tabela 2 da velocidade de entrada em função das RPM:

Tabela 2: Velocidade do escoamento na entrada do túnel de venturi do motor em função das suas Rotações por minuto

rpm	Var+comb m/s
0100	0,0356
0500	0,1782
1000	0,3564
1500	0,5345
2000	0,7127
2500	0,8909
3000	1,0691
3500	1,2472
4000	1,4254
4500	1,6036
5000	1,7818
5500	1,9599
6000	2,1381
6500	2,3163
<b>7000</b>	<b>2,4945</b>
7500	2,6726
8000	2,8508

Foi destacado a negrito a velocidade para o qual a análise será dada (7000 RPM)

É necessário por fim descobrir a velocidade do ar e de combustível líquido para criar as condições de fronteira. Sabemos que o caudal de ar e de combustível é igual ao caudal na entrada no Venturi. Por outro lado, também se sabe a relação de estequiometria dos dois fluidos. Equacionando isto fica:

$$\begin{cases} \rho_f \times A_f \times V_f + \rho_{air} \times A_{air} \times V_{air} = Q_{out} \\ 15,14\rho_f \times A_f \times V_f = \rho_{air} \times A_{air} \times V_{air} \end{cases} \quad (19)$$

Resolvendo, podemos obter os valores de velocidade em função das Rotações por minuto do motor, presentes na tabela 3.

Tabela 3: Velocidade de entrada do escoamento de ar e de combustível (no carburador) em função das RPM do motor Honda GX25

RPM	$V_f m/s$	$V_{air} m/s$
0100	5,5869E-05	0,0233
0500	0,0003	0,1163
1000	0,0006	0,2325
1500	0,0008	0,3488
2000	0,0011	0,4651
2500	0,0014	0,5814
3000	0,0017	0,6977
3500	0,0019	0,8139
4000	0,0022	0,9302
4500	0,0025	1,0464
5000	0,0028	1,1628
5500	0,0031	1,2790
6000	0,0034	1,3953
6500	0,0036	1,5116
<b>7000</b>	<b>0,0039</b>	<b>1,6278</b>
7500	0,0041	1,7441
8000	0,0045	1,8604

### 3.5 Geradores de Vórtice

#### 3.5.1 Posicionamento

Entre geradores de vórtice transversais e longitudinais, os últimos oferecem resultados semelhantes com penalizações de pressão menores [38] ou [11]. No entanto, existe a necessidade de tomar mais escolhas perante os estudos realizados até à presente data. Isto é, o formato dos GV's, se serão colocados aos pares ou de forma singular e o local onde colocar e o padrão de colocação destes.

Como o objetivo é o impacto na mistura de combustível, será inteligente analisar como se propaga o escoamento. Para tal foi criada uma animação usando o programa de análise. Esta animação pode ser encontrada no **Apêndice N-Animação de propagação do escoamento de combustível**. A figura 17 representa parte desta animação e o desenvolvimento deste escoamento. Na primeira imagem podemos ver o início da aspiração de combustível quando este começa a ser transportado pelo ar. Com o passar do tempo (figura imediatamente à direita) vemos que este começa a ser espalhado pela conduta concentrando-se pela parte superior e tendo uma má distribuição. Com o aumento de combustível líquido no início da conduta podemos observar que este começa a estar mais espalhado e a chegar a admissão do motor (terceira figura). De seguida, momentos após o final da injeção (primeira figura segunda linha) observamos que o combustível se concentra em duas zonas: Parte superior da secção transversal menor e na parte inferior do bocal (a vermelho). Na terceira linha primeira coluna, são momentos após o final do escoamento total onde a última evaporação se dá. A imagem a grande representa o estado final do ciclo.

Com a análise da animação presente no **Apêndice N** ou da figura 17 é fácil concluir que: O combustível está mais presente nas paredes da conduta. Os locais onde se encontra mais é na parede superior e inferior do corte.

Serão portanto realizados múltiplos testes todos nas mesmas condições alterando apenas a

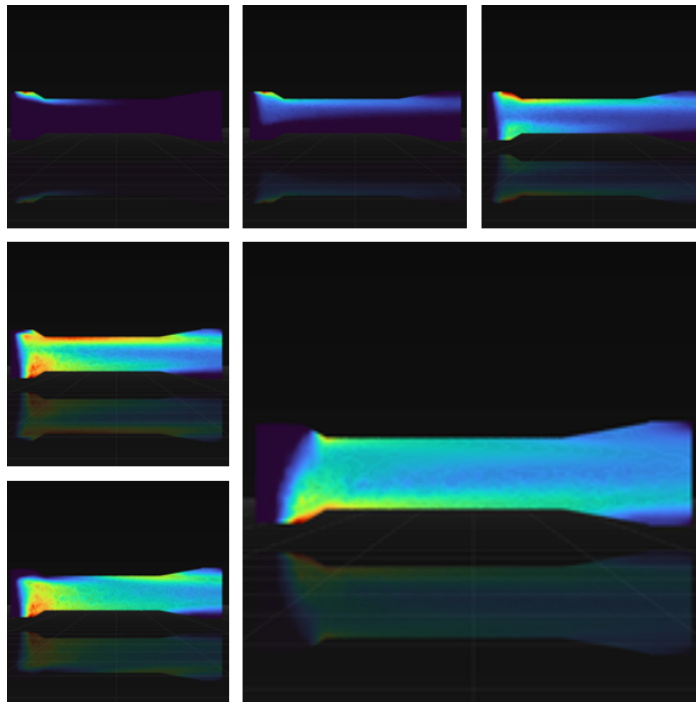


Figura 17: Representação do desenvolvimento do escoamento ao longo da análise.

componente a ser testada. Todos os valores serão posteriormente comparados com os valores apresentados pela conduta de controle.

Os estudos de todos os geradores de vórtice serão realizados unicamente com um tipo **Delta winglet** (ver fig. 18). Estes apresentam os melhores resultados de resistência ao avanço do escoamento dado que o bordo de ataque está o mais próximo possível da parede e grande parte da sua superfície se encontra dentro da camada limite [59]. Posteriormente outros tipos de geradores podem ser estudados. Outro argumento válido é as perdas de velocidade e de área de secção transversal serem de consideração grande. Desta forma segundo [28], estes são uma escolha bastante válida.

Consoante as informações anteriores o posicionamento dos GV's será dividido em fases de análise:

- 1<sup>o</sup> Fase: Na zona inferior da conduta de menor secção transversal. Analisando um a um espaçados igualmente (ver tabela 4).
- 2<sup>o</sup> Fase: Nos locais anteriormente colocados no entanto simetricamente colocados a 180<sup>o</sup>, isto é, um na zona superior e outro na zona superior (ver figura 18). Numa segunda "sub-fase" pode ser analisado o caso com 4 geradores colocados a 90 graus entre si. Pela análise do Apêndice N conclui-se que não faz sentido colocar três GV's a 120 graus entre si. As maiores zonas de influencia são sempre a parte superior e inferior da secção central.
- 3<sup>o</sup> fase: Os geradores da primeira fase são retirados da 2<sup>o</sup> fase dando origem a uma terceira fase a qual podemos comparar com a primeira e segunda fase.
- 4<sup>o</sup> Fase: Após obter o local mais eficiente irá ser alterado o ângulo de ataque no teste que apresentasse melhores resultados.

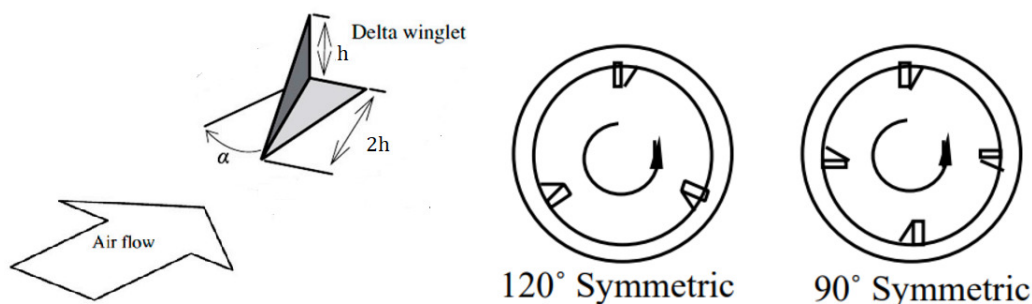


Figura 18: Gerador de vórtice *Delta Winglet* (à esquerda) e possíveis distribuições na seção transversal da conduta (à direita).

### 3.5.2 Dimensionamento

Finalmente é ainda necessário decidir três medidas: a altura, o comprimento e o ângulo de ataque deste em relação ao escoamento.

O comprimento será à semelhança de um estudo antecedente, no qual o comprimento será duas vezes a altura total do GV [14]. Para o ângulo de ataque inicial será usado um valor de  $40^\circ$  pois para números de Reynolds baixos este valores de ângulo de ataque têm maior impacto no escoamento e no transporte de massa no vórtice [60].

Por fim, a altura será igual à espessura da camada limite no qual o gerador se encontra pois esta é uma prática comum [42].

É de salientar que um ângulo de ataque alto resulta em melhor mistura de fluido pois gera vórtices maiores e mais longos com a troca de perdas de pressão e velocidade [9].

A espessura da camada limite, num regime laminar [65] é dado por

$$\delta = x \times \frac{5,0}{\sqrt{Re}} \text{ onde } Re = \frac{\rho V D}{\mu} ..$$

No entanto, esta fórmula empírica só é válida para números de Reynolds entre  $13^3 < Re < 10^6$ . Assumindo, viscosidade do escoamento como a média dos valores de [63] podemos retirar que os números de Reynolds do escoamento são  $10^2 < Re < 10^3$ . Desta forma, os valores obtidos não serão confiáveis.

Se realizarmos uma análise *CFD* preliminar na conduta de controlo, e retirarmos os valores da magnitude de velocidade obtemos a figura 19.

Esta figura demonstra claramente a camada limite formada no escoamento.

É possível então retirar os valores da magnitude de velocidade ao longo das posições dos GV's. Foi decidido um espaçamento de 0.005 dividindo a conduta num total de 4 vezes. É de salientar que esta decisão não tem fundamento teórico para além de julgamento de engenharia. Caso se prove que as alterações têm impactos grandes deve-se diminuir o espaçamento.

Para uma análise mais precisa da camada limite foi retirado do programa Ansys Fluent o gráfico representativo presente na figura 20. A distância é referente ao referencial anteriormente designado.

É definido como a espessura da camada limite como o conjunto de pontos onde a velocidade paralela à placa atinge 99 % da velocidade total [66]. O que pelos gráficos anteriores retiramos os valores da espessura da camada limite em função da posição na conduta presentes na tabela 4. Para a segunda fase prosseguimos da mesma forma onde obtemos a tabela 5.

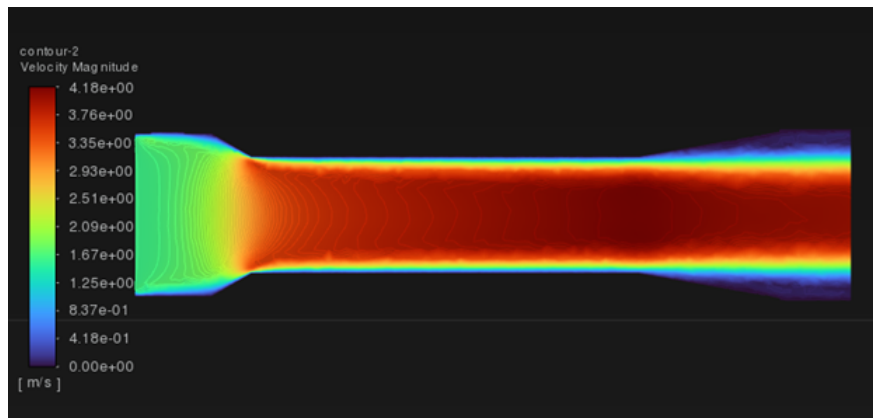


Figura 19: Magnitude da velocidade do escoamento na conduta de controlo.

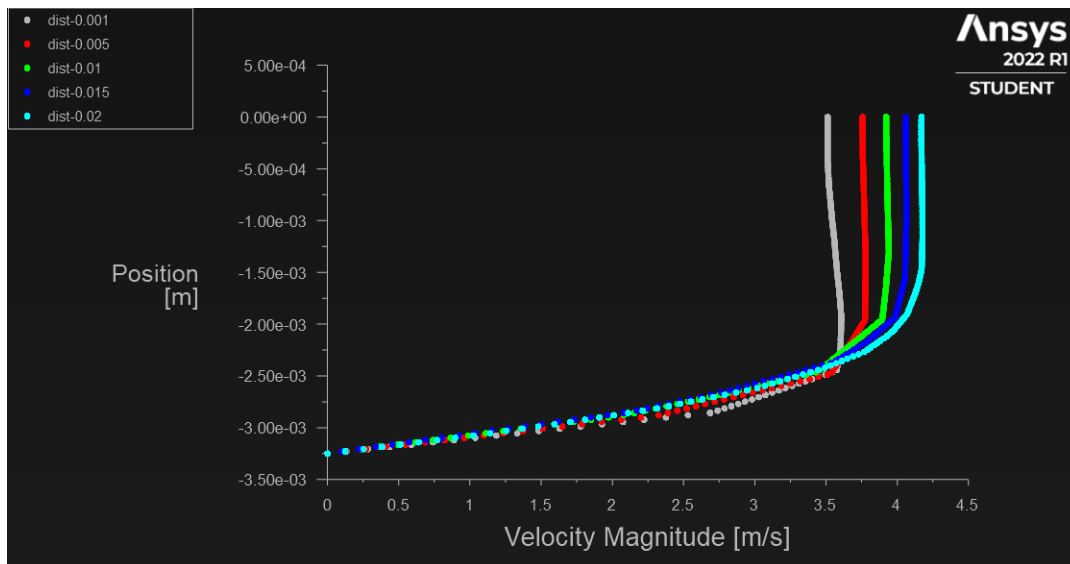


Figura 20: Gráfico das camadas limites ao longo da conduta de menor secção transversal na parte de "baixo".

Tabela 4: Tabela da espessura da camada limite ( $y^+$ ) em função da sua posição na conduta (Distância X) na parte de "baixo".

Distância X	Max m/s	0.99xMax m/s	$y^+$	$Y^+$ [mm]
0.005	3,77784	3,7400616	0,00122148	1,22148
0.01	3,94057	3,9011643	0,00137416	1,37416
0.015	4,06529	4,0246371	0,00152685	1,52685
0.02	4,17769	4,1359131	0,00159228	1,59228

Para finalizar é necessário definir uma espessura. Devido ao número de elementos da malha ser limitado e pelo facto de o objetivo final ser o transporte para o contexto real. Este valor não deve por ventura influenciar os valores finais caso não seja bastante alterado dentro de valores

Tabela 5: Tabela da espessura da camada limite ( $y^+$ ) em função da sua posição na conduta (Distância X) na parte de "cima".

Distância X	Max m/s	0.99xMax m/s	$y^+$	$Y^+$ [mm]
0.005	3,78352	3,7456848	0,00118182	1,18182
0.01	3,94504	3,9055896	0,00147727	1,47727
0.015	4,0648	4,024152	0,00160859	1,60859
0.02	4,17949	4,1376951	0,0015101	1,5101

razoáveis. O valor final de espessura será de 0,2 mm à semelhança do estudo realizado por *Yong-Gang Lei et all* [20]. Por outro lado, sabemos que a construção da peça final será através de uma impressora 3D que deve apresentar uma espessura mínima entre 0,2 mm a 1 mm. Desta forma a escolha de **0,2 mm de espessura** é bastante razoável [39].

## 4 Análise CFD

### 4.1 Variáveis de interesse, critérios e nomenclatura

Para iniciar este capítulo devem ser calculados e apresentados resultados correspondentes ao motor na sua forma original. Isto é, o teste de controlo. Após esta análise podemos proceder à inserção dos geradores de vórtice. Para a análise destes testes será usado o programa *Ansys Fluent* com **4 processadores em paralelo e precisão dupla** [70]. A programação, justificação e qualidade da mesh será dada no **Apêndice C-Setup Ansys Controlo**. Neste capítulo serão apenas apresentados os resultados, e a discussão/conclusão destes.

Antes de qualquer dado será apresentada a independência da malha com as suas respetivas variações percentuais. Foi obtido a independência da malha analisando os valores *TKE* e das frações mássicas de combustível no local de teste dado que estas são as variáveis de maior interesse. O plano vertical está a 0,032 mm do referencial global. A posição deste referencial pode ser visto na figura 15. Para critério de aceitação de independência da rede foi considerado na zona de teste uma variação percentual menor que 4% [67]. É de salientar que 4 % é um valor incrivelmente "apertado" pois até certas fontes consideram valores de 7 % suficientes [54]. Para o cálculo da variação percentual [56] é usada a equação 20. É de salientar que de acordo com *Francisco Brójo*, o número de elementos na malha deve ter um incremento de 20 %. No entanto a ferramenta do Ansys não permite especificar este valor mas sim alterar o tamanho destes ou o número de divisórias. Assim, deve ser garantido este aumento.

$$\frac{Valor_{maior} - Valor_{menor}}{Valor_{maior}} \times 100 \quad (20)$$

Nota: Existe um limite de licença na refinação da *mesh* (Máx 525000). Isto pode levar a nunca ser obtido a variação percentual necessária. No entanto, será sempre calculado até os resultados atingirem este limite imposto.

Dado que ao longo das várias análises múltiplas imagens tem de ser demonstradas estas serão deixadas nos Apêndices respetivos.

Para finalizar, durante a explicação dos gráficos e imagens será sempre na zona de teste da conduta. Para melhor explicação e análise dos resultados será considerado um eixo positivo semelhante ao da figura 15 e 4 quadrantes convencionais de um eixo ortonomado [75] (ver fig. 21)

### 4.2 Independência da malha

#### 4.2.1 Exemplo/Controlo

Dada a grande quantidade de testes a serem realizados e conseqüentemente prova de independência estes serão colocados no **Apêndice D-Independências de Malha**. Neste Apêndice será apresentado as tabelas com o número de elementos, o valor de *TKE* e Fração mássica de combustível e as respetivas variações percentuais. Por outro lado, provas de convergência, balanço de massa e imagens respetivas serão igualmente anexadas. No entanto, no presente capítulo será demonstrado a independência da conduta de controlo como referência do que irá ser encontrado no Apêndice.

A independência de malha da conduta de controlo relativamente rápido dada a simplicidade da conduta.

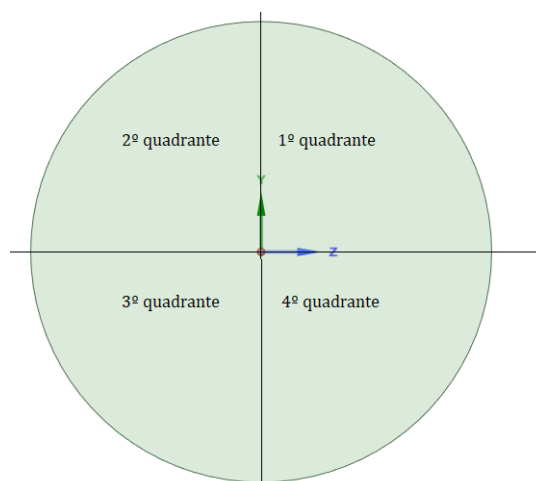


Figura 21: Imagem de referencia para a análise

Nº de elementos	TKE	Var%	Fração combustivel	Var%
50247	0,03001	-	1,3477E-06	-
77646	0,030009	0,003332223	1,3435E-06	0,311642057

A independência da rede é obtida imediatamente com 7746 elementos. A conduta é simples e a geometria não cria grandes dificuldades. Este valor então, não é de estranhar.

Para finalizar deve existir sempre uma confirmação do balanço de massa. Pela lei de conservação de energia este deve ser igual a zero.

Como podemos ver pela figura 22 este valor é maioritariamente zero. Existe uma pequena variação a 0.005 m do referencial global. No entanto pela escala do gráfico vemos que o balanço de massa é essencialmente zero.

É possível observar no último gráfico 23 a convergência dos residuais. Dado que o valor máximo de iterações foi deixado nos 50 é fácil concluir que todos os residuais convergiram.

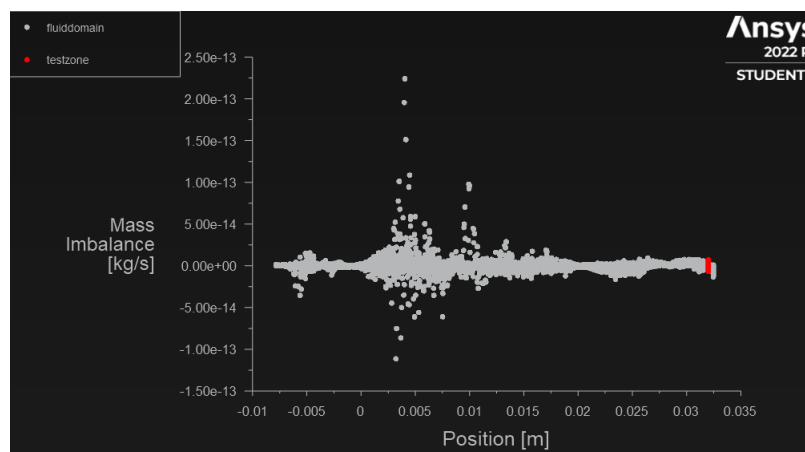


Figura 22: Balanço de massa na conduta de controlo. A vermelho o local da zona de teste.

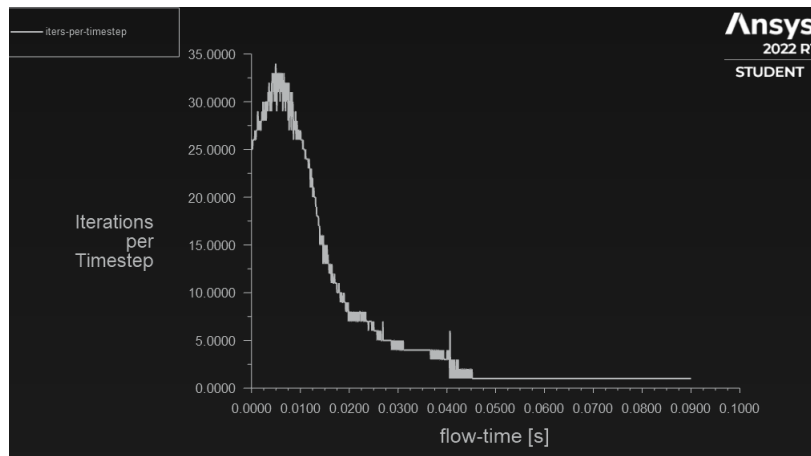


Figura 23: Convergência de residuais durante os 0,09 segundos de escoamento

### 4.3 Resultados do controlo

#### 4.3.1 TKE e Combustível

Na figura 24 podemos observar como se distribui o combustível na zona de teste durante os 0,09 segundos da conduta de controlo. A injeção começa aos 0,0012 segundos. Isto significa que começa a existir uma quantidade considerável de combustível na zona de teste cerca de 0,0258 segundos depois como é possível ver em b). Com a passagem do tempo o combustível propaga-se para a parte inferior à semelhança do visto no último Apêndice . Esta propagação começa em c) mas apenas ao no segundo 0,057 nota-se uma diferença grande. Em f), conseguimos observar a falta de distribuição de combustível em toda a câmara. Este concentra-se na parte superior com algum presente mais abaixo. No entanto, sempre na parte central da zona de teste. Ao fim de 0,0705 segundos temos o momento com mais combustível na câmara chegando a uma fração máxima de  $1,20 \times 10^{-5}$ . É de salientar que a injeção parou no segundo 0,047. Por fim, nas duas imagens seguintes h) e i) temos os estados finais do combustível até ao fim da simulação.

Contrariamente à distribuição de combustível a energia cinética de turbulência tem um comportamento muito mais errático no início estabilizando ao fim de 0,02 segundos. Na figura 25 b) começamos a ter um aumento uniforme desta variável que é mais notável em c). Neste momento os valores de TKE claramente são superiores junto das paredes da conduta. De facto à medida que o tempo passa os valores mantêm-se sempre altos perto das paredes. Na figura 25 e) temos os valores máximos de TKE. Após isto os valores rapidamente estabilizam-se permanecendo semelhantes até ao final.

Graficamente na zona de teste a dispersão de combustível fica como 26. À semelhança do que é visto na imagem 24 ao fim de 0,09 segundos de escoamento existe uma clara simetria na figura 26 a). Por outro lado, a figura 26 b) claramente demonstra uma maior incidência de combustível na parte mais inferior da conduta.

Se se pretendesse uma dispersão uniforme ao longo de toda a zona de teste então idealmente a figura 26 seria uma linha horizontal tanto no gráfico desenhado em direção a Y como em Z. Mais tarde será feita uma análise mais precisa em comparação com as alterações realizadas.

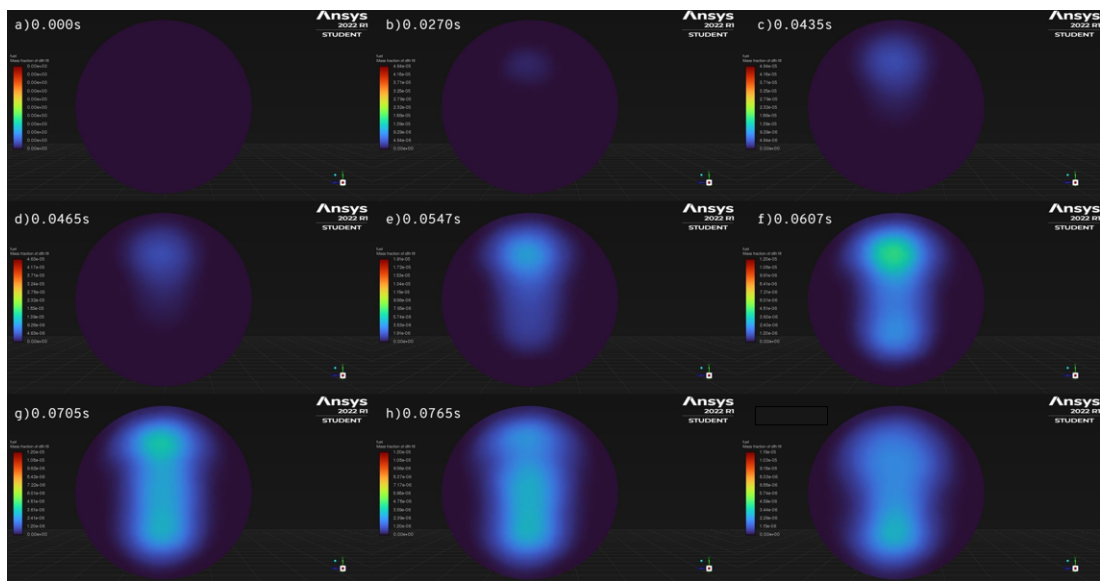


Figura 24: Comportamento do combustível durante toda a análise

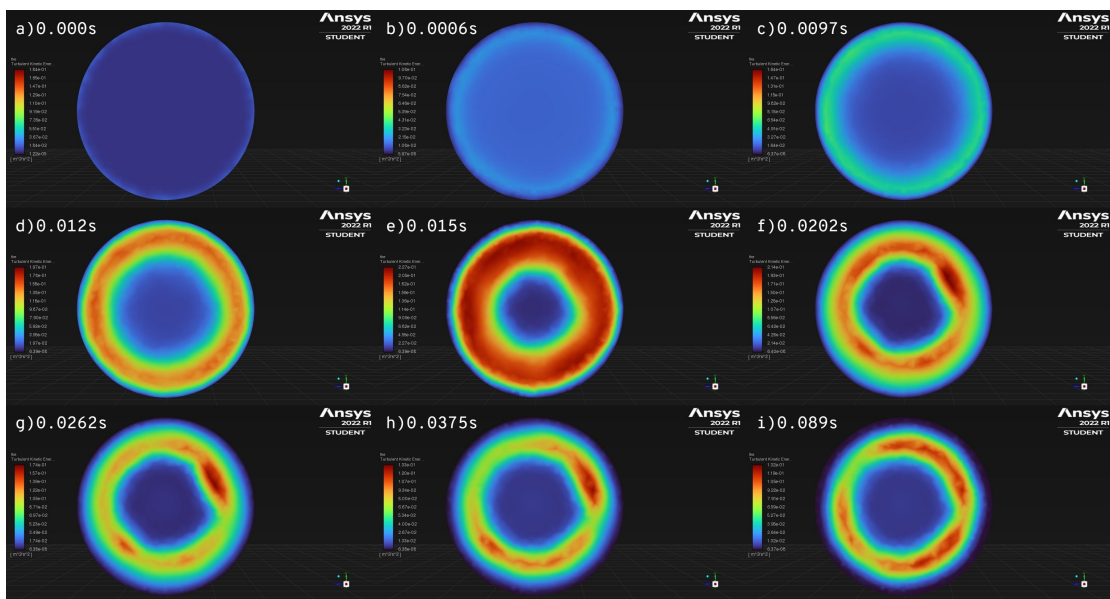


Figura 25: Comportamento de TKE durante toda a análise

## 4.4 Resultados da primeira e segunda fase

### 4.4.1 Análise preliminar da 1ª fase

Os resultados da 1ª fase permitem analisar o impacto que o gerador teve na distribuição do combustível. Todas as imagens à semelhança do que foi visto anteriormente estarão presentes no **Apêndice E-Resultados 1ª fase**

Pela figura 43 do Apêndice e comparando com as figuras de controlo, claramente o gerador de

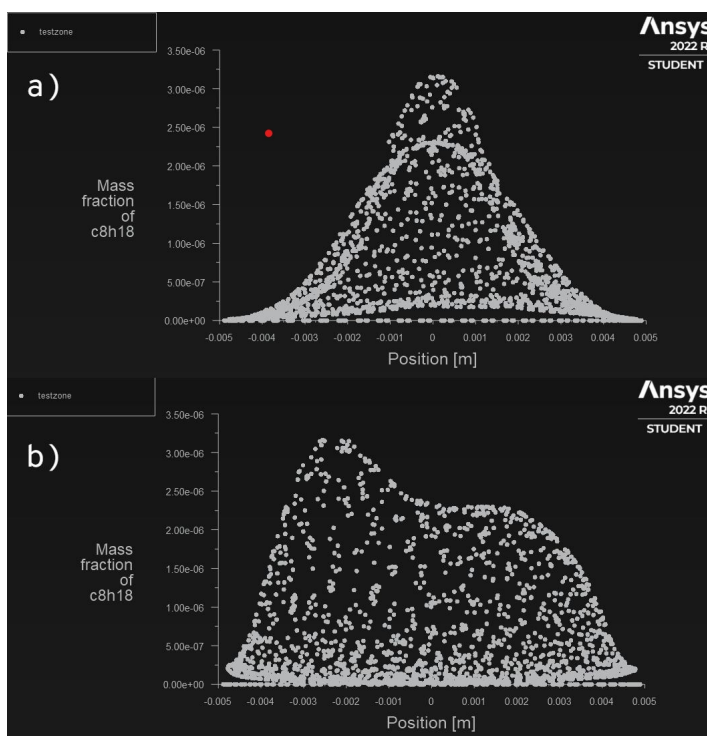


Figura 26: Gráficos de dispersão de combustível na zona de teste. A figura a) representa o gráfico criado na direção de Z. A figura b) representa em Y

vórtice tem um impacto na dispersão de combustível. Com um gerador de vórtice posicionado a 5 mm, se compararmos o estado final da figura 24 com a figura anteriormente mencionada vemos claramente uma melhor distribuição.

Analisando novamente a figura 43 vemos que o lado esquerdo da zona de teste tem muito mais combustível quando comparado com a figura 24 i). De facto, se observarmos a escala de cores podemos inclusive ver que na conduta de controlo o ponto máximo é  $1,31 \times 10^{-5}$  enquanto no GV a ser analisado neste subcapítulo apresenta um máximo de  $1,13 \times 10^{-5}$ .

Na figura 44, são apresentados os contornos da Energia cinética de turbulência. Isto representa a variação média de velocidade por massa. Desta forma, intuitivamente faz sentido a zona com maior valor ser a zona a vermelho na figura 44. Dado que o gerador esta posicionado de forma a gerar o vórtice para a direita.

Para finalizar o estudo do gerador colocado a 5 mm do referencial global na figura 45 e 46 do Apêndice E, observamos os gráficos de pontos desenhados em Y e Z respetivamente. O eixo  $xx$  representa a distância ao centro do círculo representativo da zona de teste. No eixo  $yy$  é colocada a fração mássica de combustível. Pela figura 45, vemos que existe uma concentração maior no terceiro quadrante da zona de teste. Isto faz sentido dado que a gravidade foi ativada. Por outro lado, a 46 indica que temos um pico de combustível na zona central diminuindo a quantidade de forma gradual à medida que nos aproximamos na parede. É de salientar que este pico no entanto é mais baixo quando comparado com a conduta de controlo.

As figura 47,48,49 e 50 apresenta os resultados para um gerador de vórtice **colocado a 10 mm do referencial global**. Os resultados variam pouco quando comparados com o estudo anterior sendo as diferenças mais notáveis nos gráficos e nos contornos de TKE que a zona com maior

valores aparenta ser "central" e um pouco maior. Nos gráficos, a dispersão é semelhante pelo que apenas uma análise mais precisa evitará o inevitável erro humano que aconteceria com o tipo de análise aqui descrita.

Na figura 51 e 52 são apresentados os contornos de um gerador colocado a **15 mm de distância do referencial global**. A primeira figura não apresenta grandes diferenças ao visto anteriormente. No entanto, existem alguns pontos a salientar. Os contornos de fração mássica de combustível (ver fig. 51 do Apêndice E) apresentam uma maior concentração na parede do terceiro quadrante. Quanto ao TKE (ver fig.52) é difícil diferenciar do anterior. No entanto o valor mais alto é inferior ao obtido anteriormente. Por outro lado, existe uma diferença mais explícita nos gráficos. Enquanto em análises anteriores o gráfico desenhado em Y apresenta "ondas" a figura 53 diminui de forma quase linear com uma acentuação ao afastar-mos cerca de 2.5 mm do centro. Por fim o gráfico representado na figura 54 continua semelhante aos anteriores mas com uma diminuição mais gradual no início.

Na análise preliminar dos resultados da 1<sup>o</sup> fase são dadas por fim as imagens de um gerador colocado a **20 mm do referencial global**. A figura 52 (contornos de fração mássica de combustível) não apresenta diferenças consideráveis para este tipo de análise. No entanto, ao observar os gráficos e os contornos de TKE vemos que esta posição tem maior distinção dos outros três. A figura 56 demonstra valores mais elevados obtidos até agora e mais "espalhados". Anteriormente estes mantinham-se maioritariamente no 4<sup>o</sup> quadrante da figura enquanto nesta última situação já existe no terceiro e quarto quadrante.

#### 4.4.2 Análise preliminar da 2<sup>a</sup> fase

No capítulo anterior foram apresentados os resultados obtidos com um gerador de vórtice na zona inferior da secção central. Analisam-se agora dois geradores nesta segunda fase. Para referência dos tamanhos colocados na parte superior pode-se consultar a tabela 5.

As independências da malha de cada posicionamento encontram-se no Apêndice D como foi descrito anteriormente. As imagens e gráficos referidos estarão presentes no **Apêndice F-Resultados da 2<sup>a</sup> fase**.

Começando a análise com dois geradores colocados a **5 mm de distância do referencial global**, observamos na figura 59 e 60 tem impactos significativos quando comparando com apenas um gerador. A fração de combustível aparenta ser muito mais "espalhada" com apenas a semelhança de uma maior concentração na parte inferior da zona de teste. Por outro lado, os contornos de TKE (fig. 60) mostram igualmente o impacto de um segundo gerador. Enquanto que, com apenas um único gerador era observável uma única área com valores elevados, na figura 60 são claras duas concentrações (a vermelho). Uma dessas áreas está posicionada no 4<sup>o</sup> quadrante à semelhança do obtido nos testes da primeira fase. A segunda área é posicionada no 2<sup>o</sup> quadrante criando uma quasi-simetria na zona de teste.

Por fim os gráficos presentes na fig. 61 e 62 também sofreram alterações consideráveis.

Anteriormente o gráfico desenho em Y apresenta um pico muito elevado perto da parede inferior (-0,005 mm) com tendência para descer a concentração à medida que nos aproximamos do centro e aproximamos da parede superior (0,005 mm). No entanto, agora apesar de existirem picos de combustível em locais semelhantes, após se atingir o centro da zona de teste a concentração mantém-se relativamente constante na aproximação da parede superior.

O gráfico desenhado em Z é mais simples de analisar. Existe um pico elevado de combustível na zona mais central da zona de teste, descendo gradualmente até zero ao chegar às paredes.

Com a colocação dos geradores a **10 mm e distância do referencial**, as alterações são "subtis". Verifica-se na fig. 63 que há um pequeno distanciamento da área de grande concentração de combustível no sentido positivo do eixo Z (4<sup>o</sup> quadrante). De facto, esta

diferença é salientada se observamos o gráfico respetivo (fig. 66), onde de 0,000 mm até 0,003 mm a concentração atinge um "máximo relativo" [8]. No gráfico em Y não existe alterações a apontar. Um estudo mais preciso será posteriormente realizado.

A terceira análise realizada foi de dois geradores colocados a **15 mm do referencial**. Em comparação com os dois testes anteriores existe um impacto maior nos contornos. Se observamos a figura 67 vemos que começa a existir uma tendência do combustível ser "transportado" para cima na área de maior concentração. Existe também vestígios de rotação perto das paredes no 2º e 4º quadrantes. Estas áreas são mais aparentes na figura seguinte (fig. 68) nos contornos de TKE. Graficamente, (fig. 69) obtemos o pico de concentração de combustível mais perto da parede (-0,004 mm) com uma descida gradual até ao lado oposto. No gráfico desenhado em direção a Z (fig. 70) a concentração de combustível mais elevada é entre 0 a -0,002 mm descendo gradualmente à semelhança das análises anteriores.

Finalmente com geradores distanciados **20 mm do referencial** obtemos os gráficos e contornos mais diferenciados. Os contornos de combustível aparentam estar mais espalhados na figura 71 principalmente na mancha que usualmente esta na zona inferior da zona de teste. O TKE apresenta duas manchas igualmente no entanto bastante mais centradas (a vermelho). Na figura 73 existe uma concentração mais elevada em baixo (possivelmente influência da gravidade) no entanto esta é menos intensa que nos casos anteriores. Para finalizar o gráfico da figura 74 demonstra que apesar de existir uma maior concentração no centro, a diminuição começa muito depois quando comparado com casos anteriores.

#### 4.4.3 análise preliminar da 3ª fase

À semelhança do realizado anteriormente, será feita uma análise preliminar no qual será descrito o que é observado nos resultados para depois se proceder a uma análise exata. Todas as imagens referidas nesta análise estarão presentes no **Apêndice G-Resultados da 3ª fase**. Com o primeiro teste, nos contornos de fração de combustível podemos ver uma "simetria" com os resultados de primeira fase. Enquanto na primeira fase existia uma dispersão mais acentuada na esquerda da zona de teste, nesta fase está mais presente na direita (ver fig 75). Os contornos de TKE (fig. 76) também revelam esta "simetria". Os gráficos de pontos do gerador a 5 mm são simétricos em relação ao eixo  $zy$  quando o gerador se situava numa posição inferior. As imagens obtidas têm alterações, no entanto não foi observado nada atípico em comparação com a análise feita na 1ª fase. Pode ser feita, uma análise semelhante no entanto dada a sua redundância procede-se a uma análise mais precisa.

#### 4.4.4 Análise exata da 1ª fase, 2ª fase e 3ª fase

A primeira conclusão que se pode retirar dos contornos puramente é que está a existir uma dispersão mais favorecida no lado "esquerdo" da zona de teste na 1ª fase. Faz sentido então, na segunda fase de testes, os geradores de vórtice superiores estarem direcionados de forma oposta para tentar "compensar".

Por outro lado, na primeira, segunda e terceira fase é preciso tomar a decisão dos gráficos que apresentam melhor dispersão. Num cenário ideal, tanto o gráfico desenhado em Y como em Z apresentavam uma linha horizontal com o valor médio de  $1,34 \times 10^{-6}$ . Isto implica uma concentração de combustível uniforme em todas as direções. Com o valor médio da concentração de combustível apresentado na conduta de controlo.

Desta forma, só é necessário comparar os gráficos obtidos com esta reta ou função. Em teoria, a dispersão estatística indica a dispersão ou o "quão afastados" os valores obtidos se encontram do esperado [79]. Dado que a reta pode ter infinitos pontos e os gráficos de pontos obtidos podem ter mais de 2500 pontos é mais prático criar um algoritmo para realizar os cálculos

O programa criado deve começar por criar uma reta com 100 pontos neste eixos (precisão). Este valor foi obtido por tentativa erro ao usar múltiplas vezes o programa. Para critério de qualidade foi procurado gráficos mais "suaves". É de salientar que quanto maior a precisão mais tempo de computação será necessário. Os gráficos obtidos apresentam valores de -0,005 mm até 0,005. Assim, será este o domínio da reta criada.

De seguida, o programa deve procurar os valores no eixo  $xx$  dos valores dos testes e descobrir em que local da reta se inserem. Ou seja, quais os dois valores mais próximos presentes na reta criada. De seguida calcula a média destes valores. Isto por outras palavras é calcular as variâncias de todos os pontos ao ponto vertical ideal mais próximo. O programa criado e usado será devidamente colocado no **Apêndice H-Programa de análise "exatas"**.

Os valores obtidos pelo Ansys também representam a fração mássica de combustível média ("Area Weighted Average") pelo que temos uma representação estimativa do quão disperso está o combustível. Desta forma, obteremos um gráfico por cada conjuntos de pontos retirado do Ansys.

Dado que em cada fase foram estudados 4 possibilidades cada um com dois conjuntos de pontos, no total serão feitas 24 análises que serão colocadas no **Apêndice I-Gráficos de análise exata da 1ª, 2ª e 3ª fase**.

Para o cálculo da variância e da distância entre pontos são usadas a equação 21 (ver referência [79]) e equação 22 (ver referência [35]) respetivamente.

Os gráficos relativos à análise exata da conduta de controlo serão colocados no **Apêndice J-Análise exata da conduta de controlo**

$$Var(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \text{ onde } \mu \text{ é o valor ideal} \quad (21)$$

$$d_{AB} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (22)$$

Para conseguirmos decidir qual o gráfico com melhor dispersão ou por outras palavras com valores de variância menores podemos calcular o integral do conjuntos de pontos obtido. Para tal foi usado o método dos trapézios entre cada ponto dada pela formula dos trapézios 23 . O erro de truncatura pode ser calculado pela formula 24 tendo um valor de cerca de  $7.8 \times 10^{-8}$  que é igual para todos os dados e incrivelmente baixo. Outra vantagem deste método é a facilidade de ser implementado [33].

$$I = \int_a^b f(x)dx \simeq \frac{b-a}{2} [f(a) + f(b)] \quad (23)$$

$$E_T = -\frac{(b-a)^3}{12} f''(\xi) \text{ onde, } \xi \in [a, b] \quad (24)$$

Dado que, os valores das distâncias são bastante baixos (na casa de ordem de  $10^{-15}$  é criada a fórmula 25 com o intuito de simplificar a análise e compreensão.  $C_\phi$  é o coeficiente de distribuição no qual quanto maior o valor melhor é a distribuição.  $V_p$  é o valor obtido pelo programa.

$$C_\phi = \frac{1}{V_p \times 10^{13}} \quad (25)$$

Posto isto, criou-se as tabelas 6, 7 e 8 que correspondem aos testes da primeira, segunda e terceira fase respetivamente.

Posto isto, concluiu-se que os geradores com melhor probabilidade de apresentar uma melhoria de dispersão no combustível são os dois geradores colocados a 20 mm de distância do

Tabela 6: Coeficientes de distribuição obtidos no testes da primeira fase. O melhor valor obtido é do gerador posicionado a 20 mm do referencial global.

	0.005	0.010	0.015	0.020
$V_{pY}$	4,41296E-15	4,1317E-15	4,4174E-15	4,0194E-15
$V_{pZ}$	4,6311E-15	4,5405E-15	4,6600E-15	4,2473E-15
$V_p$	9,0440E-15	8,6723E-15	9,0749E-15	8,2667E-15
$C_\phi$	11,0570	11,5310	11,0194	12,0967

Tabela 7: Coeficientes de distribuição obtidos na segunda fase. O melhor valor obtido é dos geradores posicionados a 20 mm do referencial global.

	0.005	0.010	0.015	0.020
$V_{pY}$	4,0622E-15	4,2563E-15	4,0368E-15	3,2085E-15
$V_{pZ}$	4,0627E-15	4,1540E-15	4,07550E-15	3,2300E-15
$V_p$	8,1249E-15	8,4104E-15	8,1123E-15	6,4336E-15
$C_\phi$	12,3078	11,8901	12,3269	15,5434

Tabela 8: Coeficientes de distribuição obtidos na terceira fase. O melhor valor obtido é do gerador posicionado a 10 mm do referencial global.

	0.005S(s)	0.010S(s)	0.015(s)	0.020S(s)
$V_{pY}$	4,4700E-15	3,6675E-15	3,9029E-15	4,0859E-15
$V_{pZ}$	4,5172E-15	3,9001E-15	4,0506E-15	4,2200E-15
$V_p$	8,9917E-15	7,5676E-15	7,9534E-15	8,3014E-15
$C_\phi$	11,1212	13,2142	12,5731	12,0460

referencial com um  $C_\phi = 15,54$ . Em segundo lugar, um gerador colocado na zona superior a 10 mm de distância do referencial com um  $C_\phi = 13,21$ . Em terceiro lugar é um gerador colocado a 15 mm de distância na zona superior o qual obteve um valor de 12,57.

Em comparação (e como de esperado) a conduta de controlo obteve um  $C_\phi = 10,12$ .

É de salientar que após aplicar a formula empírica criada para este estudo específico os valores melhores são aqueles com números mais altos.

Finalmente, e de notar que não é possível saber o "quão melhores" estes valores são. Não existe termos de comparação suficientes.

#### 4.4.5 Sub-fase

Como foi explicado anteriormente deve ser criada uma sub-fase com 4 geradores ao invés de dois. Fisicamente poderiam ser realizados 4 testes. Dado que no sub-capítulo anterior o melhor conjunto apresentado (segunda fase) foi distanciados de 20 mm será este método testado. Para o dimensionamento deste simplesmente é necessário realizar um processo semelhante ao já realizado para a primeira e segunda fase. Deste modo, os geradores posicionados a 20 mm teriam uma altura de **1,60 mm** com um comprimento duas vezes este valor. O ângulo de ataque igualmente a 40 graus.

Todos os dados do teste com 20 mm de distância foram colocados no **Apêndice L-Subfase**.

Isto é, a independência de malha, gráficos e contornos.

Ao realizar o teste pode ver-se pelas figuras 117, 118 do Apêndice L que a dispersão é a pior já apresentada. Esta má dispersão não é tão visível no gráfico da figura 120 no entanto, no gráfico

anterior (fig. 119) é bastante clara.

De facto o valor obtido para o **coeficiente de distribuição é de 5,74**. Em comparação na conduta de controlo foi obtido quase duas vezes mais. A razão disto é pelo estrangulamento da conduta. Ao colocarmos um maior número de geradores, diminuimos inevitavelmente a área de secção transversal. Consequentemente isto aumenta a velocidade do escoamento transportando o combustível todo rapidamente não deixando este dispersar-se.

Obtendo estes resultados **não foram realizados mais testes** nesta Subfase.

Pode-se concluir que colocar múltiplos geradores podem ter um efeito adverso no pretendido piorando então a dispersão. Assim, será limitado o número máximo de geradores por dois. Por outro lado, isto simplifica a criação das peças.

## 4.5 Resultados da 4ª fase

### 4.5.1 Objetivos

No estudo dos ângulos de ataque, se assumirmos um valor de  $90^\circ$  o valor máximo, existe um número infinito de diferentes ângulos possíveis (entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ). Dado que existe poucos estudos no escopo do estudo desta dissertação, teremos de retirar decisões em estudos semelhantes. O ângulo de ataque será alterado em incrementos de 15 graus à semelhança do estudo realizado num tubo circular por *Y. Xu et all* [18]. Deste modo, serão realizados os seguintes testes:

- 0,020, Duplo, Secção central,  $25^\circ$
- 0,020, Duplo, Secção central,  $10^\circ$
- 0,020, Duplo, Secção central,  $55^\circ$  (Erro de BLEND)

### 4.5.2 Resultados

Se procedermos no mesmo formato podemos ver que as alterações nos contornos são subtis e pouco diferenciáveis. Desta forma é necessário proceder a um estudo mais exato usando o programa. A tabela seguinte (9) demonstra os resultados obtidos.

Tabela 9: Tabela de valores de coeficiente de distribuição das alterações dos ângulos de ataque

	$10^\circ$	$25^\circ$	$55^\circ$ "Modificado"
Y	4,3746E-15	4,4841E-15	4,3029E-15
Z	4,4209E-15	4,3861E-15	4,3634E-15
Total	8,7956E-15	8,8702E-15	8,6663E-15
1/total* $10^{-13}$	11,3693	11,2736	11,5389

Podemos ver que para números de Reynolds baixos um ângulo de ataque de 40 graus obtém os melhores valores de distribuição de combustível. O estudo com 55 graus está denominado de "Modificado" pois na realização deste foram obtidos inúmeros problemas na construção da geometria. Ao iniciar esta dissertação foi selecionado um método de construção que se manteve igual a todos os estudos. Ao ser usado para uma ângulo de ataque de 55 graus ou mais este método criou erros de construção (inerentes ao programa *SpaceClaim* para tal teve de ser alterado o método. No entanto, apesar de ter sido analisado a melhor geometria mantém-se a mesma.

## 4.6 Conclusões da análise CFD

Após as análises anteriores, verifica-se claramente que a melhor geometria é a colocada a 20 mm de distância do referencial adotado (isto é quase na saída da secção de menor área transversal) com um ângulo de ataque de 40 graus e com dois geradores.

Não foi analisado nesta dissertação a queda de pressão do sistema.

Finalmente, para uma análise laboratorial serão modelados e posteriormente criados dois coletores. O coletor de controlo e um coletor com dois geradores de vórtices distanciados 20 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus.

## 5 Validação de resultados

### 5.1 Preparação

#### 5.1.1 Criação dos coletores

Os coletores foram modelados em *SolidWorks*. E foi subdividida em três partes, **União, Conduta e Offset**. As três partes podem ser observadas (nas três vistas ortogonais) nas imagens 121,123 e 124 presentes no **Apêndice L-Peças imprimidas em 3D** respetivamente. As imagens foram retiradas no programa integrado do *SolidWorks*.

A união tal como o nome indica serviu para unir tudo. Isto é, ser aparafusada ao motor para posteriormente unir o Offset e a conduta. O Offset foi a união entre a peça anteriormente mencionada e a conduta. Como não existiam medidas oficiais estas tiveram que ser obtidas através de um paquímetro. Isto levava a bastantes erros humanos pelo que apenas foi necessário fazer pequenas alterações no offset para que tudo se unisse.

Por fim, a última peça (conduta) também teria a funcionalidade de se unir ao carburador e restantes peças com dois parafusos. Um parafuso de 5,3 mm diâmetro foi colocado no Offset e a conduta.

É de salientar que bastantes medidas faltam nas vistas apresentadas. Estas medidas não eram necessárias a construção e podem ser alteradas consoante a qualidade da impressora e de acordo com o discernimento do leitor.

#### 5.1.2 Mesa de testes

A mesa de testes foi adaptada à estrutura do motor. Foi necessário criar novos suportes e adaptá-los ao motor em questão.

Na figura 27 é possível observar todos os elementos desta estrutura. é de salientar que a estrutura de madeira envolvente não pertence à banca de testes no entanto estava presente para segurança. Por fim, também foi adicionada uma rede metálica durante os testes que não está presente na figura 27.

O motor estava preso a um eixo (lado direito na figura) e apoiado à célula de carga. Com a rotação da hélice era então possível obter o binário criado, multiplicando pela aceleração gravítica e a distância ao centro geométrico da hélice. Por outro lado, perdas mecânicas também ajudam a explicar a diferença entre os resultados obtidos e os valores presentes no Apêndice A. É de salientar que a construção da mesa teve bastante apoio do Engenheiro João Antunes e na afinação/preparação do motor para serem realizados os testes.

#### 5.1.3 Sensores

Foram colocados três sensores inicialmente. Um caudalímetro com o objetivo de medir o caudal de combustível no motor. Um sensor de Hall com o objetivo de ler a passagem de um íman podendo calcular-se a velocidade do motor. Por fim, uma célula de carga foi colocada a 35 mm de distância do centro geométrico da hélice o que nos forneceria o binário. Pode ser visto, na figura 27 circundado a vermelho a posição do sensor de Hall e a verde a posição da célula de carga. O caudalímetro teve de ser retirado. Este constrangia demasiado o fluxo de combustível impedindo o motor de ultrapassar as 5500 RPM. Dado que, os testes teriam de ser feito a 6000 RPM e 7000 RPM (pontos de maior potência e maior binário).

Na célula de carga foram apenas retirados dados com duas casas decimais. Pois foi feito um teste sem qualquer peso na célula e apenas se mantinha estável até à segunda casa decimal. Na terceira já existia demasiada instabilidade. Foi usado um fator de calibração de 230.

Multiplicando os valores da célula por  $0,001 \times 0,035 \times 9,81 \times (-1)$  onde 9,81 é a aceleração



Figura 27: Banca de testes criada para o Motor Honda Gx25

gravítica, 0,035 o braço e 0,001 a constante para alterar as unidades. Por fim, o valor -1 é necessário para obter resultados positivos.

Obtemos os resultados em Nm.

A leitura dos sensores foi realizada por um microprocessador (Arduino), e os dados guardados usando o *Datastreamer* ferramenta de Microsoft Excel. Cortesia da Universidade da Beira Interior O código do arduino será devidamente anexado com as referências e explicações necessárias no **Apêndice M-Programação Arduino**

Foi observado que com o motor no seu regime mais baixo, o binário residual é suficiente para que os valores de binário sejam negativos por cerca de 0.03. Assim, foi somado a todos os valores 0.04 (fator de calibração) levando o ralenti a ter valores de binário positivos.

#### 5.1.4 Método de teste

Os motores de pistão produzem bastante vibração no seu funcionamento, pelo que os testes foram realizados com cerca de 1 minuto, com 5 minutos de intervalo entre eles. Isto permitia dar tempo para apertar elementos que se tivessem desapertado durante o teste e de garantir que tudo se mantinha de forma correta. Por outro lado, a pausa de 1 minutos permitia que o aquecimento das peças imprimidas (em PCBLEND) não fosse demasiado elevado dado terem uma temperatura máxima acima de 100 Cº [76].

Por outro lado, entre peças foi dado um intervalo de 30 minutos. Isto garantia tempo para

permitir o arrefecimento. Os testes foram realizados com a borboleta completamente aberta, a partir do ralenti. A primeira peça a ser testada foi a original, em seguida o coletor de controlo e por fim o coletor com os geradores de vórtice.

## 5.2 Resultados

### 5.2.1 Binário

As curvas de desempenho do motor com os diferentes coletores em todos os regimes pode ser visto na figura 28 onde são apresentadas as linhas de tendência do conjunto de dados obtidos. De realçar que estes testes foram feitos com a borboleta completamente aberta, com o objetivo de verificar qual o coletor com mais binário (o que tem mais binário apresenta a curva mais vertical)

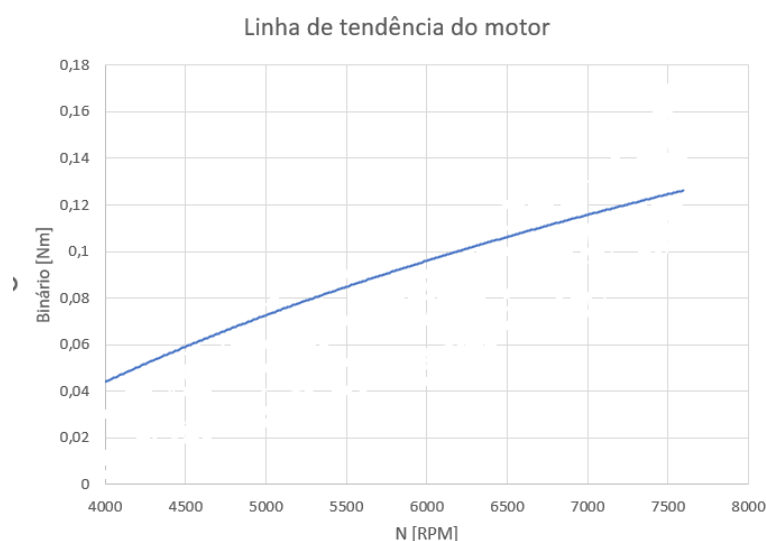


Figura 28: Curvas de desempenho obtidas em testes práticos da peça original do motor Honda GX25

Nota: A potência pode ser obtido usando a seguinte expressão [34]:

$$P_{Kw} = \frac{2\pi \times T_{Nm} \times N_{RPM}}{1000 \times 60}$$

Se compararmos então os valores médios de binário obtidos nas duas peças criadas, graficamente fica (fig.29):

Na figura29 a linha azul apresenta as curvas de binário calculado a partir da força medida na célula de carga. O coletor de controlo (laranja) foi o que apresentou melhores resultados. A rugosidade da peça impressa em relação ao coletor original permite explicar a melhoria. Por outro lado, o coletor com vórtices, apesar de ser melhor que o original tem um binário inferior ao do coletor de controlo, possivelmente por os geradores de vórtices serem muito grandes.

### 5.2.2 Consumo

Como foi explicado anteriormente, foi inicialmente colocado um caudalímetro que não tinha precisão suficiente para medir os caudais, pelo que teve de ser retirado do sistema. Optou-se então por medir o tempo de operação do motor em regime estacionário e o peso do combustível

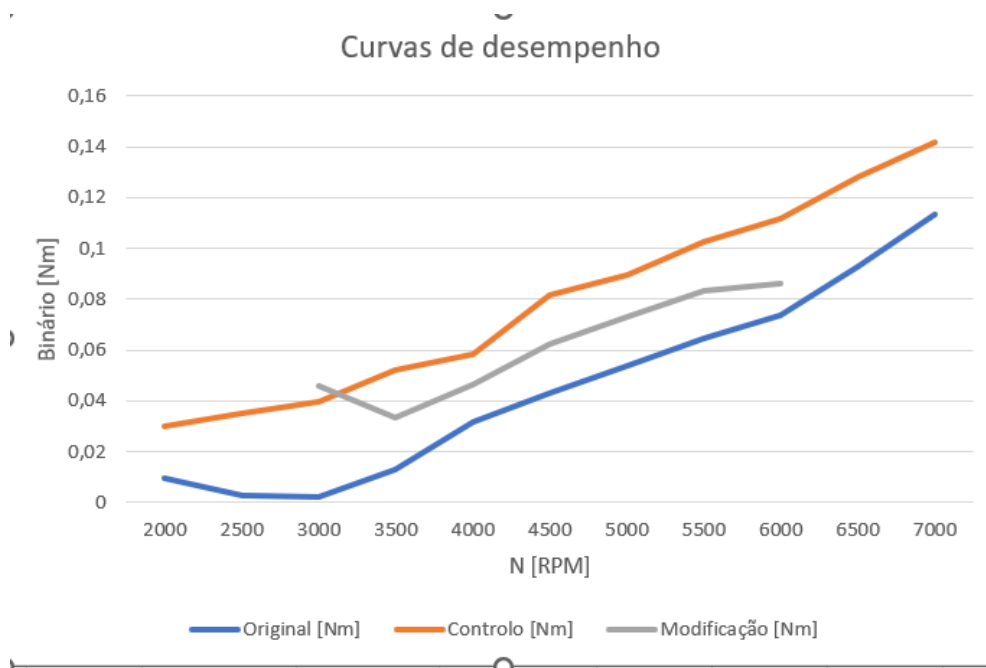


Figura 29: Curvas de desempenho obtidas em testes práticos dos três coletores ensaiados

antes e após o teste. Desta forma, pode ser calculado o valor do consumo específico do combustível. Este método não é o mais exato mas dá uma indicação dos valores consumidos. Por outro lado, não foi possível manter as rotações do motor constantes tendo um erro de mais ou menos 200 rpm, o que introduz outro erro

Assim a tabela 10 representa o consumo e o consumo específico dos vários coletores a cerca de 6000 RPM

Tabela 10: Tabela do consumo específico do motor às 6000 RPM

Coletor	Caudal (g/s)	Potência (kw)	SFC (g/kw.h)
Controlo	0,0719	0,1021,	2535.2
Modificado	0,0710	0,1020	2503.4
Original	0,0833	0,1021	3217.6

Novamente existe uma melhoria significativa com os coletores novos. No entanto, os valores são aproximados, dado todos os erros inerentes. Pode concluir-se que o coletor desenhado teoricamente é de facto melhor que o original.

## 6 Considerações finais

### 6.1 Problemas inerentes à dissertação

#### 6.1.1 Parte teórica

Ao longo deste trabalho de engenharia diversos problemas surgiram o que dificultou o processo de realização e gerou erro nas conclusões finais. O presente capítulo tem como objetivo introduzir as dificuldades reconhecidas pelo autor e resumi-las.

O primeiro fator que limitou o estudo foi a licença Ansys. Esta foi fornecida pela Universidade da Beira Interior. A licença obtida, foi a de estudante, limitando o número de elementos em cálculo (Máx. 512 000). Por outro lado, o número máximo de processadores permitidos foram de 4 o que diminuía consideravelmente a velocidade de cálculo. Isto obrigou a manter o número de elementos baixo e a aliviar a dificuldade de cálculo (simplificando as variáveis de estudo).

Outro fator de bastante importância foi a baixa existência de artigos científicos no uso de GV's para a mistura de dois fluidos. Existe diversos estudos de geradores de vórtice para influenciar camadas limites em perfis alares ou a melhorar a transferência de calor entre superfícies. No entanto, poucos estudos foram encontrados onde geradores de vórtice eram usados para melhorar a eficiência de mistura entre dois fluidos.

O capítulo 2.5 revela múltiplas suposições. Tirar medidas exatas das peças de estudo foi deveras complicado com as ferramentas disponíveis. Para se analisar num formato CFD também teve de se assumir todos os parâmetros inerentes ao uso da equação de Bernoulli entre outras. Os ângulos do bocal e do difusor da zona de teste também foram assumidos. Apesar de múltiplas fontes revelarem os mesmo valores não deixam de ser completas incógnitas os valores reais.

Nos valores de velocidade de escoamento foram sempre assumidos escoamentos invíscidos e paredes sem atrito. Dado que o objetivo da análise CFD era tentar encontrar os geradores que apresentavam melhor mistura/distribuição e não aproximar os resultados aos valores reais.

As tabelas de altura dos geradores de vórtice são retiradas do estudo CFD. Dado que os valores introduzidos foram obtidos através de um número elevado de suposições, estas alturas também não são iguais aos valores reais.

Finalmente, a competição entre os vários estudos realizados foi através de um programa baseado na variância do ideal. Outro método poderá facilmente fornecer resultados diferentes e talvez mais precisos do cenário real.

#### 6.1.2 Parte prática

Mais uma vez a falta de medidas reais dificultou a acoplação das peças ao motor. Estas foram tirados com um paquímetro e aperfeiçoadas usando tentativa e erro.

O uso de impressão 3D também se reflete nos dados. As imperfeições e rugosidade inerentes a esta. A imprecisão e oscilação dos sensores também dificulta a obtenção de dados precisos.

Outro ponto importante seria o uso do Arduino para a leitura dos sensores. Dado que, este componente só é capaz de leituras em serie e não em paralelo existe sempre um espaçamento de 0,15 microsegundos entre leituras. Este espaçamento foi desprezado mas existe. O uso de dois arduinos criava outro número de problemas nomeadamente na sincronização.

A banca de testes criada não era a mais adequada e as vibrações constantes obrigavam à paragem dos testes para verificações de segurança. De facto, dada a natureza do teste existe sempre um binário residual que permanece, alterando a viabilidade dos resultados. Este facto foi corroborado pelo Doutorando Pedro Oliveira.

Finalmente, os valores do consumo são bastante imprecisos pelo que podem ser desprezados até.

## 6.2 Estudos futuros

Foi visto de forma prática que a peça criada apresentou resultados melhores que o atualmente usado nos motores Honda GX25. Posto isto, aumentar a área de secção transversal da peça com geradores de vórtice para um tamanho no qual a queda de pressão seja eliminada. Por outro lado, diminuir os geradores de vórtices também se poderia vir a provar interessante. Outro estudo interessante seria na análise CFD. Existem infinitas possibilidades no posicionamento dos geradores, no tamanho e ângulos de ataque. A colocação dos geradores no difusor ou no bocal também é possível. Por outro lado, existe inúmeros tipos de geradores que podem ser testados. Um estudo semelhante mas para outro motor (e consequentemente outro carburador) pode revelar resultados interessantes. Finalmente, observar o impacto da colocação de GV's numa turbina a gás (em diversos locais) seria outro estudo incrivelmente informativo.

## References

- [1] Fluid Mechanics 101. [CFD] *Residuals in CFD (Part 1) - Understanding Residuals*. 2021. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=v90nNeYH40k&t=1s&ab\\_channel=FluidMechanics101](https://www.youtube.com/watch?v=v90nNeYH40k&t=1s&ab_channel=FluidMechanics101) (visited on 04/24/2022).
- [2] Fluid Mechanics 101. [CFD] *The Courant (CFL) Number*. 2020. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=WBWY46ynRk0&ab\\_channel=FluidMechanics101](https://www.youtube.com/watch?v=WBWY46ynRk0&ab_channel=FluidMechanics101) (visited on 04/24/2022).
- [3] Fluid Mechanics 101. [CFD] *The Energy Equation for Solids and Fluids in CFD*. 2018. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=z8dZHze\\_EPo&t=2s&ab\\_channel=FluidMechanics101](https://www.youtube.com/watch?v=z8dZHze_EPo&t=2s&ab_channel=FluidMechanics101) (visited on 04/24/2022).
- [4] Fluid Mechanics 101. [CFD] *The Finite Volume Method in CFD*. 2019. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=E9\\_kyXjtRHc&t=338s&ab\\_channel=FluidMechanics101](https://www.youtube.com/watch?v=E9_kyXjtRHc&t=338s&ab_channel=FluidMechanics101) (visited on 04/25/2022).
- [5] Fluid Mechanics 101. [CFD] *The k - omega SST Turbulence Model*. 2019. URL: <https://youtu.be/myv-ityFnS4?t=443> (visited on 04/30/2022).
- [6] Fluid Mechanics 101. [CFD] *The k - omega SST Turbulence Model*. 2019. URL: <https://youtu.be/myv-ityFnS4?t=805> (visited on 04/30/2022).
- [7] Fluid Mechanics 101. [CFD] *The SIMPLE Algorithm (to solve incompressible Navier-Stokes)*. 2018. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=00ILoJ1zuiw&ab\\_channel=FluidMechanics101](https://www.youtube.com/watch?v=00ILoJ1zuiw&ab_channel=FluidMechanics101) (visited on 04/25/2022).
- [8] Khan academy. *Revisão de mínimos e máximos relativos*. 2022. URL: <https://pt.khanacademy.org/math/ap-calculus-ab/ab-diff-analytical-applications-new/ab-5-4/a/relative-minima-and-maxima-review> (visited on 05/07/2022).
- [9] Amnart Boonloi et al. "Flow topology, heat transfer characteristic and thermal performance in a circular tube heat exchanger inserted with punched delta winglet vortex generators". In: *Springer* (2009).
- [10] G. Liang et. all. "Numerical study of heat transfer and flow behavior in a circular tube fitted with varying arrays of winglet vortex generators". In: *Elsevier* ().
- [11] G. Liang et. all. "Numerical study of heat transfer and flow behaviour in a circular tube fitted with varying arrays of winglet vortex generators". In: *Elsevier* (2018).
- [12] John C. Lin et al. "Review of research on low-profile vortexgenerators to control boundary-layer separation". In: *NASA Langley Research Center* (2002).
- [13] M.Heinloo et all. "Computer based comparison anaysis of single and double-connecting-rod slider-crank linkages". In: *ResearchGate* (2012).
- [14] P. Martinez-Filgueira et all. "Parametric study of low-profile vortex generators". In: *Elsevier* (2017).
- [15] Ruili Zeng et all. "Fault detection in an engine by fusing information from multivibration sensors". In: *ResearchGate* (2017).
- [16] Volker Hessel et all. "Micromixers-a review on passive and active mixing principles". In: *Elsevier* (2005).

- [17] Xiangyu Luo et al. “Mixing performance analysis of the novel passive micromixer designed by applying fuzzy grey relational analysis”. In: *Elsevier* (2021).
- [18] Y. Xu et al. “Numerical study of winglets vortex generator effects on thermal performance in a circular pipe”. In: *Elsevier* (2016).
- [19] Y. Xu et al. “Numerical study of winglets vortex generator effects on thermal performance in a circular pipe”. In: *Elsevier* (2016).
- [20] Yong-Gang Lei et al. “Hydrodynamics and heat transfer characteristics of a novel heat exchanger with delta-winglet vortex generators”. In: *Elsevier* (2009).
- [21] ANSYS. *10.7.1 Choosing the Relative or Absolute Velocity Formulation*. 2022. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node376.htm> (visited on 07/19/2022).
- [22] ANSYS. *4.5.2 Shear-Stress Transport (SST)  $k-\omega$  Model*. 2009. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm> (visited on 04/30/2022).
- [23] ANSYS. *5.2.1 Heat Transfer Theory*. 2009. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node107.htm> (visited on 04/24/2022).
- [24] ANSYS. *7. Species Transport and Finite-Rate Chemistry*. 2022. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node126.htm> (visited on 07/19/2022).
- [25] Ansys. *26.13.1 Monitoring Residuals*. 2009. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node812.htm> (visited on 04/24/2022).
- [26] Ansys. *Ansys Fluent Fluid Simulation Software*. 2022. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (visited on 07/19/2022).
- [27] Vasco de Brederode. *Aerodimanica Incompressivel Fundamentos*. Tecnico Lisboa, 2019, pp. 26–28. ISBN: 978-9898481-32-0.
- [28] Mark J. Carletti. “Parametric Study of jet Mixing Enhancement by vortex generators, tabs, and deflector plates”. In: *Tufts University* (1999).
- [29] CarUP. *História dos motores de combustão interna*. 2017. URL: <https://autocarup.com.br/historia-motor-a-combustao/> (visited on 04/23/2022).
- [30] CMS. *HONDA GX25/SEGT/14Z0H0E4 CARBURETOR*. 2022. URL: [https://www.cmsnl.com/honda-gx25segt14z0h0e4\\_model128382/partslis/E-14.html#.Ytb07HbMJPY](https://www.cmsnl.com/honda-gx25segt14z0h0e4_model128382/partslis/E-14.html#.Ytb07HbMJPY) (visited on 07/19/2022).
- [31] Paula Cordeiro. “Apostila de-motores-a-combustão-interna”. In: *Slide Share* (2022).
- [32] Driver61. *Group B: When Rallying Got TOO FAST*. 2021. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=pPk90JZqWM8&t=513s&ab\\_channel=Driver61](https://www.youtube.com/watch?v=pPk90JZqWM8&t=513s&ab_channel=Driver61) (visited on 04/29/2022).
- [33] José Carlos Matos Duque. *Sebenta de Matemática Computacional*. Universidade da Beira Interior, 2019, pp. 105–106.
- [34] E4U. *Torque (Nm) to kW (kilowatt) Conversion Calculator*. 2022. URL: <https://www.electrical4u.net/calculator/torque-nm-to-kw-kilowatt-conversion-calculator/> (visited on 07/14/2022).

- [35] Mundo educação. *Distância entre dois pontos*. 2022. URL: <https://mundoeducacao.uol.com.br/matematica/distancia-entre-dois-pontos.htm> (visited on 05/09/2022).
- [36] AMWELL enterprises. *A Brief History of CFD*. 2008. URL: <http://www.amwel.com/history.html> (visited on 04/24/2022).
- [37] Blog ESSs. *FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL: O QUE É?* 2022. URL: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/> (visited on 03/23/2022).
- [38] Martin Fiebig. “Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement”. In: *Butterworth Heinnemann* (1995).
- [39] Formlabs. *Minimum Wall Thickness for 3D Printing*. 2022. URL: <https://formlabs.com/blog/minimum-wall-thickness-3d-printing/> (visited on 04/13/2022).
- [40] André Fusco. *Eficiência Energética - Eficiência do Motor de Combustão Interna*. 2021. URL: [hhttps://pt.linkedin.com/pulse/efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica-do-motor-de-combust%C3%A3o-interna-andr%C3%A9-fusco?trk=read\\_related\\_article-card\\_title](https://pt.linkedin.com/pulse/efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica-do-motor-de-combust%C3%A3o-interna-andr%C3%A9-fusco?trk=read_related_article-card_title) (visited on 06/22/2022).
- [41] N.E.Connor G.G. Nasr. *Natural Gas Engineering and Safety Challenges*. Springer, 2014, 5.3 Gas flow measurement. ISBN: 978-3-319-08947-8.
- [42] Unai Fernández Gámiz. “Fluid Dynamic Characterization of Vortex Generators and Two-Dimensional Turbulent Wakes”. In: *School of Industrial Engineering of Barcelona* (2013).
- [43] Research Gate. *Initialization in Fluent? Hybrid initialization or Standard initialization ?* 2022. URL: [https://www.researchgate.net/post/Initialization\\_in\\_Fluent\\_Hybrid\\_initialization\\_or\\_Standard\\_initialization](https://www.researchgate.net/post/Initialization_in_Fluent_Hybrid_initialization_or_Standard_initialization) (visited on 07/19/2022).
- [44] Research Gate. *Should I use Pressure Based Solver or a Density-Based Solver?* 2022. URL: [https://www.researchgate.net/post/Should\\_I\\_use\\_Pressure\\_Based\\_Solver\\_or\\_a\\_Density-Based\\_Solver](https://www.researchgate.net/post/Should_I_use_Pressure_Based_Solver_or_a_Density-Based_Solver) (visited on 07/19/2022).
- [45] Charbel Habchi. “Turbulent mixing and residence time distribution in novel multifunctional heat exchangers-reactors”. In: *Elsevier* (2010).
- [46] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988. ISBN: 0-07-028637-X.
- [47] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988, pp. 17–19. ISBN: 0-07-028637-X.
- [48] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988, pp. 42–43. ISBN: 0-07-028637-X.
- [49] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988, pp. 43–46. ISBN: 0-07-028637-X.
- [50] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988, pp. 50–51. ISBN: 0-07-028637-X.
- [51] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988, pp. 51–53. ISBN: 0-07-028637-X.
- [52] J. P. Holman. *Heat transfer*. McGraw-Hill, 1997.

- [53] Honda. *Honda Engines*. 2022. URL: <https://engines.honda.com/models/model-detail/mini-4#PT0> (visited on 03/19/2022).
- [54] T. Van Hoof. “A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations”. In: *Elsevier* (2011).
- [55] Ebrahim Hosseini. “CFD analysis of the aerodynamic characteristics of biconvex airfoil at compressible and high Mach numbers flow”. In: *Springer* (2019).
- [56] Calculadora de juros impostos. *2 formas para se calcular a variação percentual entre dois valores!* 2022. URL: <https://calculadorajuroscompostos.com.br/como-calcular-a-variacao-percentual-entre-dois-valores/> (visited on 04/19/2022).
- [57] F. B. Incropera and D. P. Dewitt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley and Sons, 1996.
- [58] Essam E. Khalil. “CFD History and Applications”. In: *CFD letters* (2020).
- [59] Bo. Li. “Vortex generator design and application on the flow control of top-mounted subsonic intake at high angle of attack”. In: *JVE journals* (2014).
- [60] M.C.Gentry. “Heat Transfer Enhancement by Delta-Wing Vortex Generators on a Flat Plate: Vortex Interactions with the Boundary Layer”. In: *Elsevier* (2009).
- [61] Frank M.White. *Fluid Mechanics*. Mcgraw-Hill, 2009, pp. 3–17. ISBN: 978-0-07-352934-9.
- [62] Frank M.White. *Fluid Mechanics*. Mcgraw-Hill, 2009, pp. 404–408. ISBN: 978-0-07-352934-9.
- [63] Frank M.White. *Fluid Mechanics*. Mcgraw-Hill, 2009, pp. 824–828. ISBN: 978-0-07-352934-9.
- [64] Frank M.White. *Fluid Mechanics*. Mcgraw-Hill, 2009. ISBN: 978-0-07-352934-9.
- [65] Frank M.White. *Fluid Mechanics*. Mcgraw-Hill, 2009, pp. 457–459. ISBN: 978-0-07-352934-9.
- [66] Frank M.White. *Fluid Mechanics*. Mcgraw-Hill, 2009, pp. 457–458. ISBN: 978-0-07-352934-9.
- [67] Nuno M. C. Martins. “VELOCITY-DISTRIBUTION IN PRESSURIZED PIPE FLOW USING CFD: MESH INDEPENDENCE ANALYSIS”. In: *Instituto Superior Técnico* (2009).
- [68] Arafat A. Bhuiyan Muhammad Awais. “Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities”. In: *Elsevier* (2018).
- [69] Press Office. *Record breaking temperatures for the UK*. 2022. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/press-office/news/weather-and-climate/2022/red-extreme-heat-warning-ud> (visited on 07/19/2022).
- [70] CFD Online. *Single v.s. double precision*. 2022. URL: <https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/20286-single-v-s-double-precision.html> (visited on 03/23/2022).
- [71] CFD Online. *Single v.s. double precision*. 2022. URL: <https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/20286-single-v-s-double-precision.html> (visited on 07/19/2022).

- [72] Manual da química. *Densidade de uma solução*. 2022. URL: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/densidade-uma-solucao.htm> (visited on 04/05/2022).
- [73] SicNoticias. *Gasóleo atinge valor recorde, gasolina sobe mais do que o previsto*. 2022. URL: <https://sicnoticias.pt/economia/gasoleo-atinge-valor-recorde-gasolina-sobe-mais-do-que-o-previsto/> (visited on 05/09/2022).
- [74] Simscale. *How To Keep the Courant Number Below 1?* 2020. URL: <https://www.simscale.com/knowledge-base/what-is-a-courant-number/> (visited on 04/24/2022).
- [75] Somatemática. *Plano cartesiano*. 2022. URL: <https://www.somatematica.com.br/emedio/retas/retas1.php> (visited on 05/06/2022).
- [76] Prusa Polymers Team. *Case Study: Functional mechanical components printed from Prusament PC Blend*. 2022. URL: <https://prusament.com/case-study-functional-mechanical-component-printed-from-prusament-pc-blend/> (visited on 07/13/2022).
- [77] ANSYS CFD tutorials and courses. *Solution methods and controls in Ansys Fluent*. 2022. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=gfdWFuzI-Ys&ab\\_channel=ANSYSCFDtutorialsandcourses](https://www.youtube.com/watch?v=gfdWFuzI-Ys&ab_channel=ANSYSCFDtutorialsandcourses) (visited on 07/19/2022).
- [78] Jennifer Vinodhini. “Numerical Analysis of Drag Reduction Method Using Vortex Generator on Symmetric Aerofoil”. In: *Research Gate* (2016).
- [79] Larry Wasserman. *All of Statistics: a concise course in statistical inference*. Springer texts in statistics. Springer Texts, 2009, pp. 50–52. ISBN: 9781441923226.
- [80] WIKIPEDIA. *SIMPLE algorithm*. 2022. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/SIMPLE\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_algorithm) (visited on 04/25/2022).
- [81] Wikipedia. *Generatore di vortici*. 2022. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Generatore\\_di\\_vortici](https://it.wikipedia.org/wiki/Generatore_di_vortici) (visited on 08/01/2022).

## A Vistas ortogonais da conduta de controlo

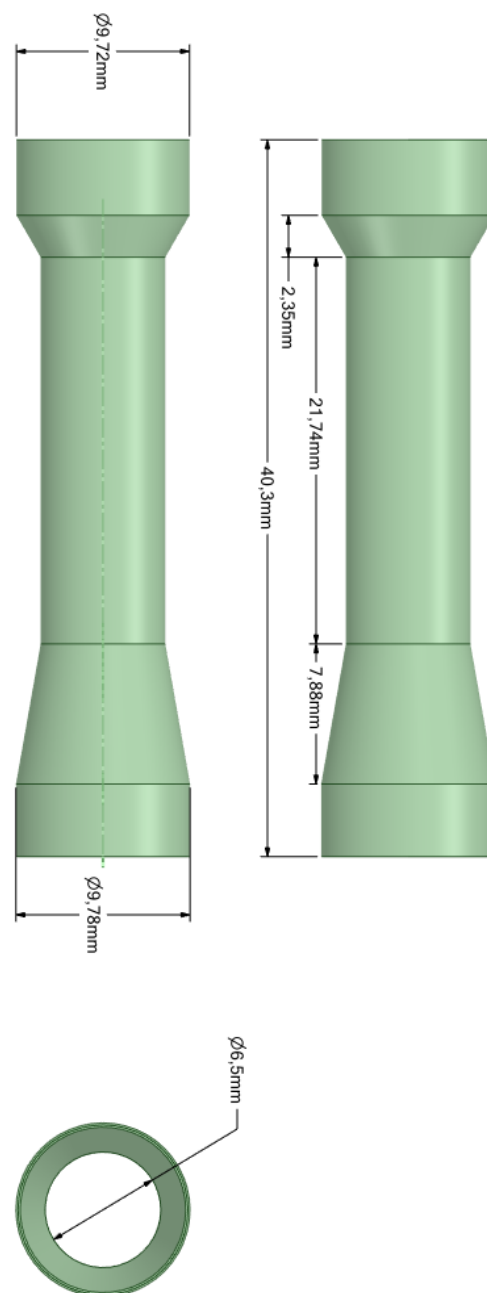


Figura 30: Vistas ortogonais da conduta de controlo (exterior)

## B Motor Honda GX25

Tabela 11: Dados gerais do motor Honda GX25

Engine Type	Air-cooled 4 stroke OHC
Bore x Stroke	35 mm x 26 mm
Displacement	25 cm <sup>3</sup>
Net Power Output	0.72 Kw @ 7000 RPM
Net Torque	1.0 Nm @5000 RPM
PTO Shaft Rotation	Counterclockwise
Compression Ratio	8.0:1
Carburetor	Diaphragm-type (overflow return)
Ignition System	Transistorized magneto
Starting System	Recoil
Lubrication System	Crankcase pressure-driven
Governor System	NA
Air cleaner	Semi-dry
Oil capacity	80cc
Fuel	Unleaded 86 octane or higher
Fuel tank capacity	0.58 liter
Dry Weight	2.7Kg

Tabela 12: Dimensões do motor Honda GX25

Length	192 mm
Width	221 mm
Height	230 mm

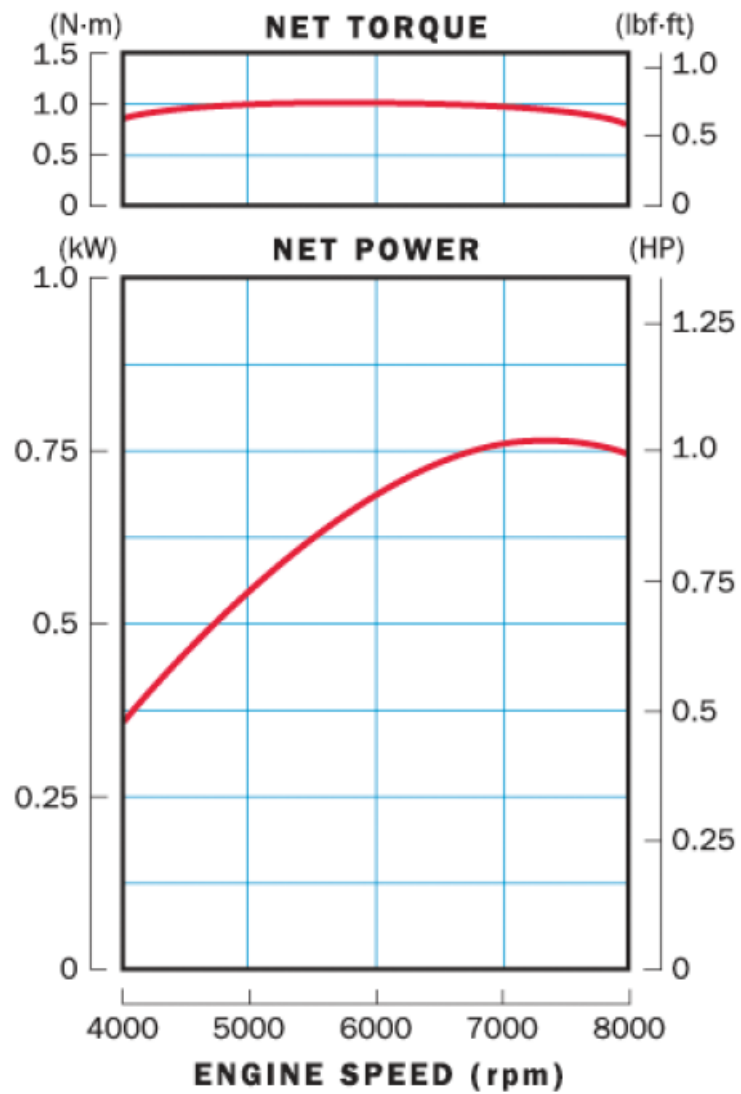


Figura 31: Curvas de desempenho cortesia de [53]

## C Setup Ansys Controlo

- Primeira Janela
  - Double Precision
  - Solver Processes: 4

Ao aumentar o numero de processadores em paralelo a velocidade aumenta substancialmente. Dado que, o ansys usado tem uma licença de estudante apenas podem ser usados 4 processadores. Double Precision é selecionado pois normalmente obtém-se melhores resultados [71].

- General:
  - Type:Pressure-based
  - Velocity formulation: Absolute
  - Time:Transient
  - Gravity:Y=-9.81

Será usado o tipo:Pressure-based dado que este foi desenvolvido para baixas velocidades [44].A formulação de velocidade será absoluta visto que é expectante que grande parte do escoamento não tenha vórtices [21].

- Models:
  - Energy:On
  - Viscous:
    - \* Model-K-omega
    - \* K-omega Model SST
  - Species
    - \* Species Transport.
    - \* Difusion Energy Source.
  - Discrete Phase:On
    - \* Interaction with continuos phase.
    - \* Update DPM sources Every Flow Iteration (DPM iteration interval:25).
    - \* Contour Plots for DPM variables:Mean values.
    - \* Unsteady Particle Tracking
    - \* Track with Fluid Flow Time Step
    - \* Create Injections \*\*

É necessário ativar a equação de energia logo de início. Para o modelo de turbulência foi escolhido o k-ómega SST pois este é o melhor encontrado (com duas equações) que permite calcular escoamento turbulento de forma mais precisa com um custo computacional razoável [10]. Ativação do modelo de espécies permite ao Ansys transformar o combustível líquido injetado em combustível em vapor. Assim é possível modelar a mistura e transporte de espécies químicas [24]. Ao criarmos a fase discreta, o combustível é injetado durante um tempo preciso para simular a abertura da admissão do motor.

\*\* A criação da injeção é explicada no final do setup dada a sua extensividade.

- Materials:
  - Fluid
    - \* Air
    - \* N-octane-Vapor
  - Solid
    - \* Aluminion
  - Mixture
    - \* Mixture-template
      - Air
      - N-octane-vapor
  - Droplet Particle
    - \* N-Octane-Liquid

Todos os materiais aqui declarados estão presentes na base de dados do próprio Fluent. É necessário salientar que foi alterada o valor da densidade de “N-octane-liquid” para 680 em todas as parcelas e que em “N-octane-Vapor” o calor específico foi alterado para constante com o intuito de facilitar convergência.

- Boundary Conditions
  - Inlet
    - \* AirInlet
      - Velocity Specification Method:Magnitude Normal to Boundary
      - Reference frame:Absolute
      - Velocity Magnitude [m/s]:1.63
      - Initial Gauge Pressure [Pa]:0
      - Temperature [K]:293
      - Species C8H18:0
      - Discrete phase BC type:Escape
    - \* Outlet
      - Temperature [K]=293

A velocidade foi obtida através das tabelas. Como o motor trabalha otimizado a 7000 RPM o estudo foi realizado nestas velocidades.A temperatura deve ser 20 C<sup>o</sup> visto que, os valores de densidade retirados são para esta temperatura.

- Methods
  - Scheme:Simple
  - Gradient: Least Squares Cell Based
  - Pressure: Second order
  - All other parameters: Second Order Upwind

Formato de cálculo. Não influencia nos resultados, porém deve ser alterado para se obter maior convergência. Foi escolhido o algoritmo “SIMPLE” pois calcula as equações em par. Isto usa mais CPU do computador, no entanto, obtém convergência mais rápido. Os outros parâmetros são colocados em segunda ordem pois obtém resultados mais precisos [77].

- Initialization
  - Hybrid Initialization

Inicialização Híbrida deve ser usada pois acelera a computação usualmente [43]. Nota: É preciso abrir a janela de “Species” e remover a espécie de N-octane-vapor para limitar apenas ar a existir dentro da conduta no início.

- Calculation
  - Number of time steps:1800
  - Time step size:5e-5
  - Max iterations/Time Step:50

Desta forma obtemos um tempo total de escoamento de 0.09 s. Isto é o tempo que o ar leva a circular pelo menos duas vezes a conduta como num ciclo inteiro do motor e analisando o escoamento imediatamente antes da admissão ”fechar”. Como o número máximo de iterações é 50 podemos sempre verificar sempre se os residuais convergiram pelos gráficos de iterações.

- **\*\*Injection Setup**
  - Injection Type:Surface
    - \* Selecionar superfície da injeção de combustível
  - Particle Type:Droplet
    - \* Material:N-octane-Vapor
    - \* Evaporating Species C8H18
  - Scale flow Rate By face Area
  - Inject Using Face Normal Direction
    - \* Diameter:0.0019
    - \* Temperature:293
    - \* Start Time:0.0012
    - \* Stop Time: 0.047
    - \* Velocity Magnitude:0.0039
    - \* Total Flow Rate:3.5808e-7

Para o diâmetro de injeção é necessário ser menor que o diâmetro total do local de injeção. Isto permite que não haja erros de computação nomeadamente nas fronteiras. O tempo de início é o tempo que o ar desde o centro da injeção até ao túnel de venturi ( 0.0012s). O tempo final é o tempo necessário até ao fim da conduta. Isto simula o efeito visto num carburador.

## Independência da Malha

Para se obter a independência de mesh é necessário torná-la alterável. Para tal foram colocadas divisórias em 6 pontos como indica a figura seguinte:

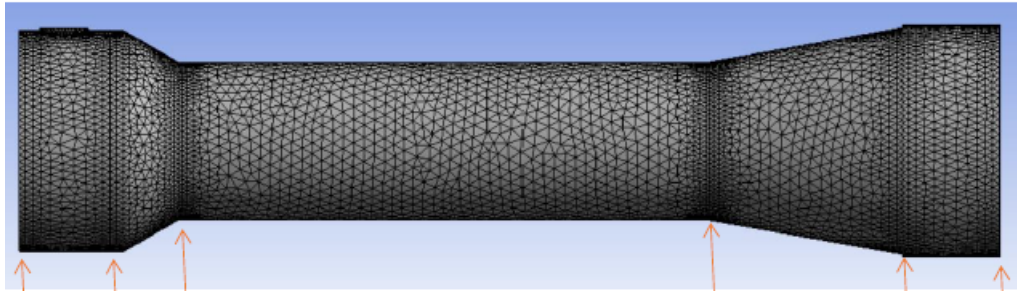


Figura 32: Posições das 6 divisórias na conduta.

Foi colocado também, um número de divisórias fixo a 40 no local de injeção. Por fim, para finalizar, em casos onde existe um ou mais geradores de vórtices é também colocada uma esfera de influência no centro destes com 4 mm de raio. A regra para alterar os parâmetros é que o elementos da esfera tem de ser menores que os elementos da conduta restante. A figura 3 representa em mais detalhe a esfera de influência num caso onde os geradores de vórtices estão posicionados a 20 mm do referencial. Deste modo, existe três elementos alteráveis na malha. O número de divisórias nos 6 elementos da figura 1. O tamanho máximo dos elementos em toda a conduta e o tamanho máximo dos elementos de dentro da esfera.

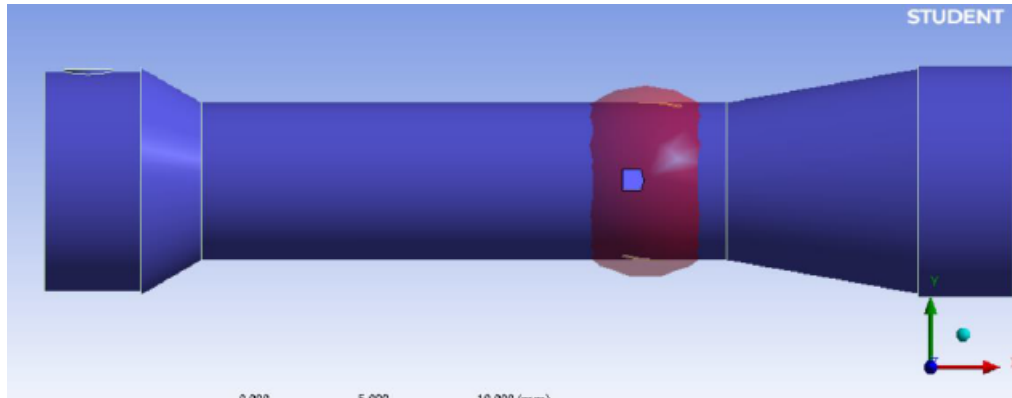


Figura 33: Esfera de influencia de alteração dos tamanhos dos elementos da malha na conduta.

## Notas finais

Para o desenho dos contornos será usado o mapa de cores denominado de “Brg-modern”. Isto porque o mapa de cores default não tem grande precisão. Na figura seguinte podemos observar claramente a diferença entre os dois. Enquanto no primeira esquema de cores a dispersão parece estar concentrada no meio, ao mudarmos para outro esquema de cores vemos que existe uma boa dispersão. Assim, para evitar sermos induzido em erro, será sempre usado o esquema de cores da direita. É de salientar que a figura 4 foi obtida na análise da zona de teste com dois geradores de vórtice colocados a 20 mm do referencial.

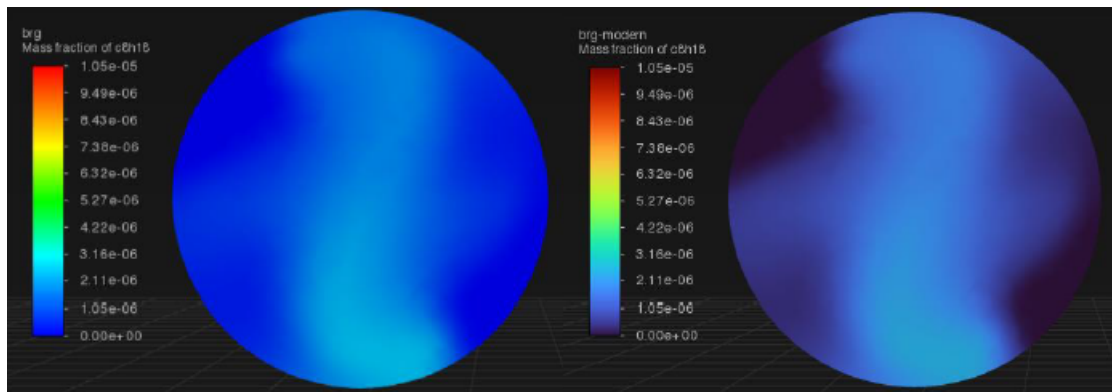


Figura 34: Comparação entre dois mapas de cores presentes no Ansys Fluent. À esquerda o mapa definido como “Brg”. À direita o mapa definido como “Brg-modern”

## D Independências de Malha

1ª fase 0.005

Tabela 13: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 5 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 206690 elementos

Design Point	Nº de elementos	tke	Var%	Massfuelfrac	Var%
1	90318	0,0493		1,01E-06	
2	109877	0,0510	3,2425	9,9927E-07	0,6057
3	137986	0,0367	27,9271	9,5644E-07	4,2857
4	170153	0,0452	18,6830	9,7020E-07	1,4177
5	206690	0,0439	2,7603	9,5844E-07	1,2116

Podemos ver que o balanço de massa é essencialmente zero em todo o escoamento excetuando no bocal (ver fig.35). No entanto, vemos também que nessa zona está na ordem dos  $10^{-10}$  que é essencialmente zero. Logo os valores são aceitáveis e podemos proceder ao tratamento de dados. Por fim na figura 36, vemos que as iterações todas se mantiveram sempre abaixo de 50. Logo todos os residuais convergiram.

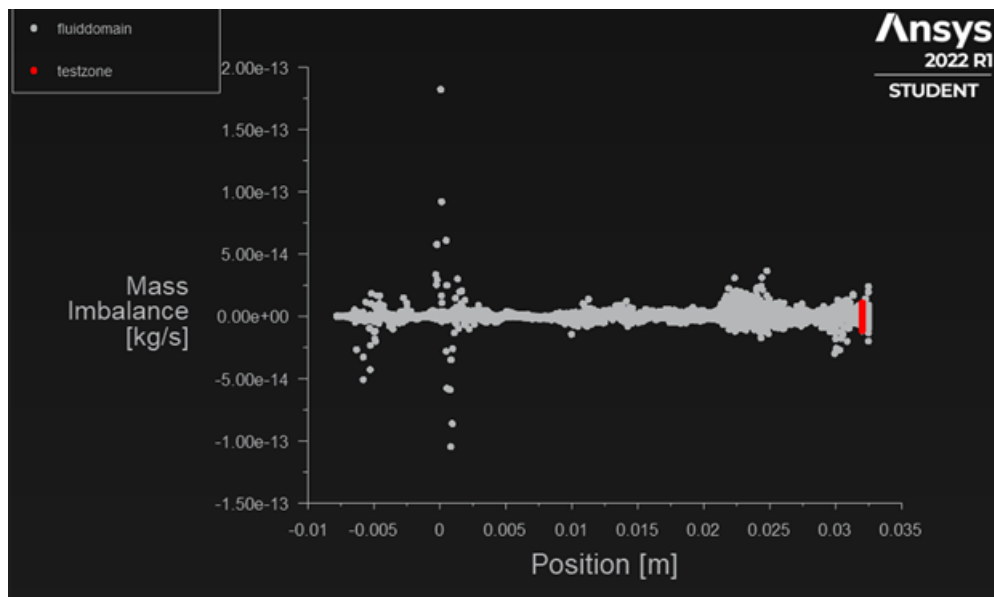


Figura 35: Balanço de massa de um gerador de vórtice colocado a 5 mm de distância do referencial global.

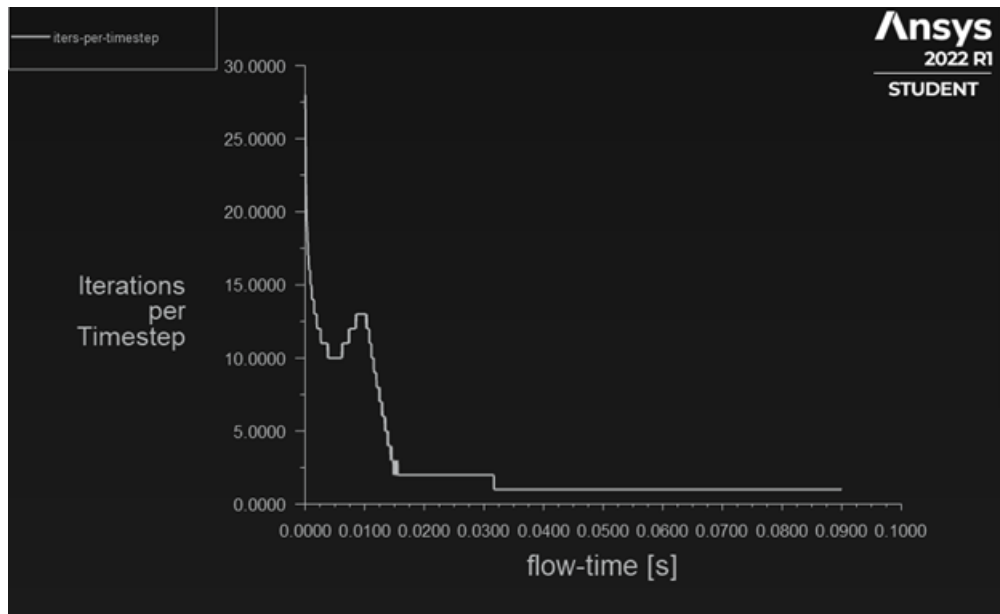


Figura 36: Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 5 mm de distância do referencial global.

### 1ª fase 0.010

Tabela 14: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 10 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 313129 elementos

Design Point	Nº elements	TKE	Var%	Massfuelfrac	Var%
1	169558	0,0500		9,9100E-07	
2	207954	0,0377	24,5792	2,8100E-06	64,7086
3	254253	0,0604	37,6021	9,7300E-07	65,3535
4	313129	0,0588	2,6843	9,6800E-07	0,4744

Podemos observar que o balanço de massa é maioritariamente zero na figura 37. Existe uma grande variação na zona final. No entanto, o máximo valor obtido é na ordem dos  $10^{-10}$  que é essencialmente zero. Por fim o gráfico das iterações está sempre abaixo de 50 pelo que todas as soluções convergiram (ver fig. 38)

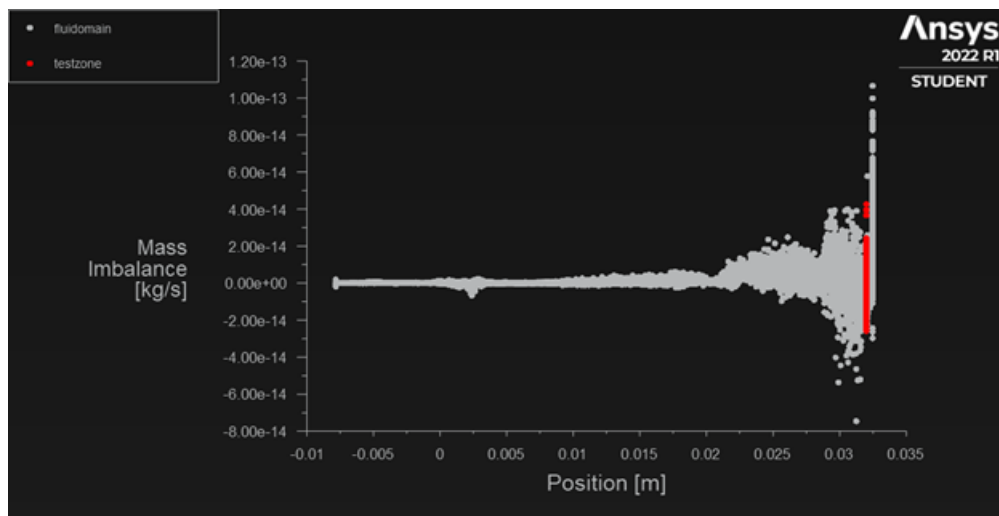


Figura 37: Balanço de massa de um gerador de vórtice colocado a 10 mm de distância do referencial global.

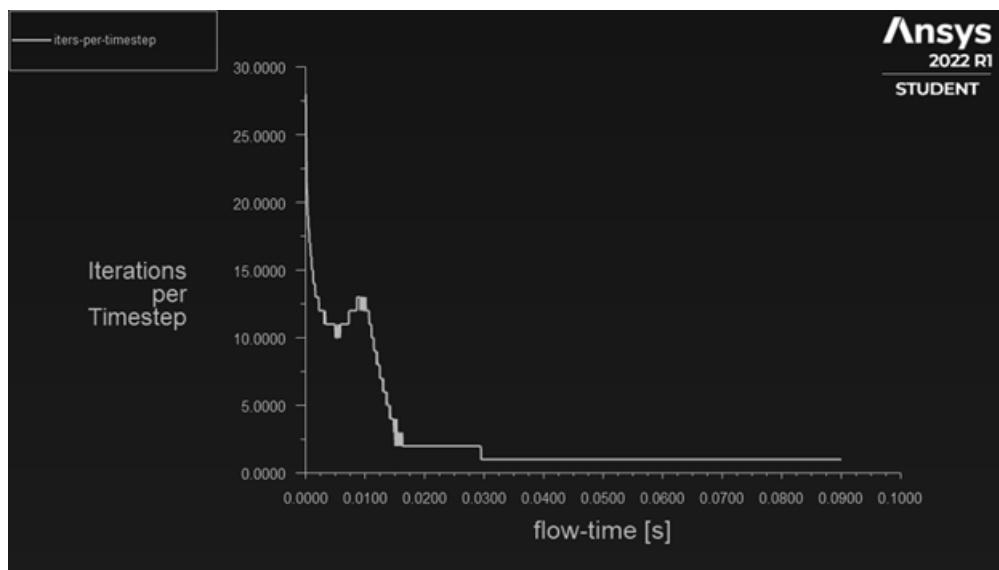


Figura 38: Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 10 mm de distância do referencial global.

## 1ª fase 0.015

Tabela 15: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 15 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 294048 elementos

Design Point	Nº elementos	TKE	Var%	Massfrac	Var%
1	92532	0,0818		2,23E-06	
2	125649	0,0839	2,5268	7,12E-05	96,8738
3	163851	0,0780	7,0005	0,0003	72,7141
4	198374	0,0665	14,8399	4,4800E-06	98,2850
5	240936	0,0751	11,5524	0,0004	98,8872
6	294048	0,0742	1,2758	0,0004	1,2291

No seguimento das duas provas de independência anteriores as figuras de balanço de massa e convergência de residuais estão presentes na figura 39 e 40 respetivamente. O mesmo pensamento se realiza.

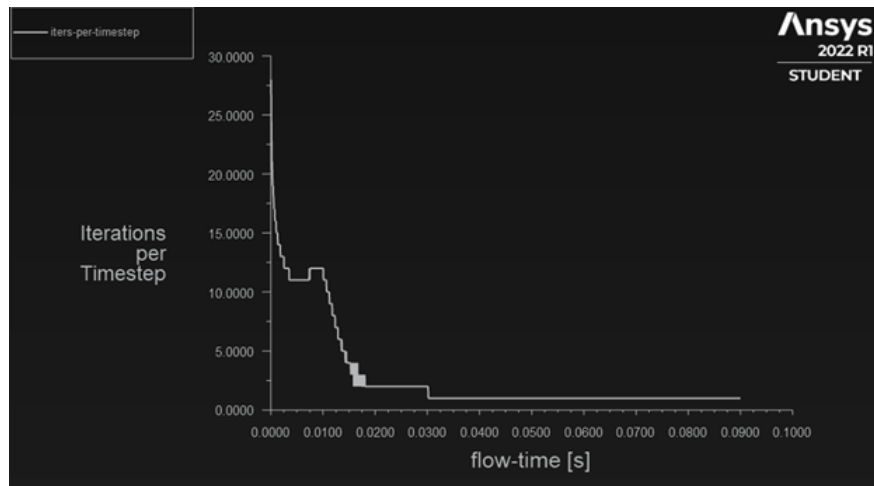


Figura 39: Balanço de massa de um gerador de vórtice colocado a 15 mm de distância do referencial global.

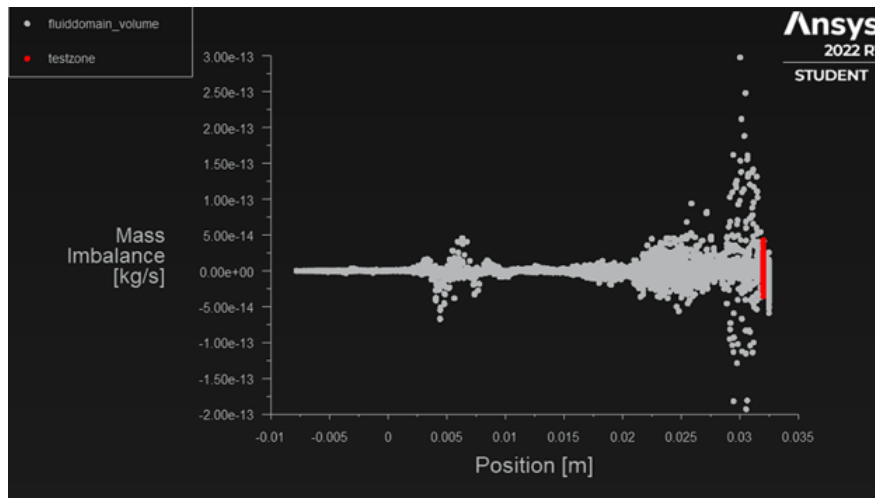


Figura 40: Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 15 mm de distância do referencial global.

1ª fase 0.020

Tabela 16: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona superior da conduta a 20 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 347840 elementos

Design Point	TKE	Var%	Massfuelfrac	Var%
69789	0,1173		1,018E-06	
85080	0,1149	2,0651	1,0078E-06	0,9982
102569	0,0751	34,5947	1,0116E-06	0,3722
129063	0,0997	24,6253	1,0300E-06	2,0717
156366	0,1208	17,4621	1,0600E-06	2,2384
190024	0,1157	4,2369	1,0300E-06	2,3454
235599	0,0882	23,7789	9,8700E-07	4,3338
347840	0,0866	1,7298	9,9400E-07	0,7079

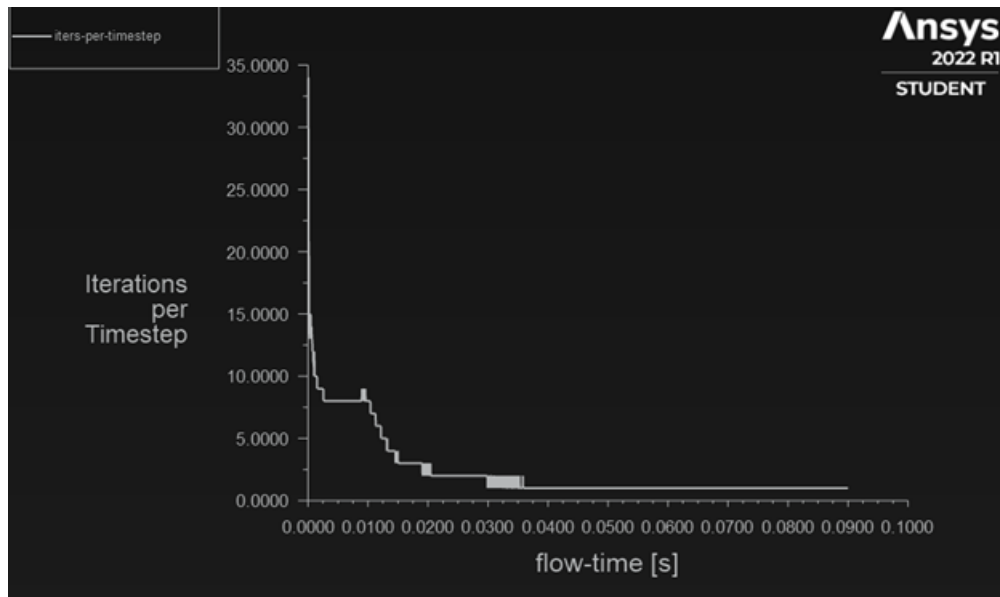


Figura 41: Balanço de massa de um gerador de vórtice colocado a 20 mm de distância do referencial global.

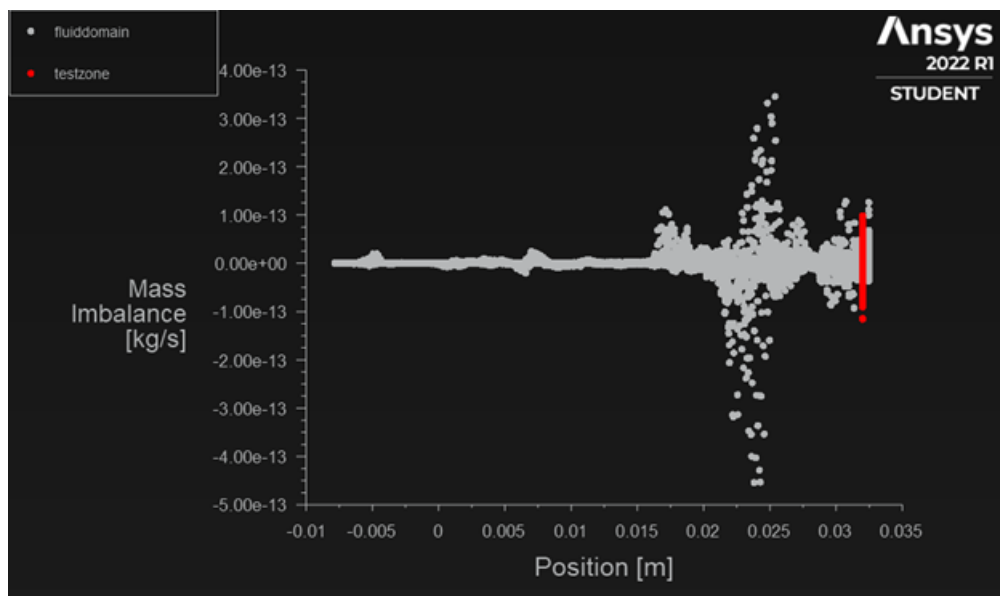


Figura 42: Prova de convergência dos residuais de um gerador de vórtice colocado a 20 mm de distância do referencial global.

## 2ª fase

Tabela 17: Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 5 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 131793 elementos

Nº elementos	tke	Var%	fuel	Var%
87151	0,0619		1,0300E-06	
108855	0,0622	0,4916	1,0200E-06	1,2925
131793	0,0630	1,3453	1,0500E-06	2,7504

Tabela 18: Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 10 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 118672 elementos

Nº elementos	tke	Var%	fuel	Var%
79168	0,0676		9,9900E-07	
98394	0,0716	5,5294	1,0100E-06	1,0998
118672	0,0745	3,9370	9,8600E-07	2,3150

Tabela 19: Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 15 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 228996 elementos

Nº elementos	tke	Var%	fuel	Var%
79018	0,1079		1,0200E-06	
98742	0,1199	10,0325	1,0300E-06	0,0596
120145	0,0981	18,1464	9,9500E-07	2,9882
146495	0,1031	4,8345	1,0000E-06	0,8531
180853	0,1127	8,5205	1,0200E-06	1,7575
228996	0,1093	3,0358	1,0100E-06	0,9308

Tabela 20: Independência da malha de dois geradores de vórtice colocado na zona superior e inferior da conduta a 20 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 106200 elementos

Design Point	TKE	Var%	fuel	Var%
69797	0,096929205		1,10E-06	
85183	0,13986937	30,7001919	1,10E-06	0,159973227
106200	0,14393833	2,826877316	1,12E-06	1,52E+00

## 3ª fase

Tabela 21: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 5 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 156960 elementos

Nºelementos	tke	Var%	fuel	Var%
70113	0,0675		1,0200E-06	
85820	0,0706	4,4920	1,01E00-06	0,5146
104630	0,0388	45,0216	9,5600E-07	5,4323
128946	0,0366	5,5856	9,5500E-07	0,0809
156960	0,0373	1,7420	9,5400E-07	0,0986

Tabela 22: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 10 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 125777 elementos

Nºelementos	tke	Var%	fuel	Var%
92508	0,0544		9,4600E-07	
125777	0,0539	0,9843	9,5400E-07	0,7759

Tabela 23: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 15 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 375692 elementos

Nºelementos	tke	Var%	fuel	Var%
84160	0,0861		9,60E-07	
101134	0,0798	7,3311	9,4800E-07	1,2837
135375	0,0731	8,3481	9,3900E-07	0,9835
164321	0,0659	9,9060	9,3500E-07	0,3883
200865	0,0783	15,7899	9,3900E-07	0,3844
243305	0,0706	9,7950	9,1800E-07	2,1781
301706	0,0749	5,7152	9,1800E-07	0,0650
375692	0,0724	3,2819	9,1600E-07	0,1249

Tabela 24: Independência da malha de um gerador de vórtice colocado na zona inferior da conduta a 20 mm de distância do referencial global. Foi obtida com 265383 elementos

Nºelementos	tke	Var%	fuel	Var%
85007	0,1249		1,0100E-06	
106405	0,1253	0,3316	1,00526E-06	0,0129
136903	0,0858	31,4665	9,62542E-07	4,249
174235	0,0993	13,5659	9,79E-07	1,6743
213211	0,0851	14,2933	9,37E-07	4,2953
265383	0,0884	3,7097	9,39E-07	0,2665

## Notas finais:

Como foi nas imagens presentes neste apêndice, a prova de convergência dos residuais e o balanço de massa não acrescentam conhecimento a este trabalho. Por outro lado, as imagens são incrivelmente semelhantes tornando-as redundantes. Desta forma não serão colocadas na 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> fase. No entanto, as tabelas de convergência serão devidamente colocadas.

## E Resultados 1ªfase

5 mm

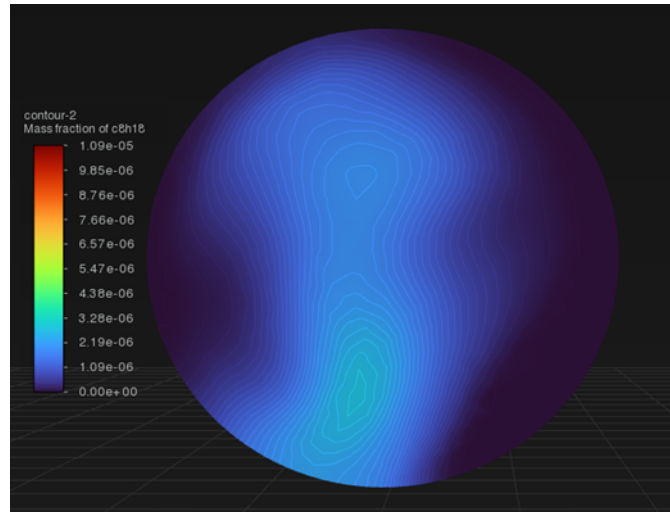


Figura 43: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global.

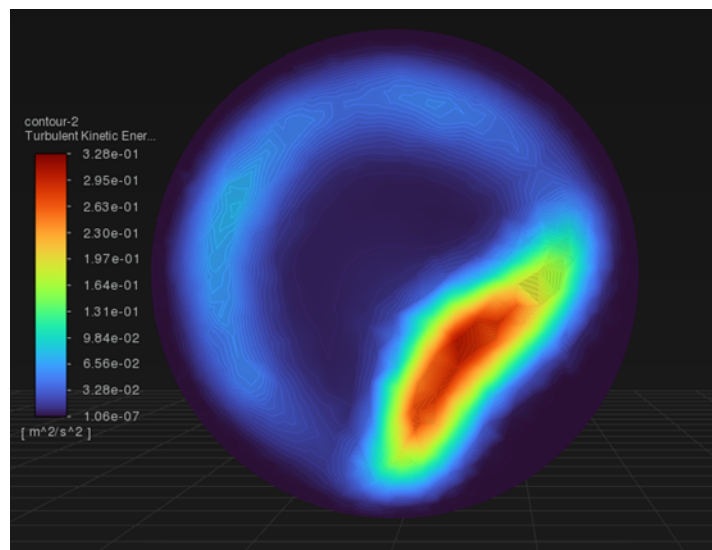


Figura 44: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global.

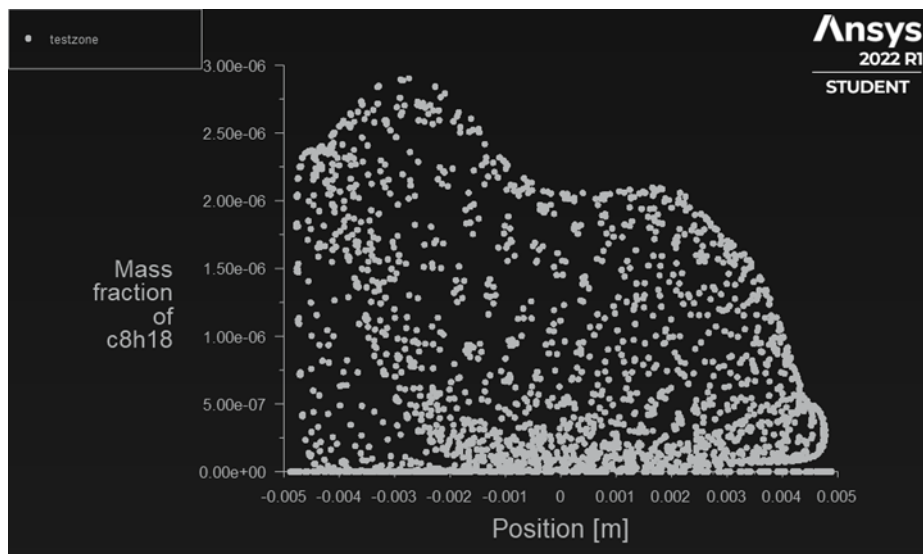


Figura 45: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global.

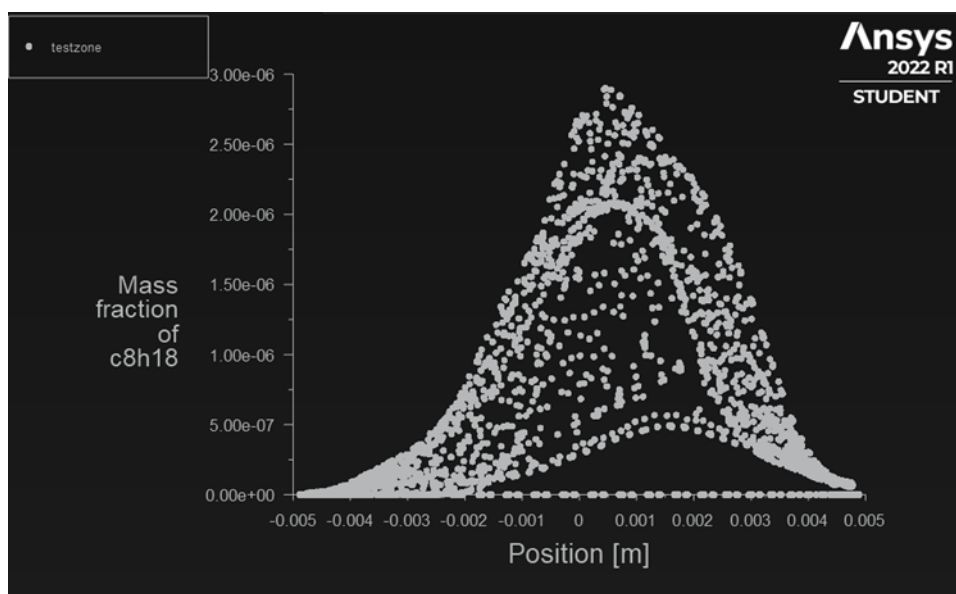


Figura 46: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global.

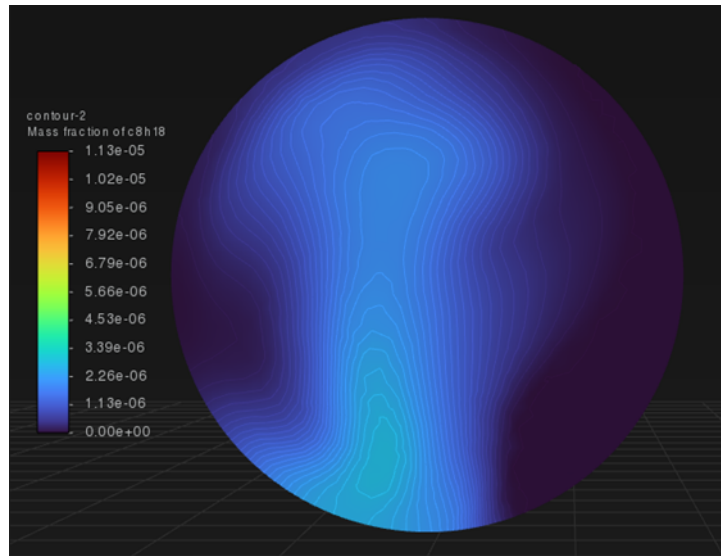


Figura 47: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global.

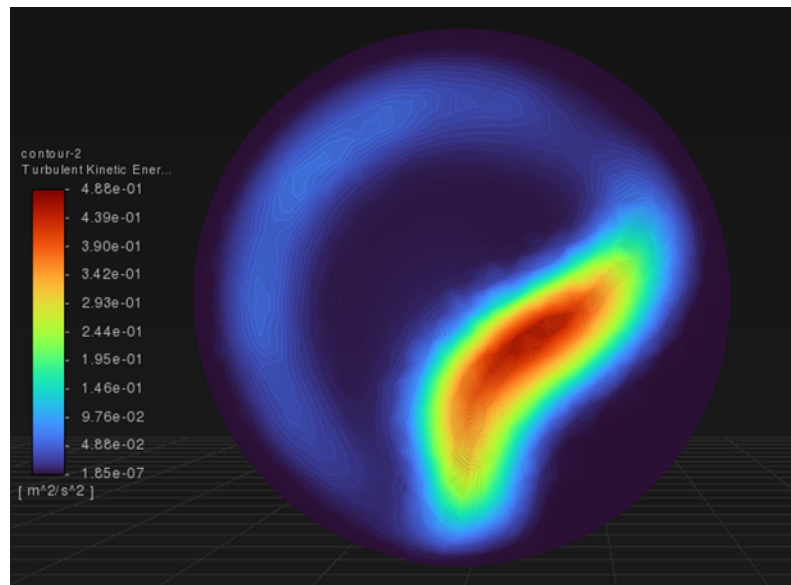


Figura 48: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global.

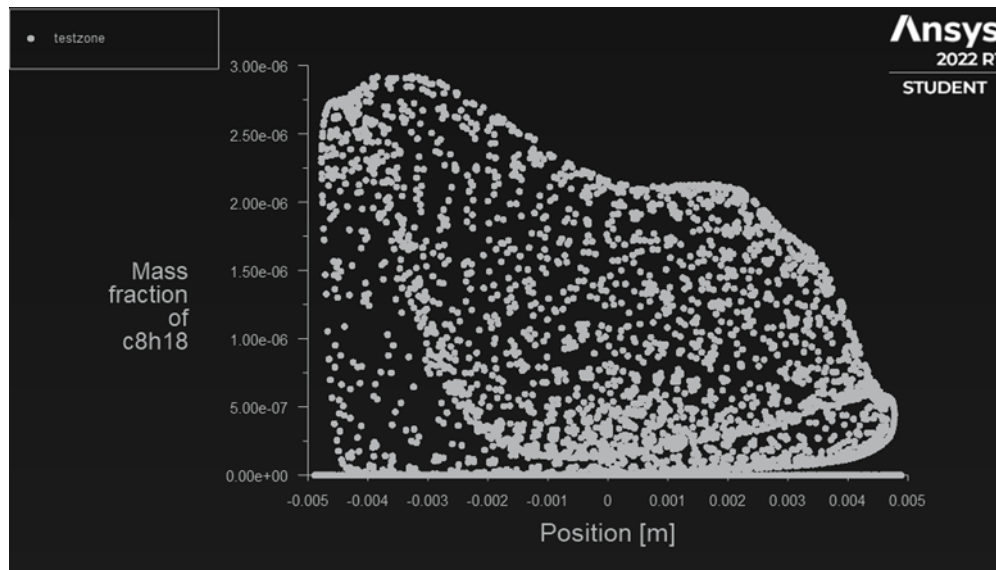


Figura 49: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global.

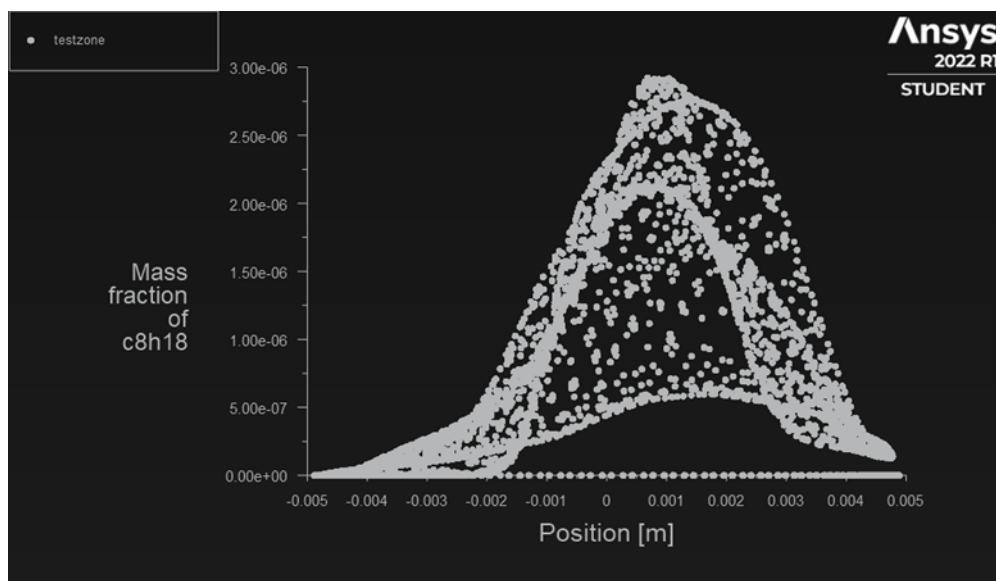


Figura 50: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global.

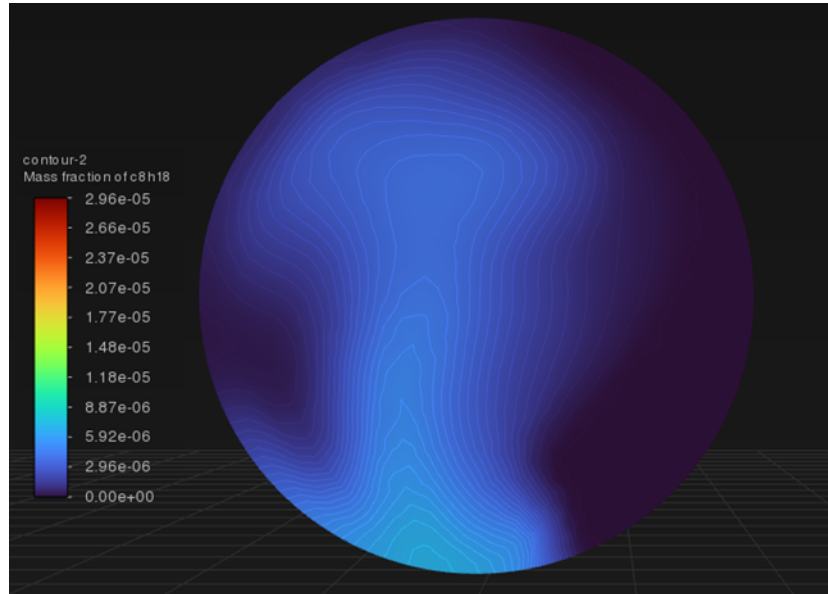


Figura 51: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global.

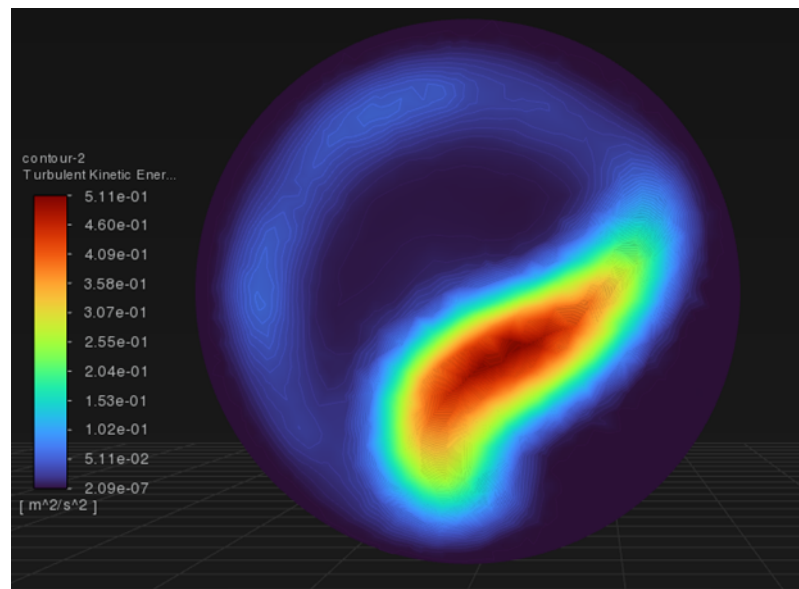


Figura 52: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global.

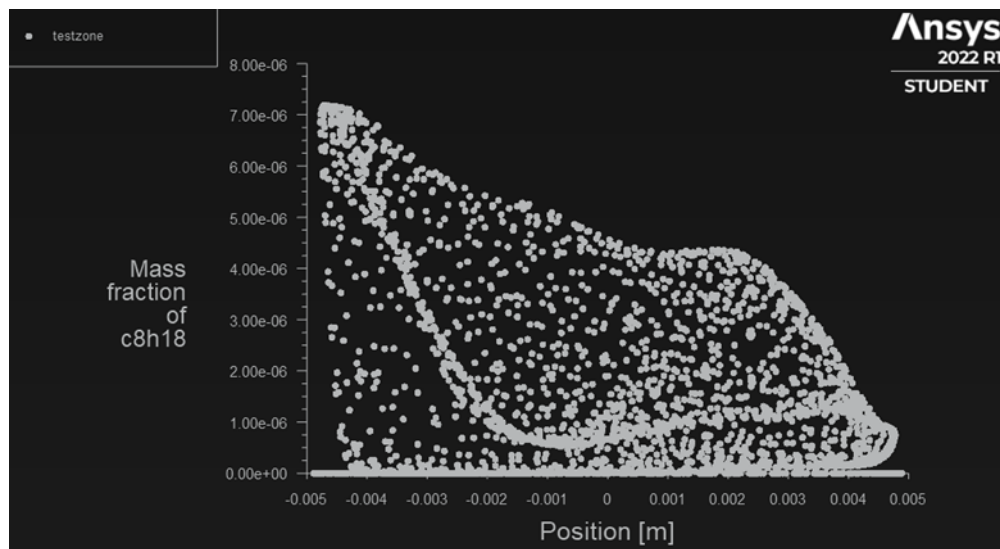


Figura 53: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global.

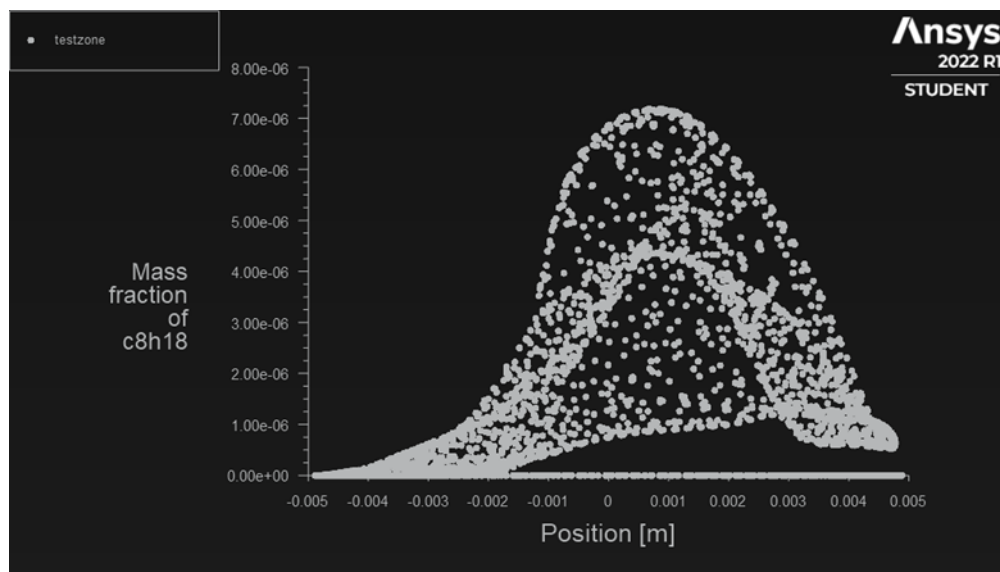


Figura 54: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global.

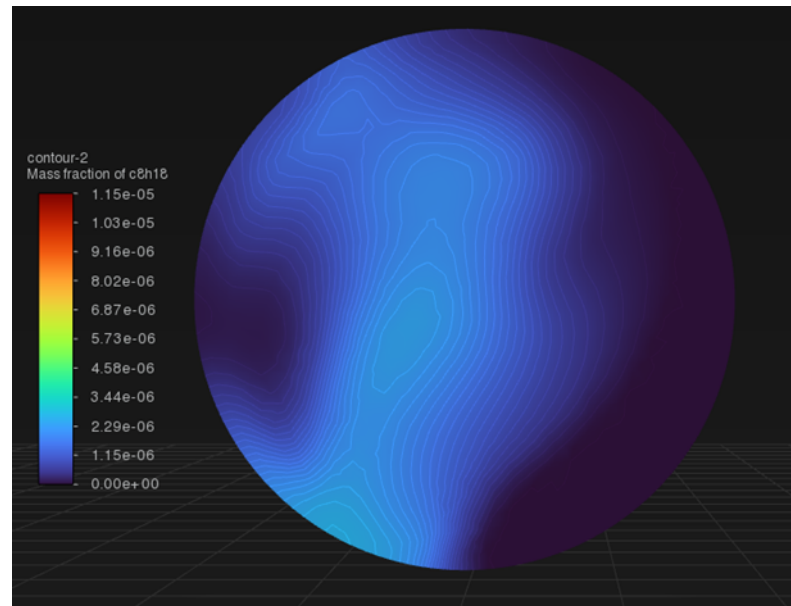


Figura 55: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global.

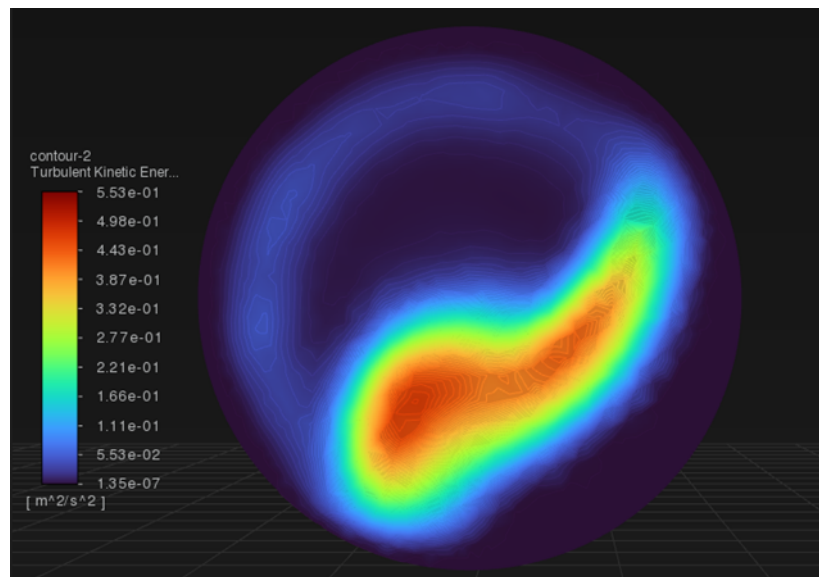


Figura 56: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global.

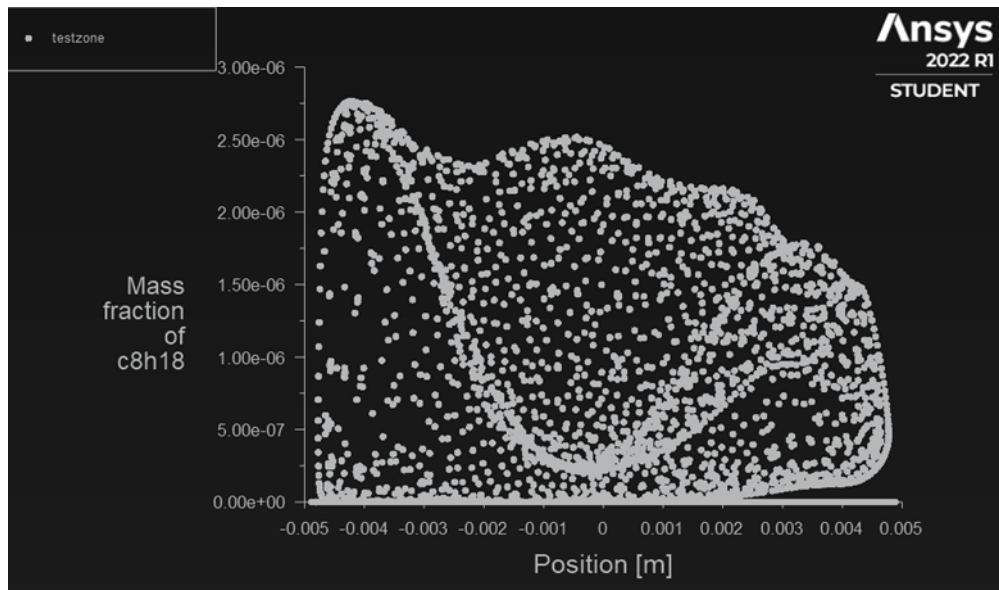


Figura 57: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global.

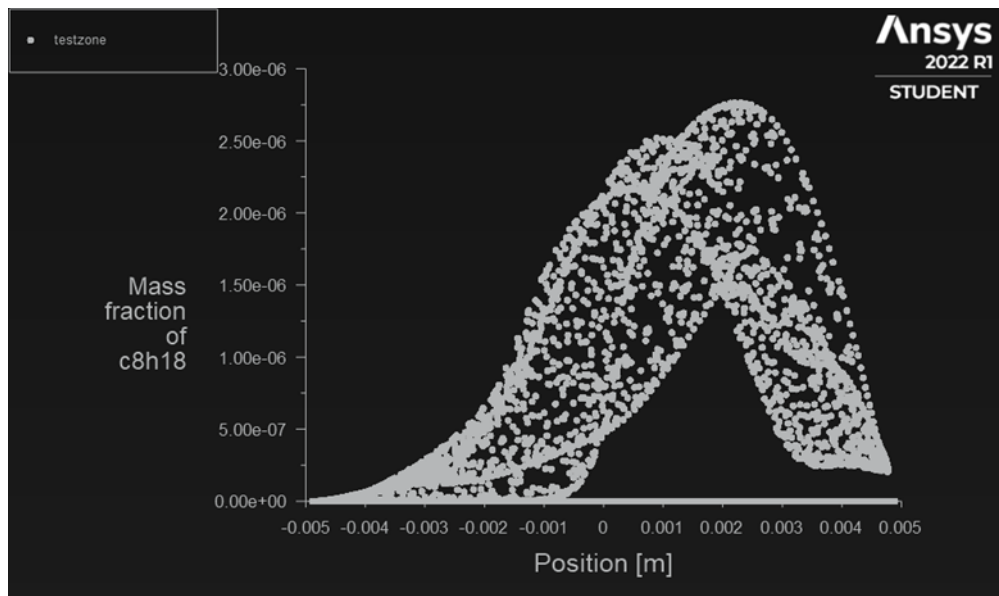


Figura 58: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global.

## F Resultados 2ª fase

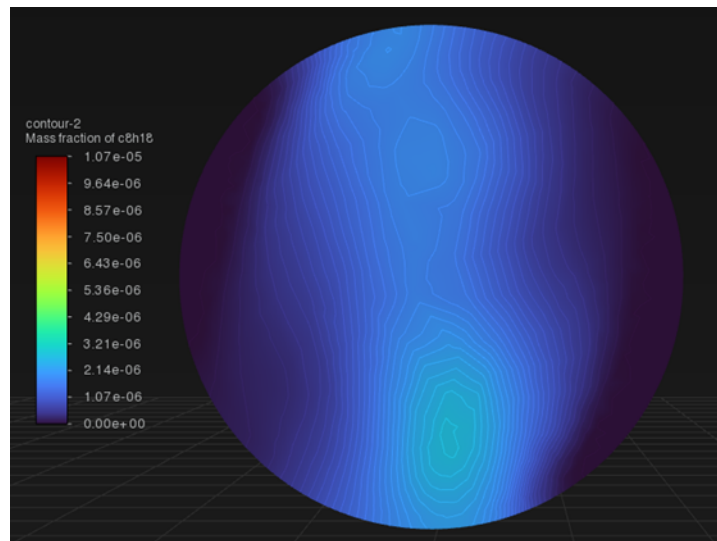


Figura 59: Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 5 mm de distância do referencial global.

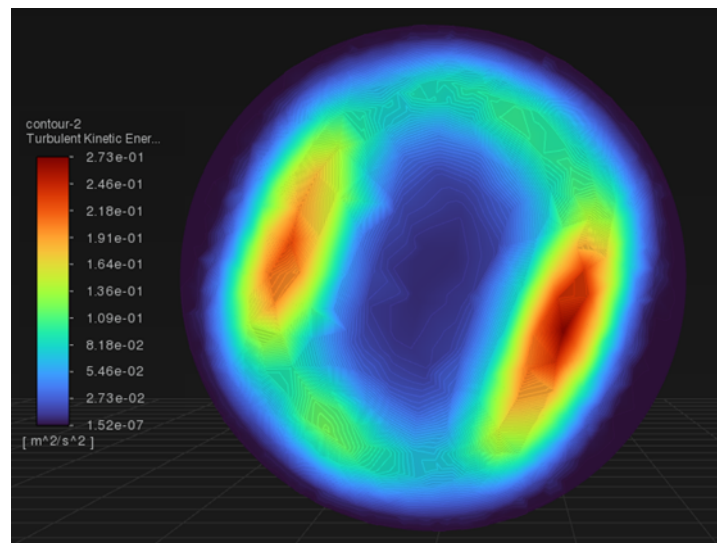


Figura 60: Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 5 mm de distância do referencial global.

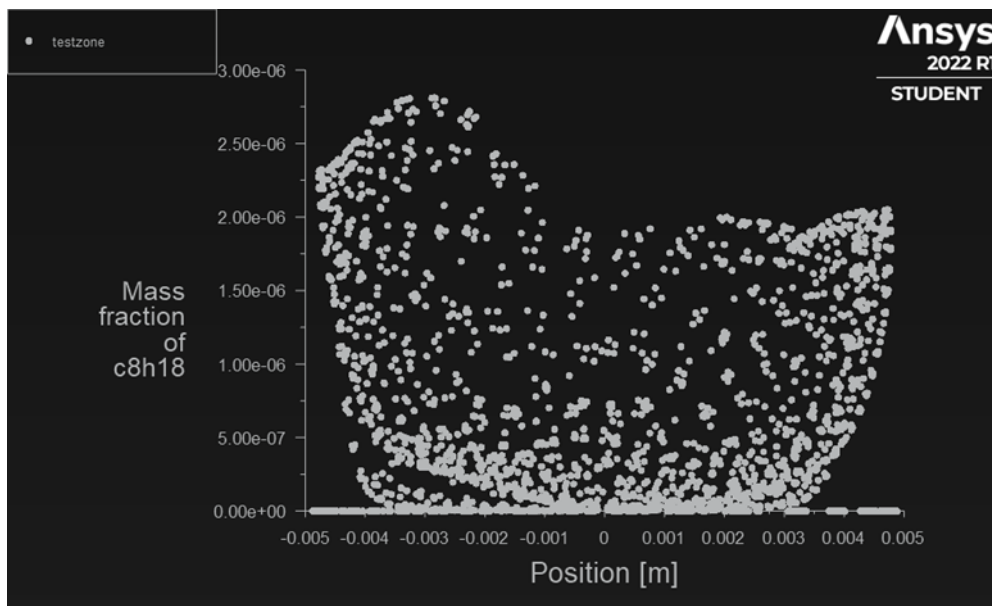


Figura 61: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 5 mm de distância do referencial global.

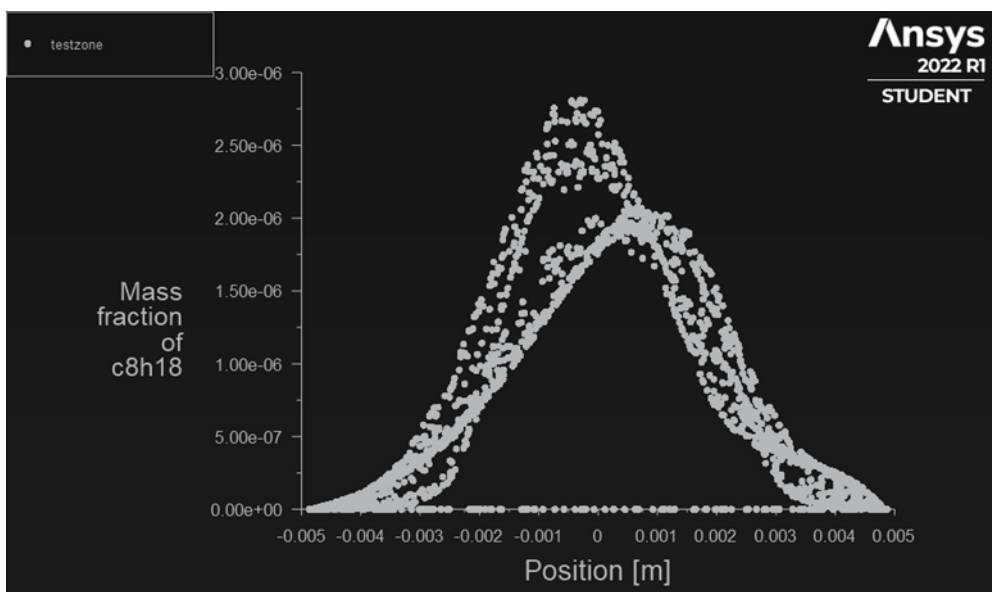


Figura 62: : Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 5 mm de distância do referencial global.

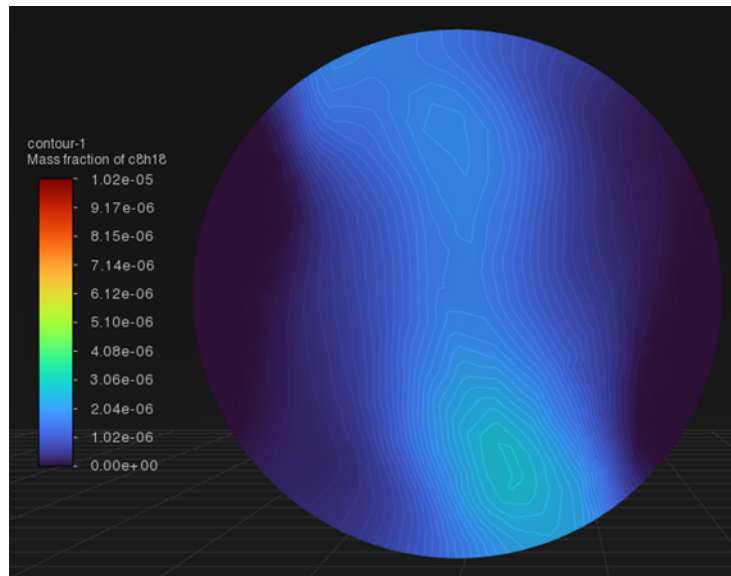


Figura 63: Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 10 mm de distância do referencial global.

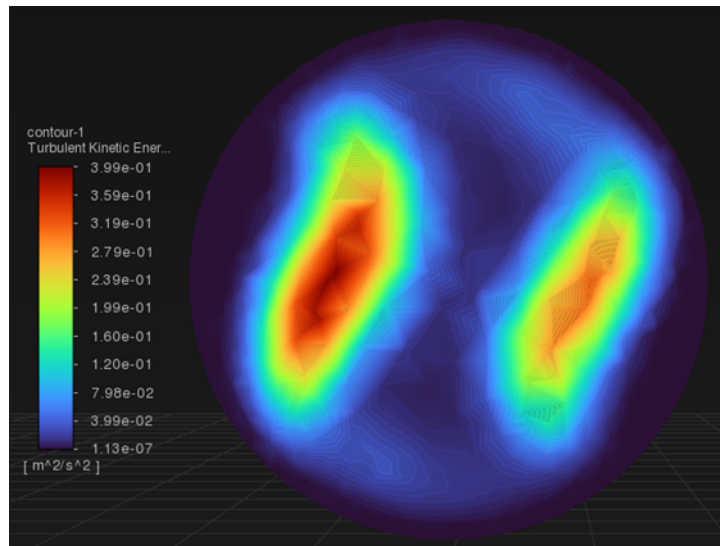


Figura 64: Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 10 mm de distância do referencial global.

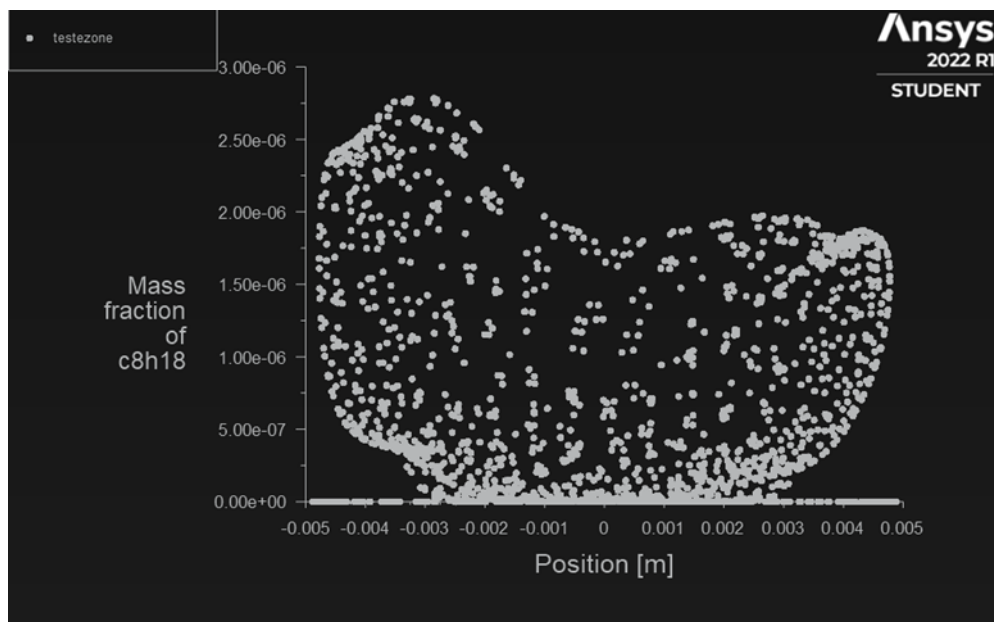


Figura 65: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 10 mm de distância do referencial global.

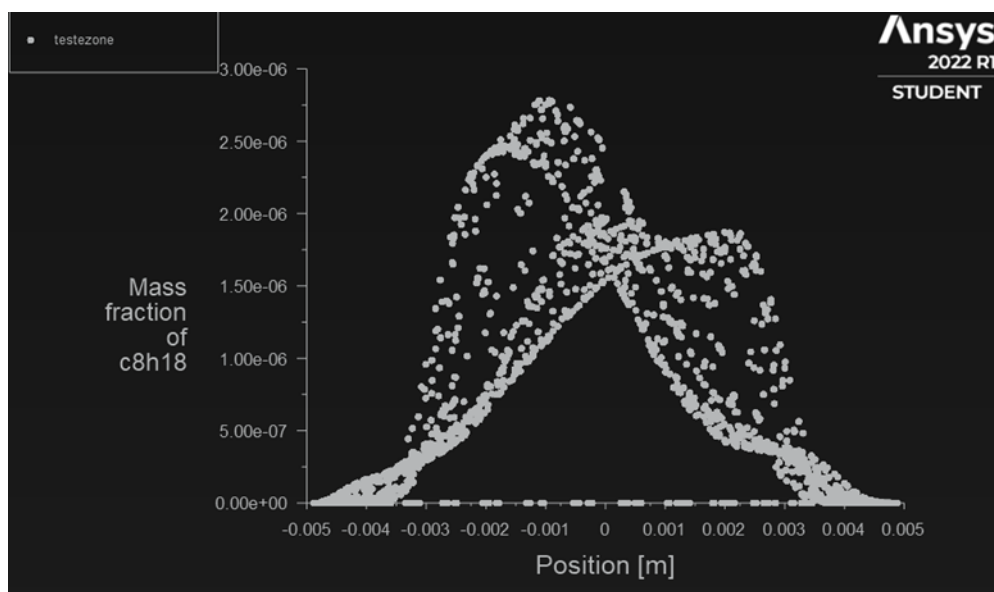


Figura 66: : Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 10 mm de distância do referencial global.

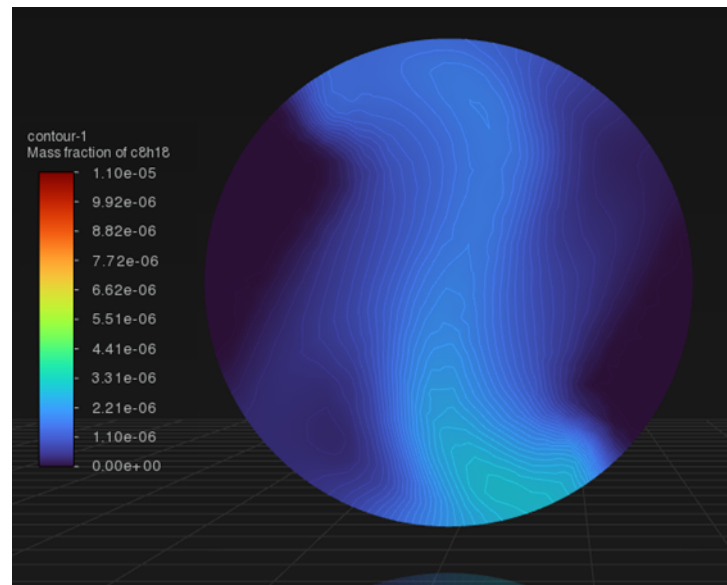


Figura 67: Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 15 mm de distância do referencial global.

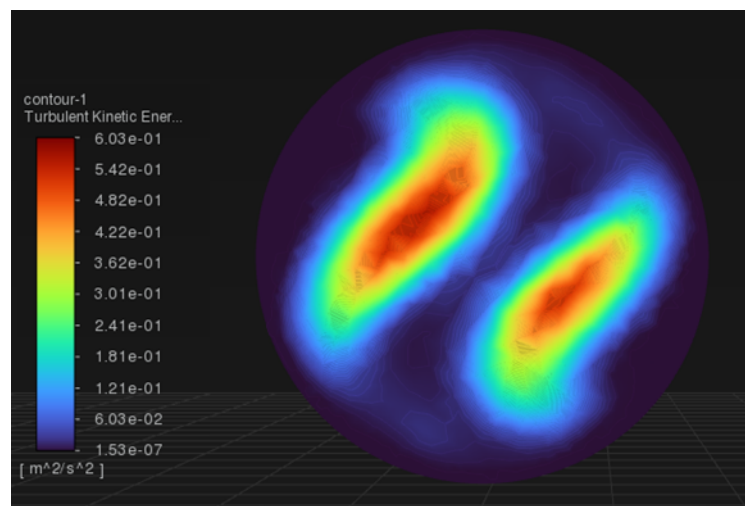


Figura 68: Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 15 mm de distância do referencial global.

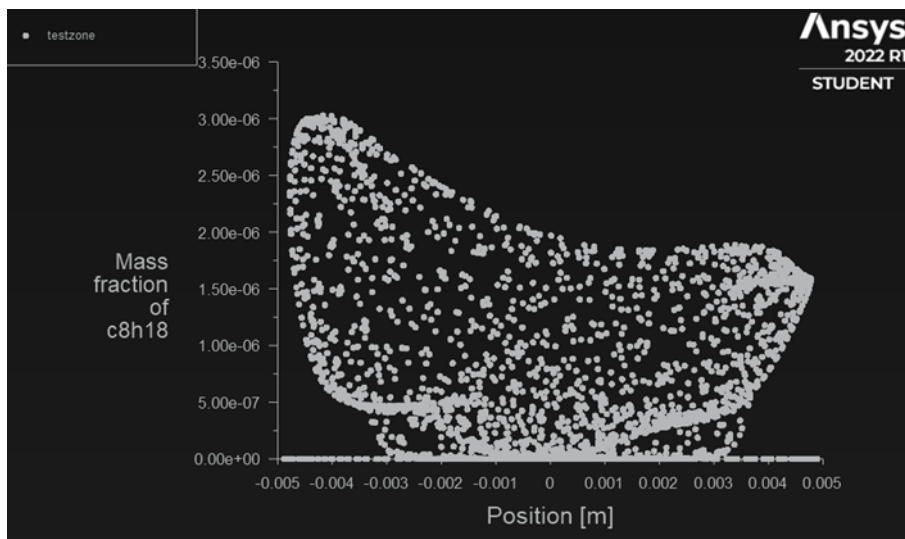


Figura 69: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 15 mm de distância do referencial global.

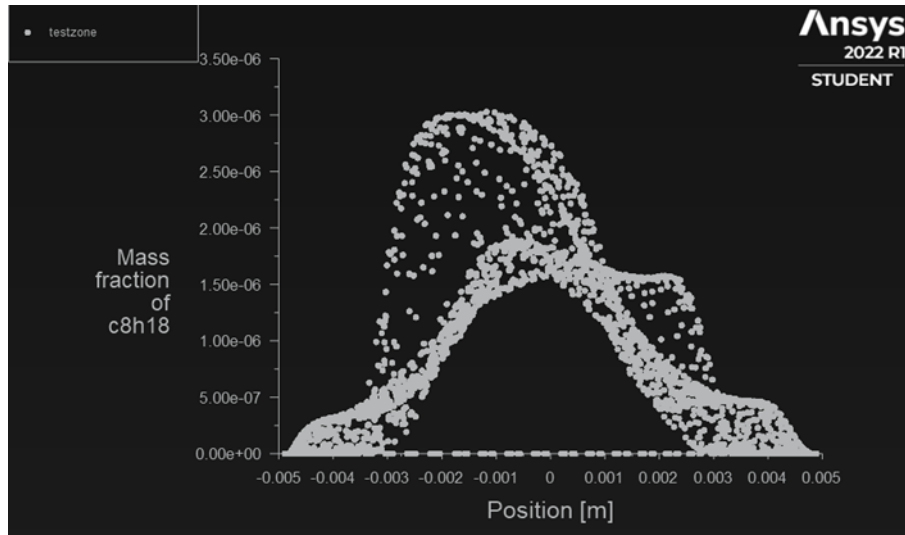


Figura 70: : Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtices, em contra rotação, com 40 graus colocados a 15 mm de distância do referencial global.

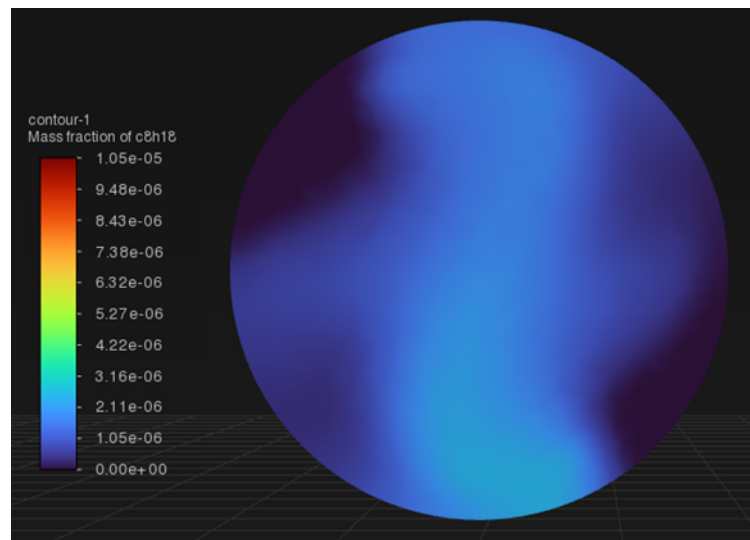


Figura 71: Contornos de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus a 20 mm de distância do referencial global.

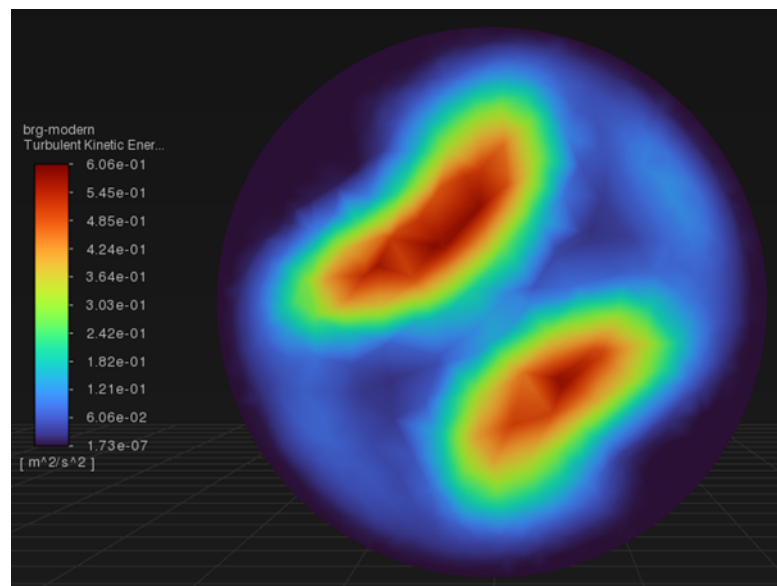


Figura 72: Contornos de TKE de dois geradores de vórtice, em contra rotação, a 40 graus colocados a 20 mm de distância do referencial global.

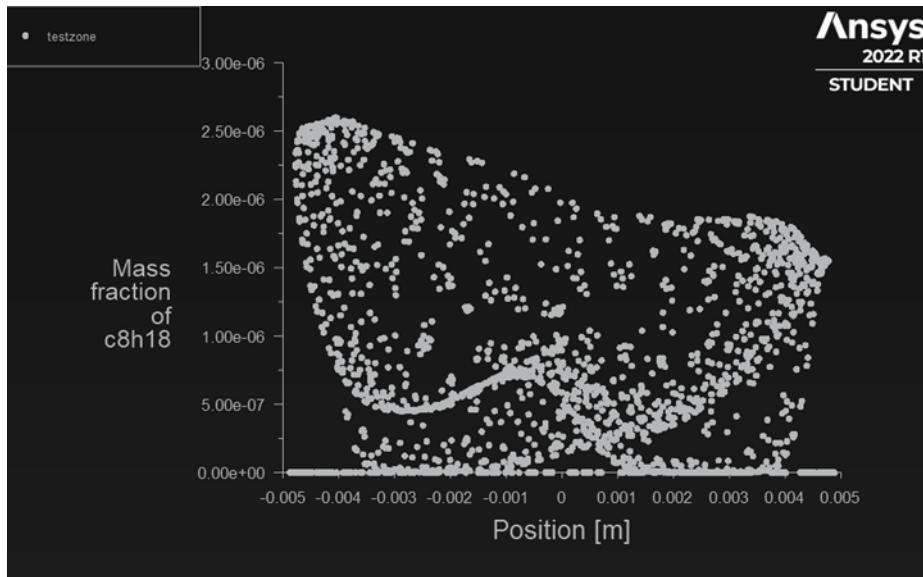


Figura 73: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 20 mm de distância do referencial global.



Figura 74: : Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de dois geradores de vórtice, em contra rotação, com 40 graus colocados a 20 mm de distância do referencial global.

## G Resultados da 3ª fase

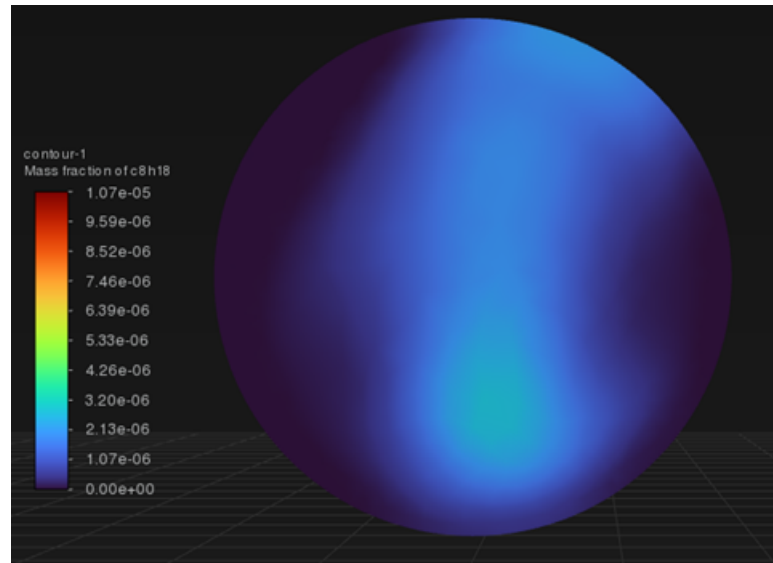


Figura 75: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 5 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior.

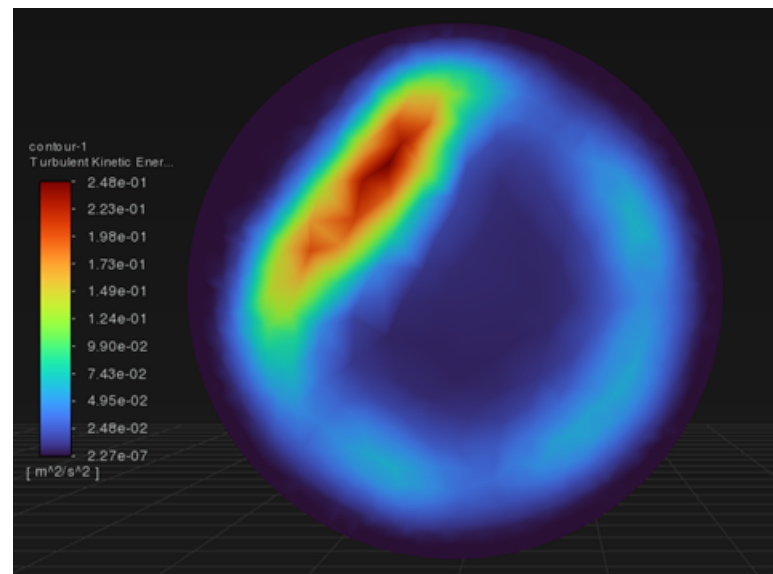


Figura 76: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior

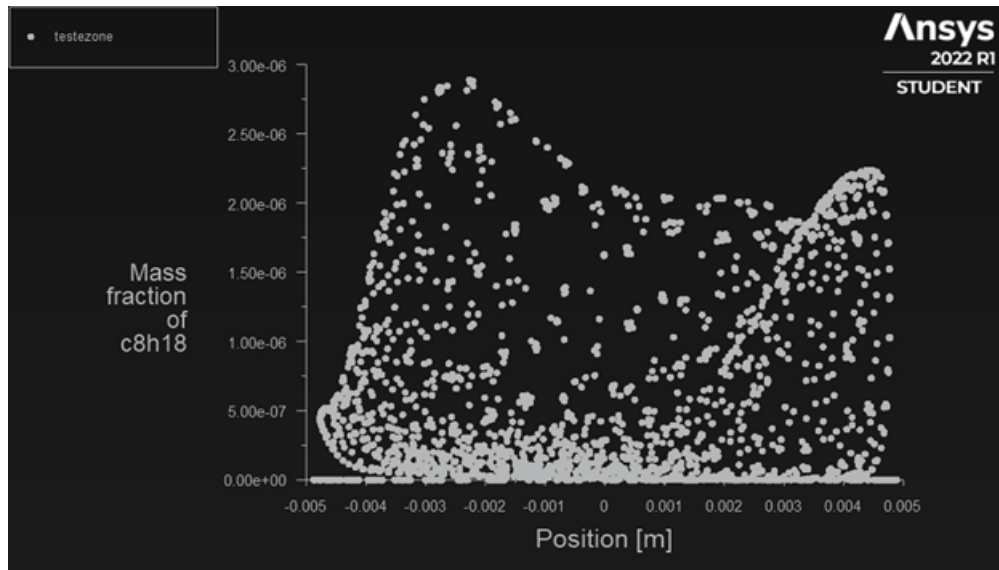


Figura 77: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global na zona superior.

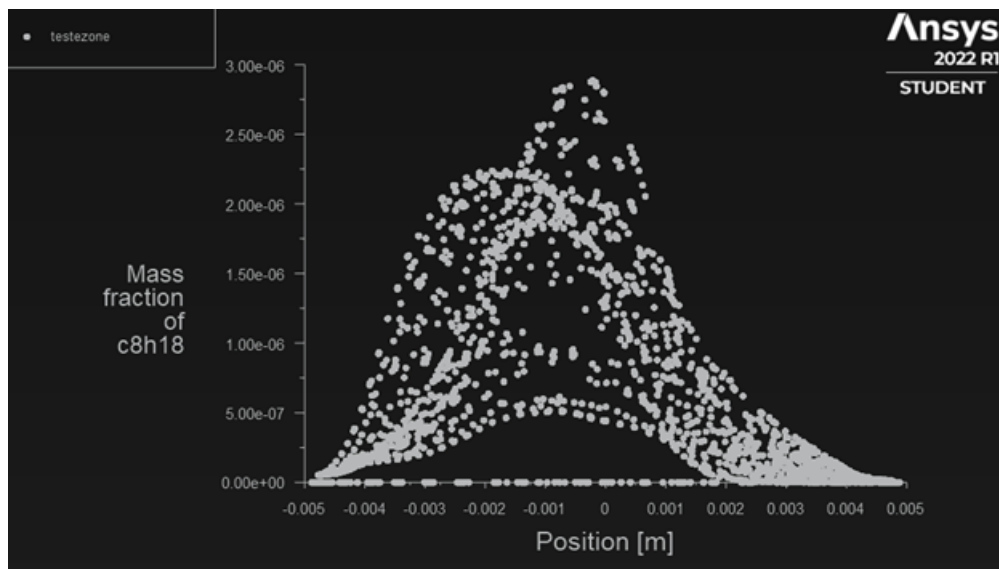


Figura 78: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 5 mm de distância do referencial global na zona superior.

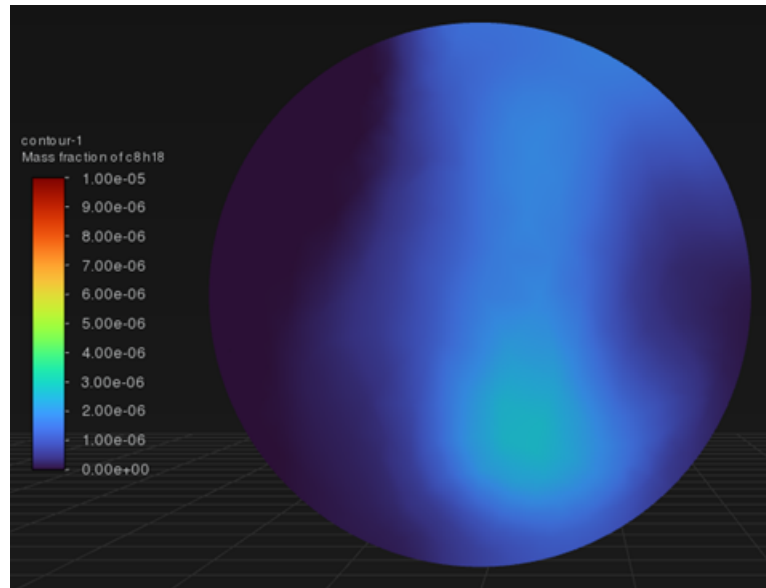


Figura 79: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 10 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior.

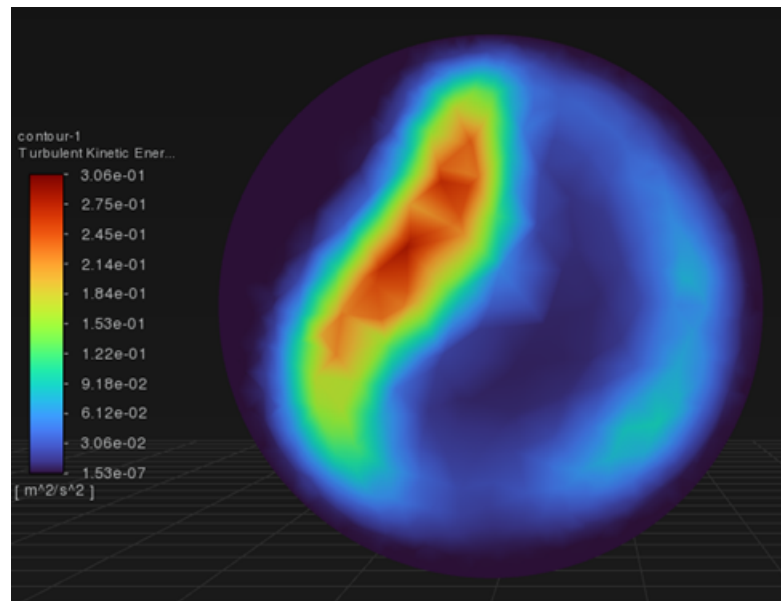


Figura 80: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior

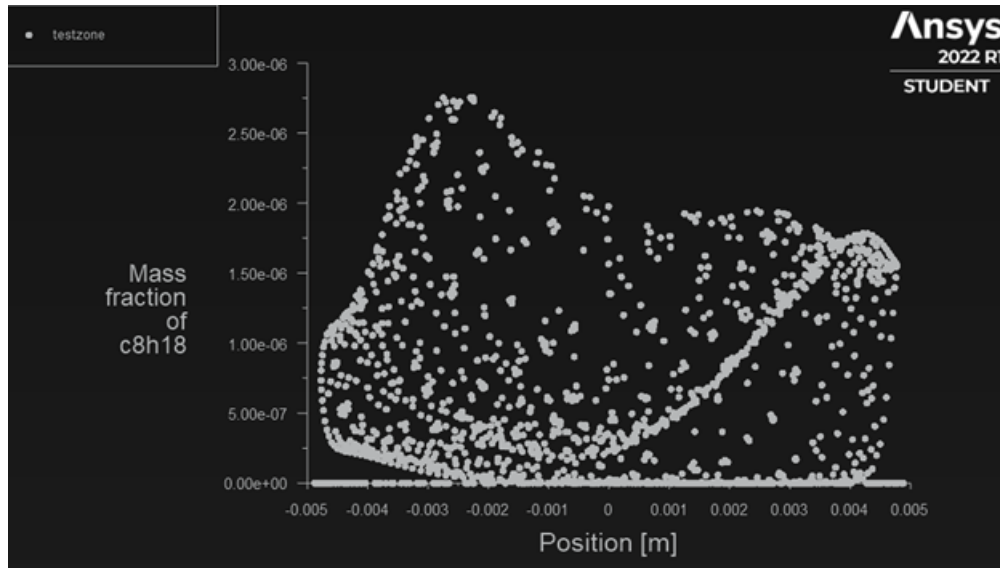


Figura 81: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global na zona superior.

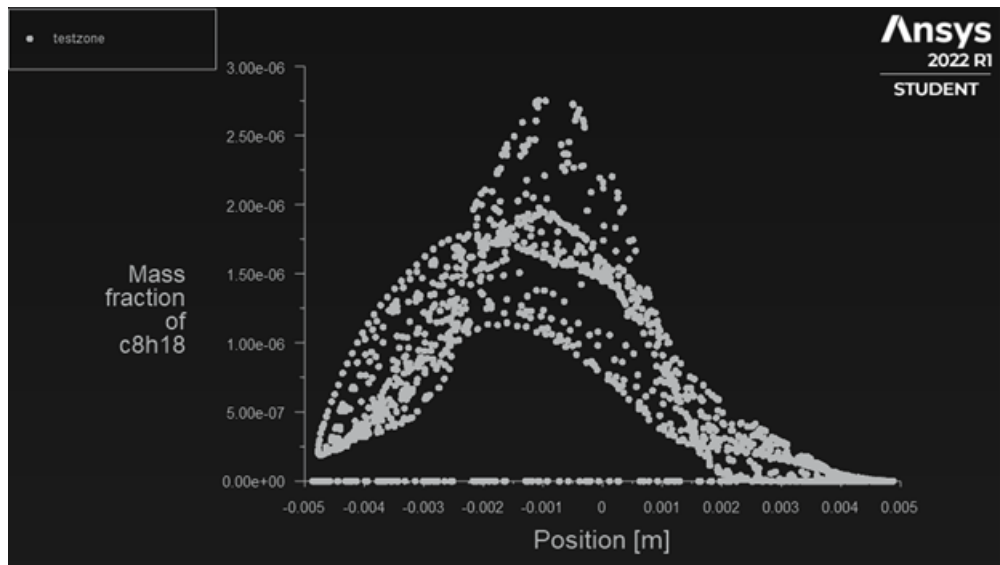


Figura 82: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 10 mm de distância do referencial global na zona superior.

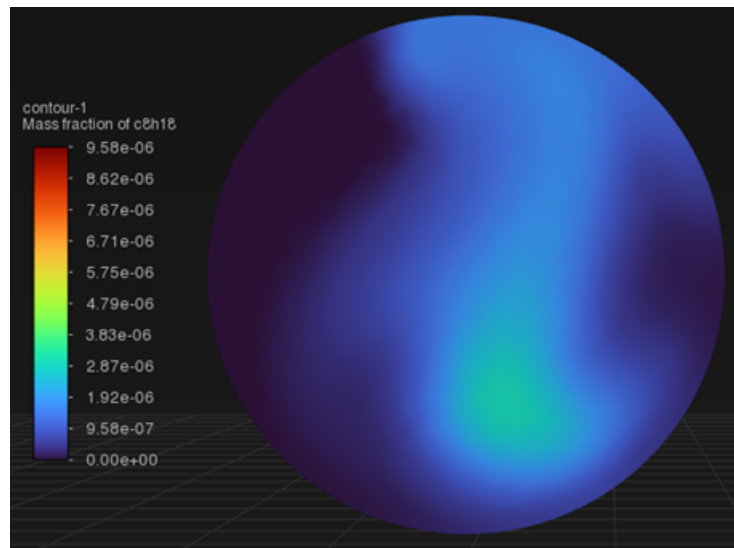


Figura 83: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 15 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior.

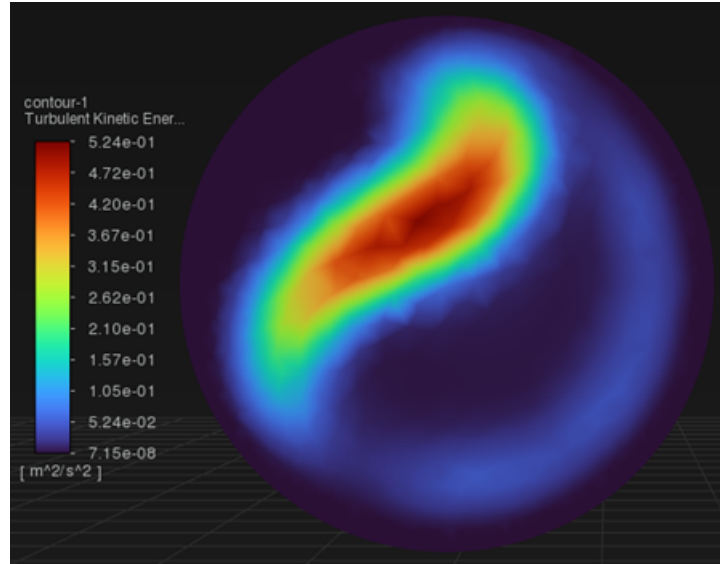


Figura 84: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior

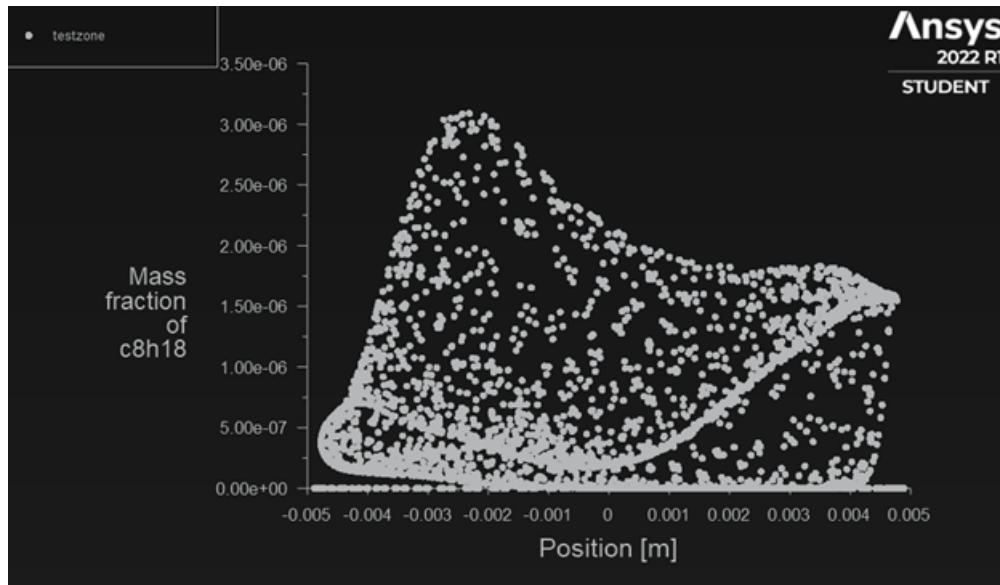


Figura 85: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global na zona superior.

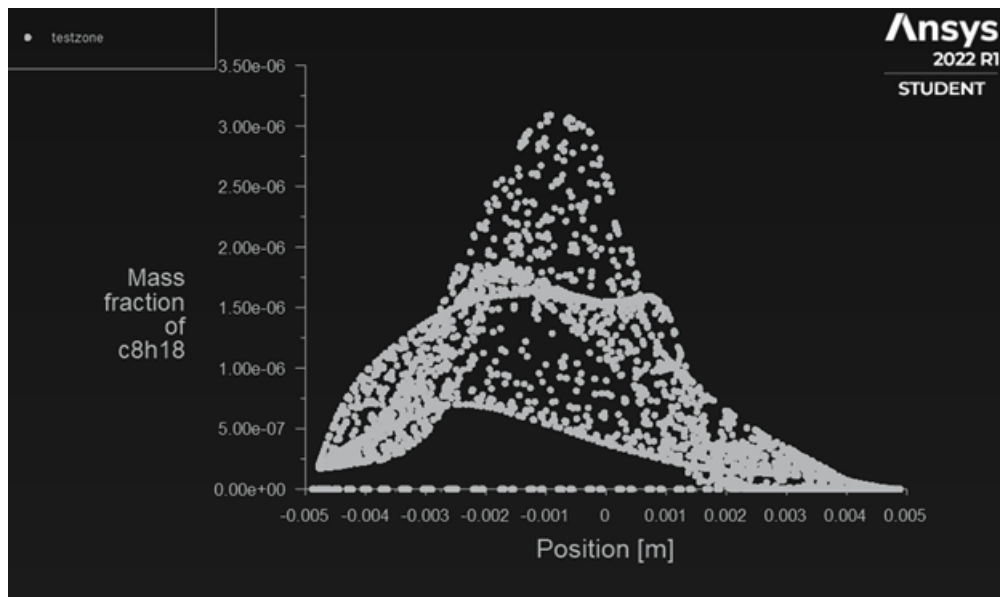


Figura 86: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 15 mm de distância do referencial global na zona superior.

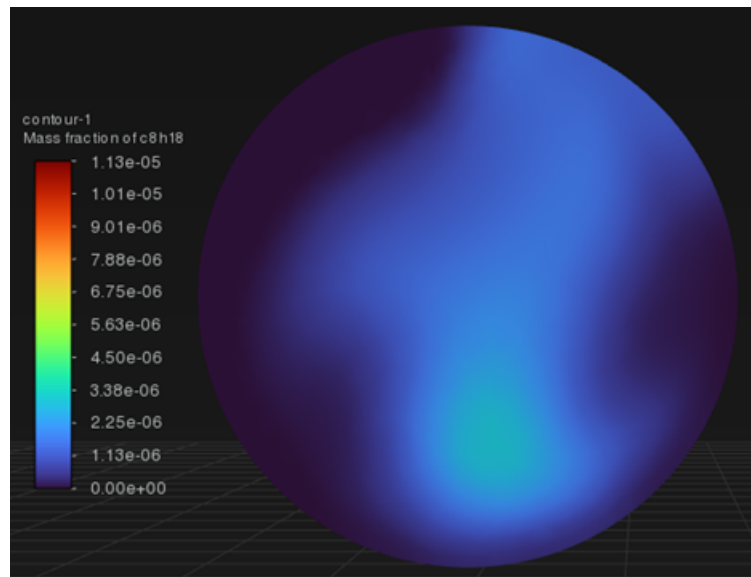


Figura 87: Contornos de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice colocado a 20 mm do referencial global com um ângulo de ataque de 40 graus. Colocado na zona superior.

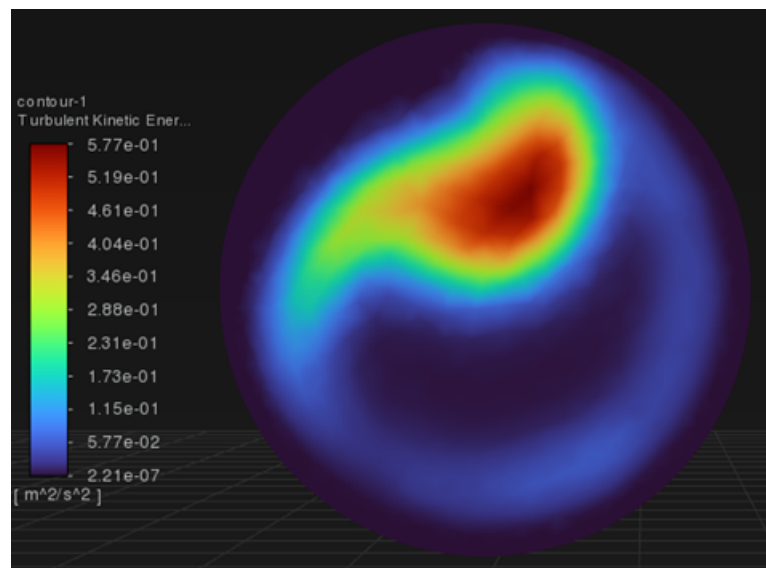


Figura 88: Contornos de TKE de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global. Colocado na zona superior

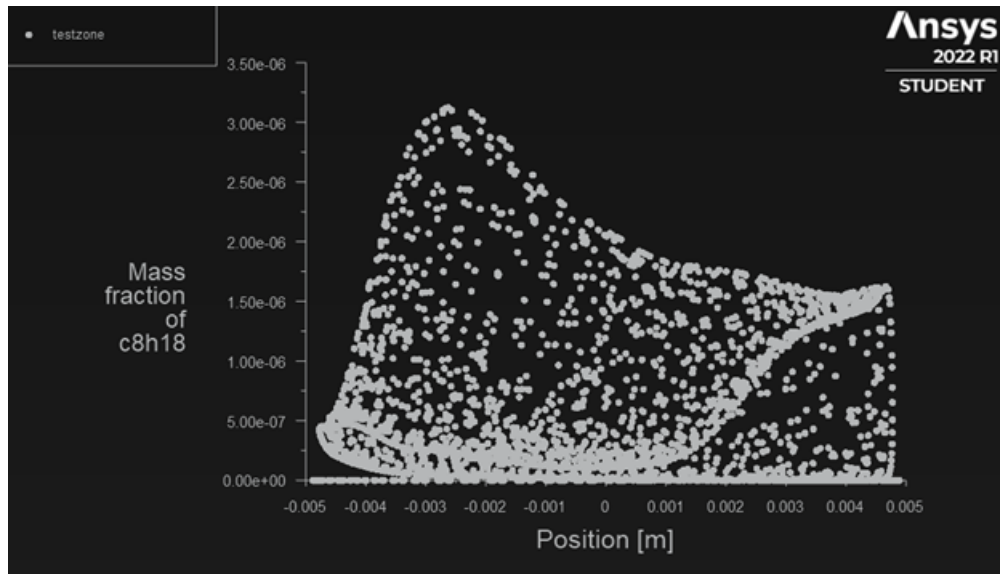


Figura 89: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Y) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global na zona superior.

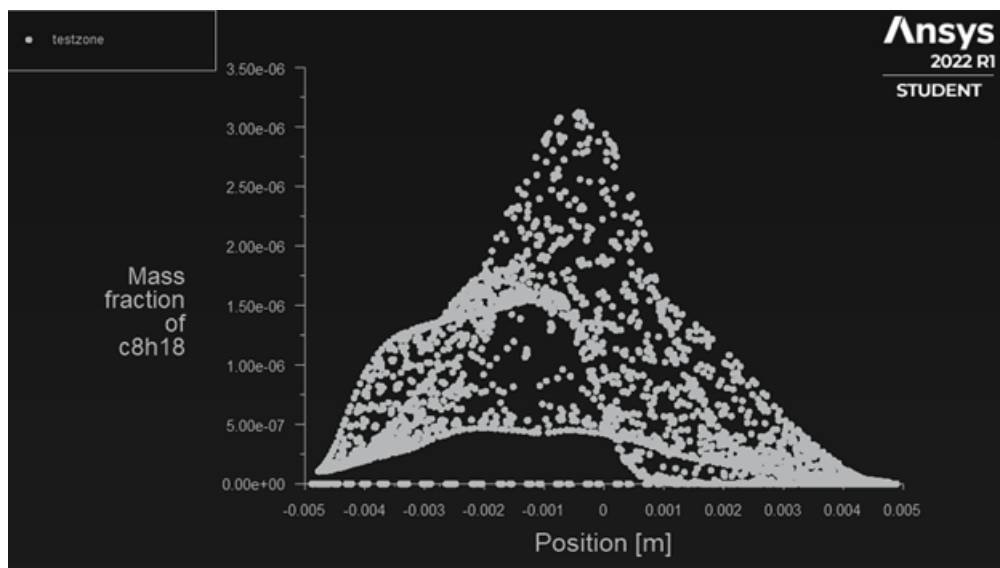


Figura 90: Gráfico de pontos dos contornos (desenhado em Z) de fração mássica de combustível de um gerador de vórtice com 40 graus colocado a 20 mm de distância do referencial global na zona superior.

## H Programa de análise exatas

O programa está construído à volta do formato de valores fornecidos pela ferramenta dentro do Ansys Fluent “XY plot”. É necessário, no entanto formatar os dados primeiro para Excell isto é substituir todos os pontos por vírgulas. Uma forma rápida de realizar este processo é abrir os dados em Notepad e usar a ferramenta integrada de substituição. Os dados devem ser transportados para a célula “I3”. Para ativar o processo de cálculo basta ativar a macro descrita neste apêndice. Nota: O programa é escrito em VBA.

```

Sub teste()
    Range("O3:Q2000").Select
    Selection.ClearContents 'Para limpar dados antigos ao alterar dados
Call Analiseexata 'Correr a macro de analise horizontal
End Sub

```

---

```

Sub Analiseexata()

    For v = 3 To Range("C1").Value + 3

        DistM = 0 'reset de pontos
        Npontos = 0
        VarM = 0

        For j = 3 To Range("G6").Value + 3

            If Cells(j, 9).Value < Cells(v + 1, 1).Value And Cells(j, 9).Value > Cells(v, 1).Value
Then
                DistM = DistM + Sqr((Cells(j, 10).Value * - 0.00000134)^2)
                Npontos = Npontos + 1 'Cálculo da distância vertical total e do número de
pontos existentes.

            End If

        Next j

        If Npontos > 0 Then

            Cells(v, 15).Value = DistM / Npontos 'Guarda os valores da variância num vetor
para a realização dos gráficos
            Cells(v, 16).Value = Npontos

        End If

        If Npontos = 0 Then

```

```
Cells(v, 15).Value = 0  
Cells(v, 16).Value = 0
```

```
End If
```

```
Next v
```

```
End Sub
```

Notas finais:

Para um bom funcionamento do programa: O programa criado é rudimentar e pouco otimizado dado que tem apenas como objetivo obter os gráficos e não a completa automação do processo. Posto isto, existem alguns pontos que asseguram o bom uso do programa:

- Os dados tem de ser inseridos com o formato Excel nas colunas “I3:IXX” e “J3:JXX” onde representam o eixo xx e o eixo das ordenadas respetivamente.
- Para se alterar a precisão deve ser criada uma nova reta com mais pontos.
- Ao alterar a precisão os gráficos têm de ser programados manualmente. No entanto após serem criados uma vez já não é preciso realizar o processo novamente.
- Os dados apresentam mais de 2500 pontos. Por tentativa erro, a precisão mais adequada foi com 100 pontos na reta. Valores mais altos já criavam demasiados pontos vazios ou com o valor zero.
- No final dos dados fornecidos pela plataforma Ansys, existe um parenteses “)”. Este tem de ser obrigatoriamente eliminado manualmente senão o programa poderá dar erro ao realizar cálculos.

## I Gráficos de análise exata da 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> fase

### I.1 1<sup>o</sup> Fase

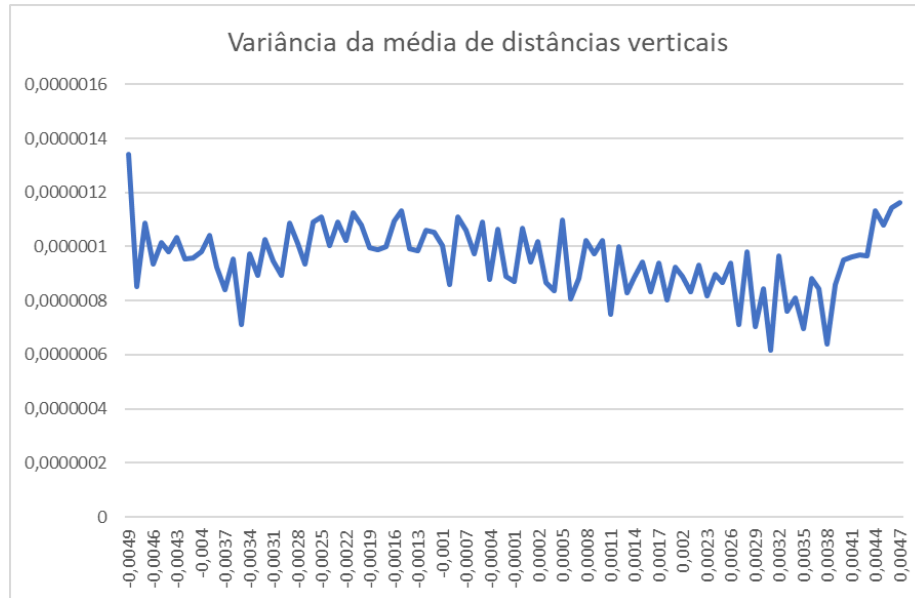


Figura 91: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

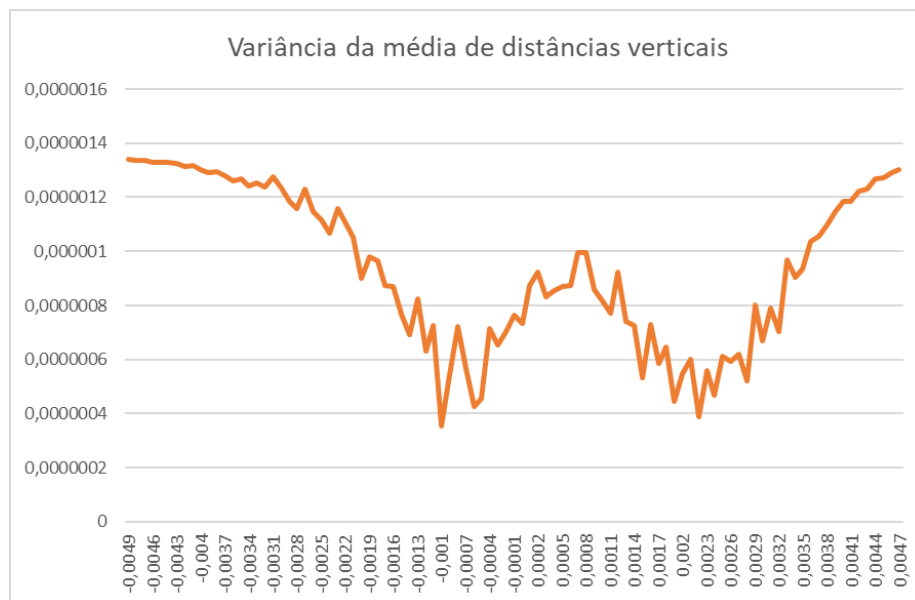


Figura 92: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

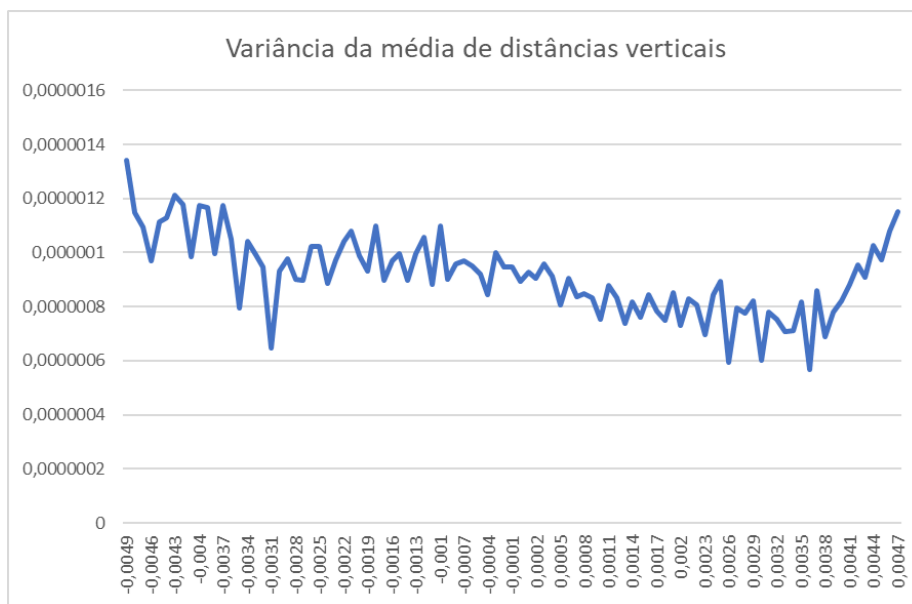


Figura 93: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

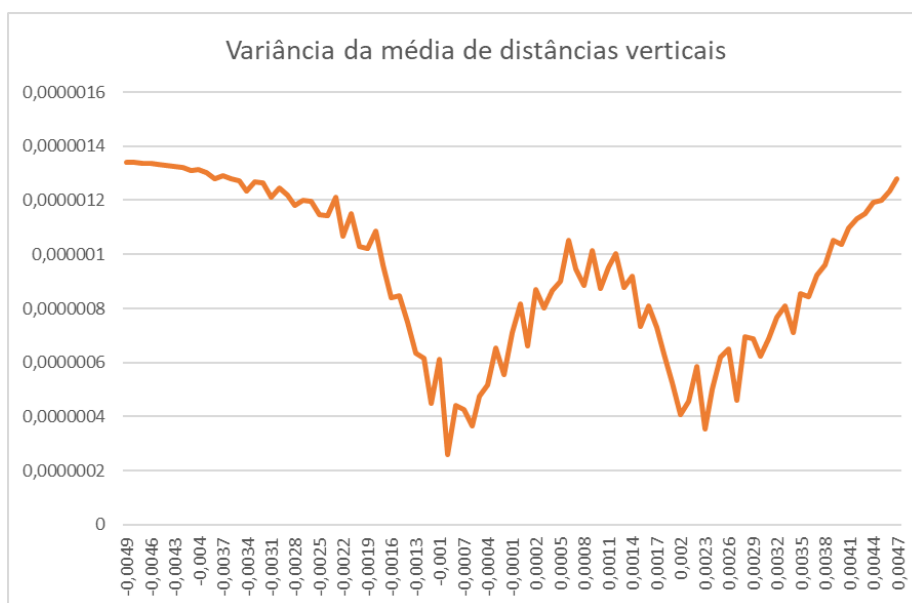


Figura 94: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

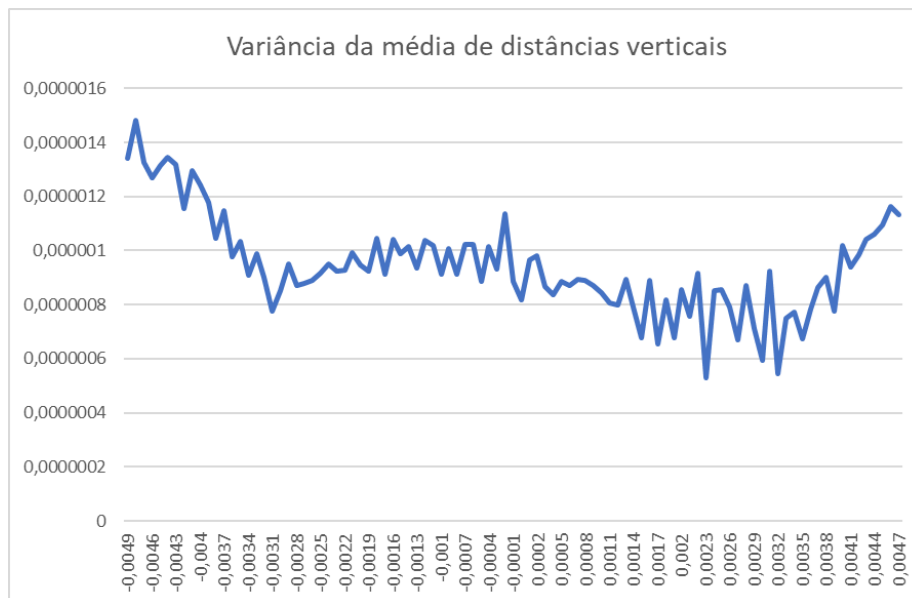


Figura 95: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

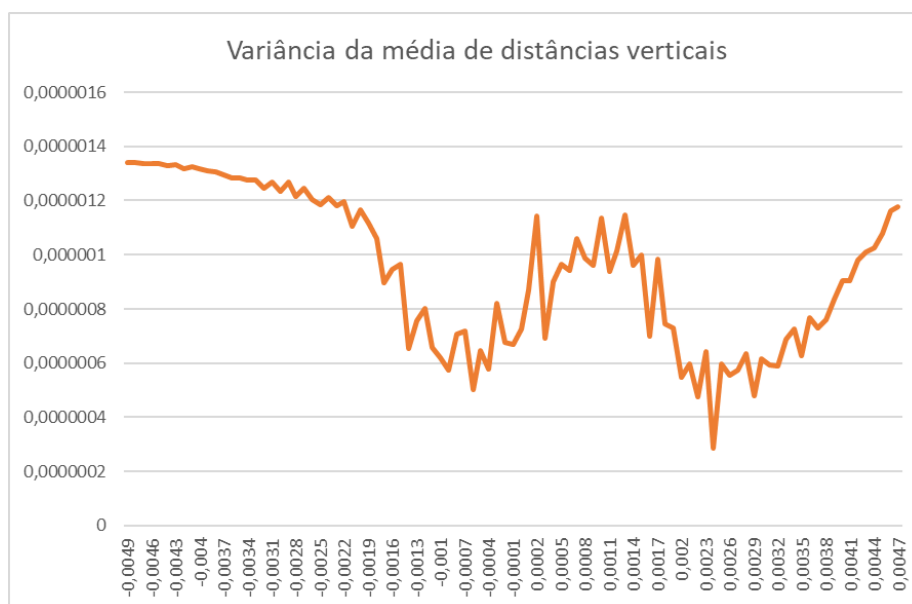


Figura 96: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

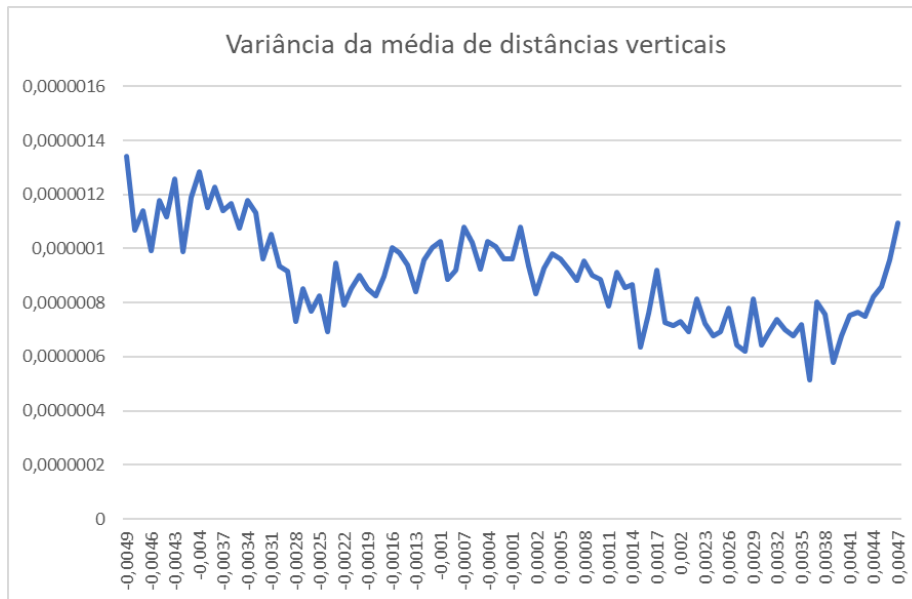


Figura 97: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

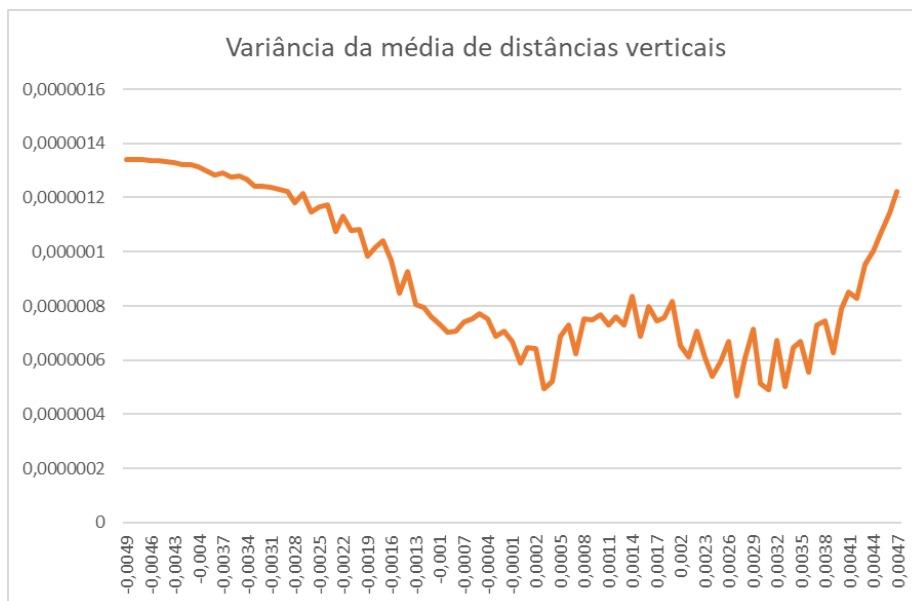


Figura 98: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

## I.2 2ª Fase

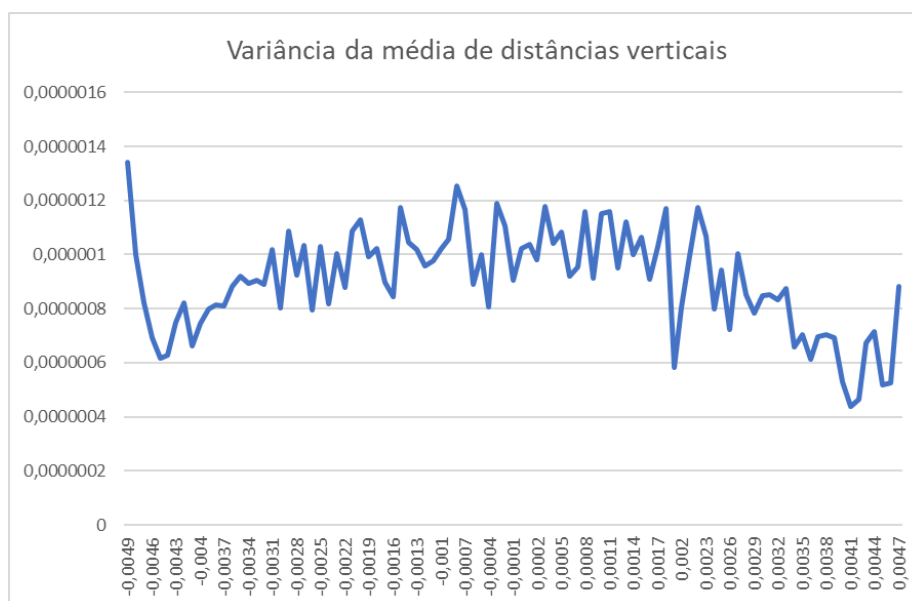


Figura 99: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

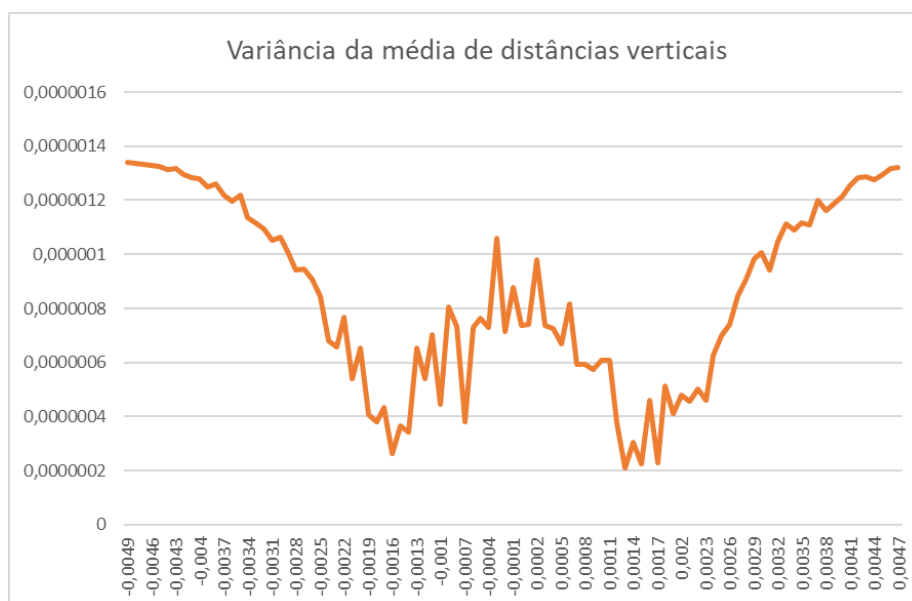


Figura 100: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 5 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

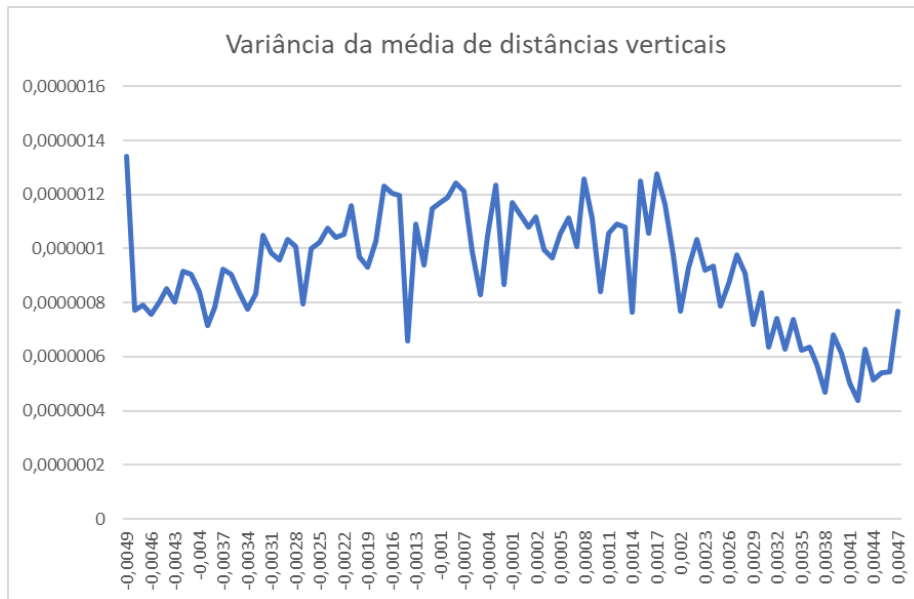


Figura 101: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

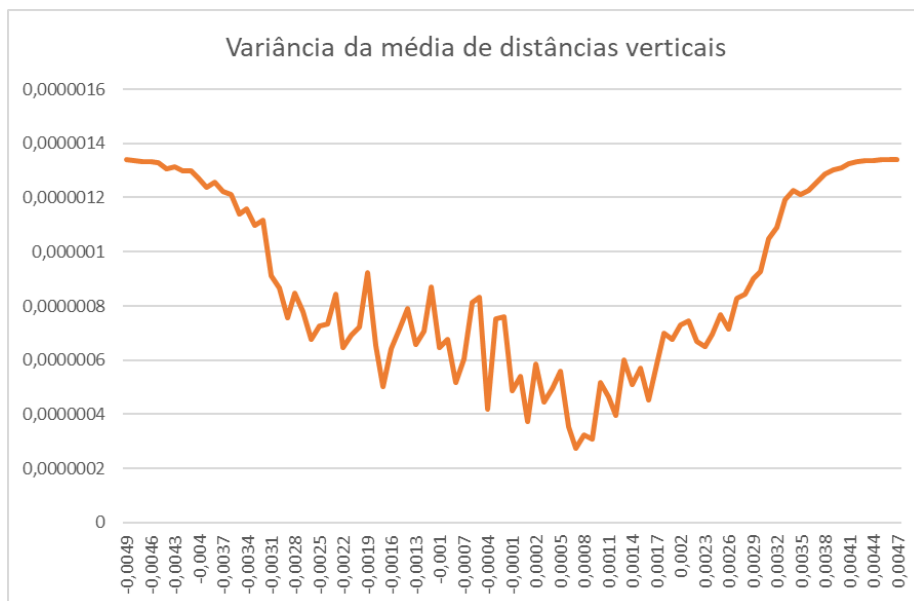


Figura 102: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 10 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

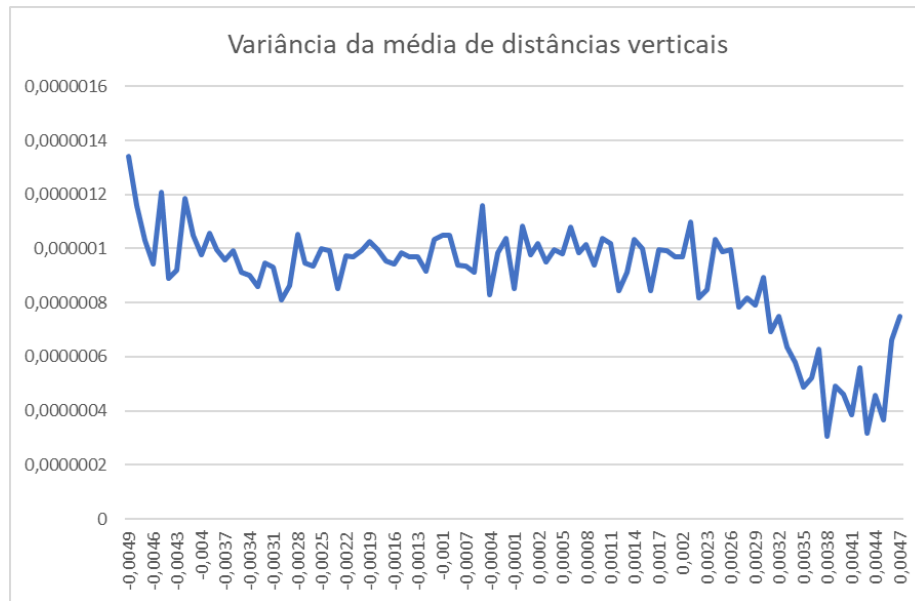


Figura 103: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

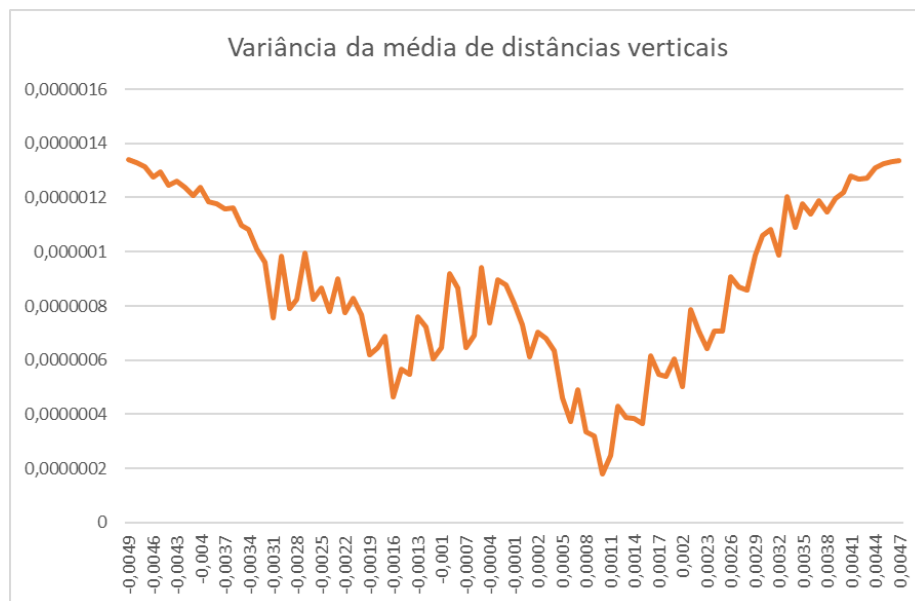


Figura 104: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 15 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

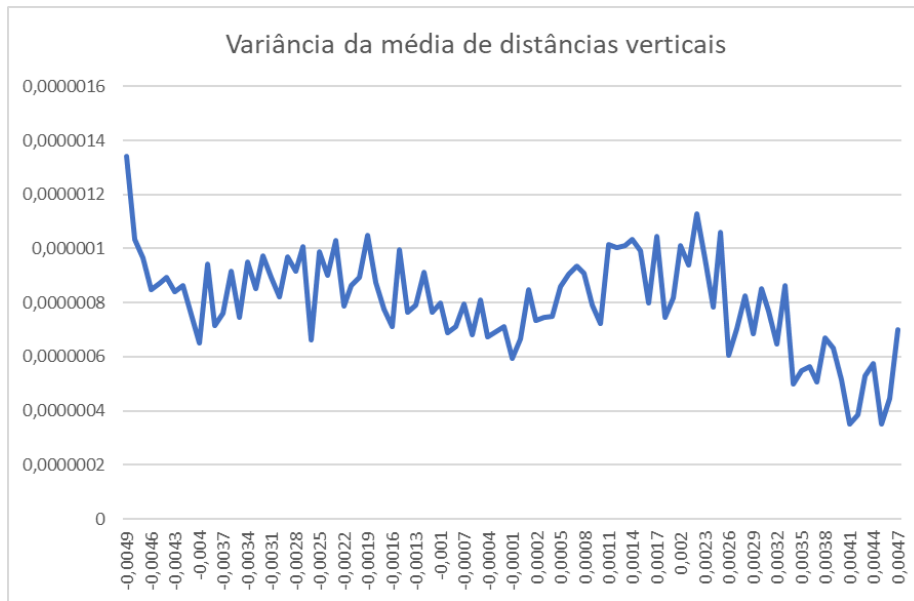


Figura 105: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Y.

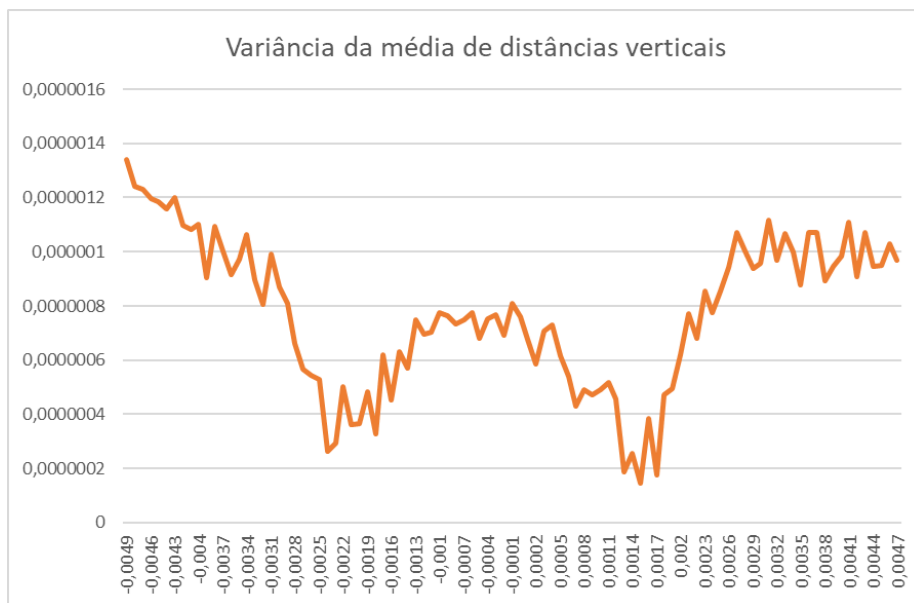


Figura 106: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de dois geradores de vórtice a 20 mm do referencial global. Dados retirados do gráfico em Z.

## I.3 3º Fase

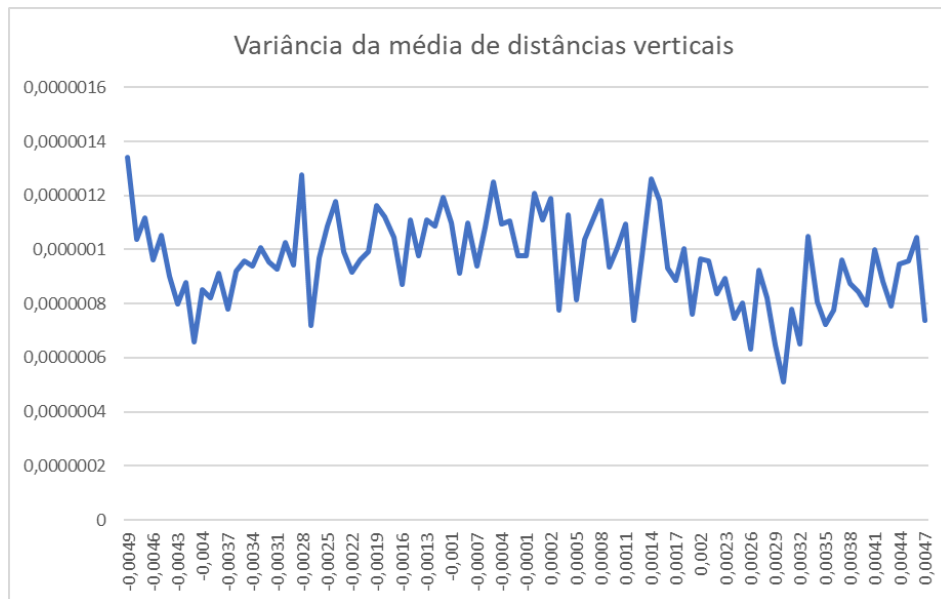


Figura 107: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y.

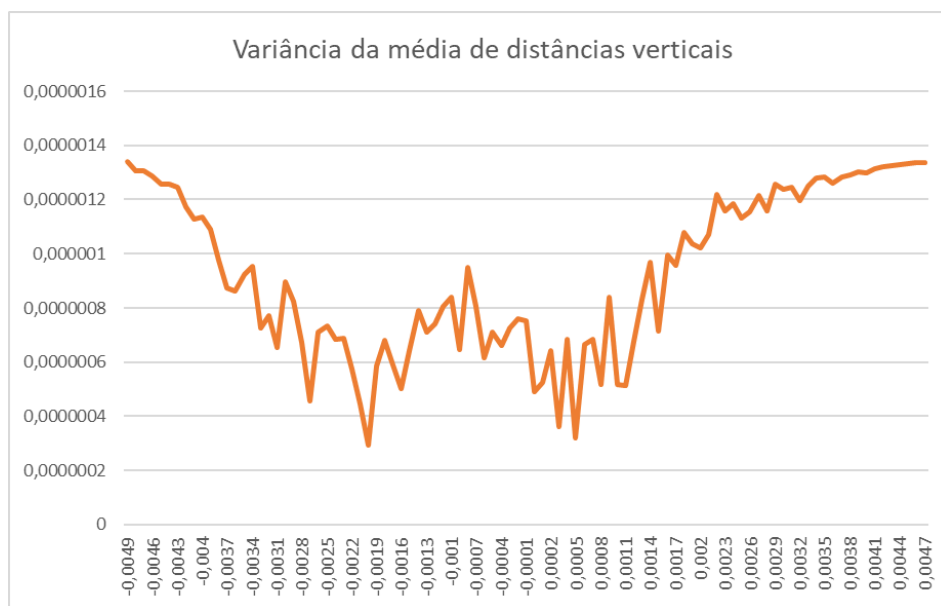


Figura 108: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 5 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z.

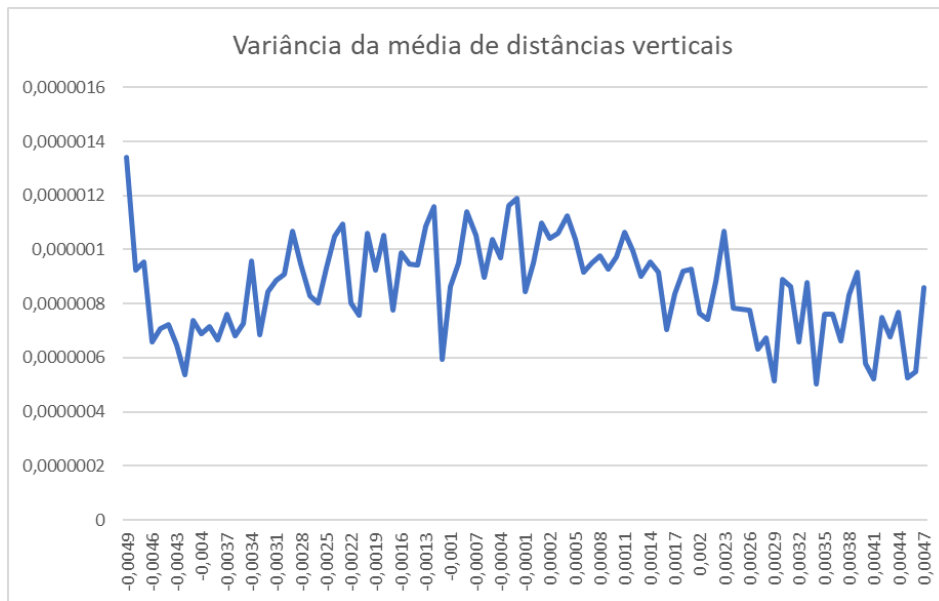


Figura 109: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y.

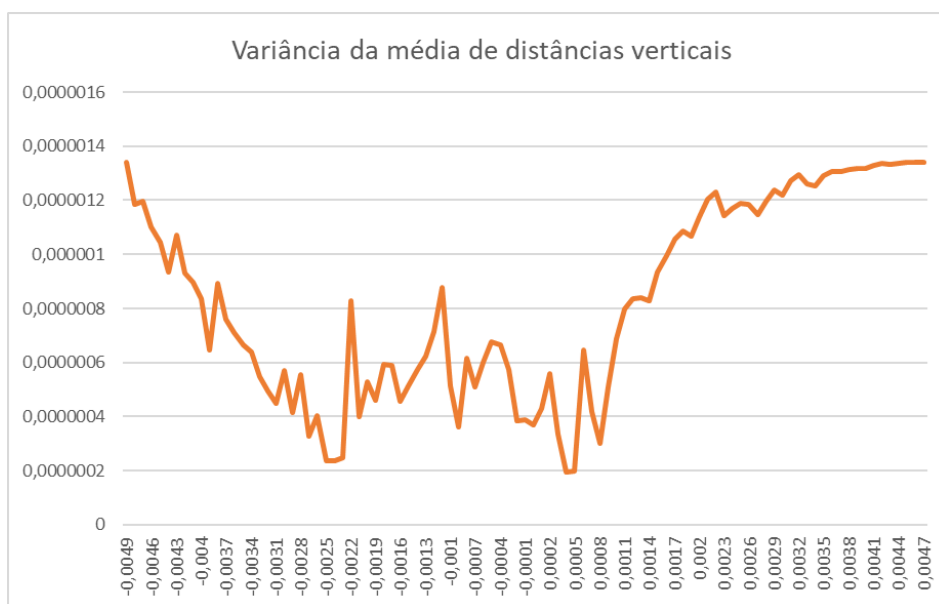


Figura 110: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 10 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z.

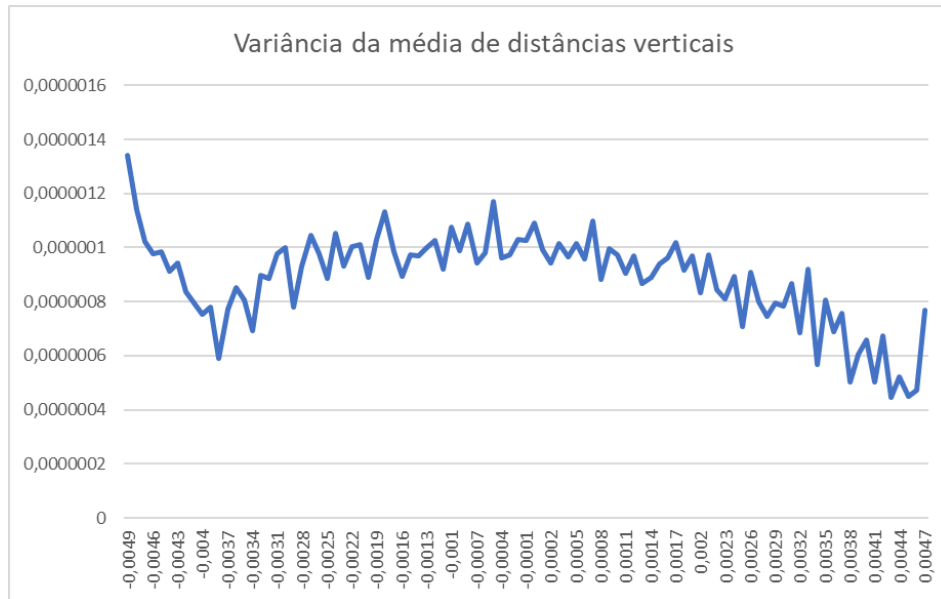


Figura 111: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y.

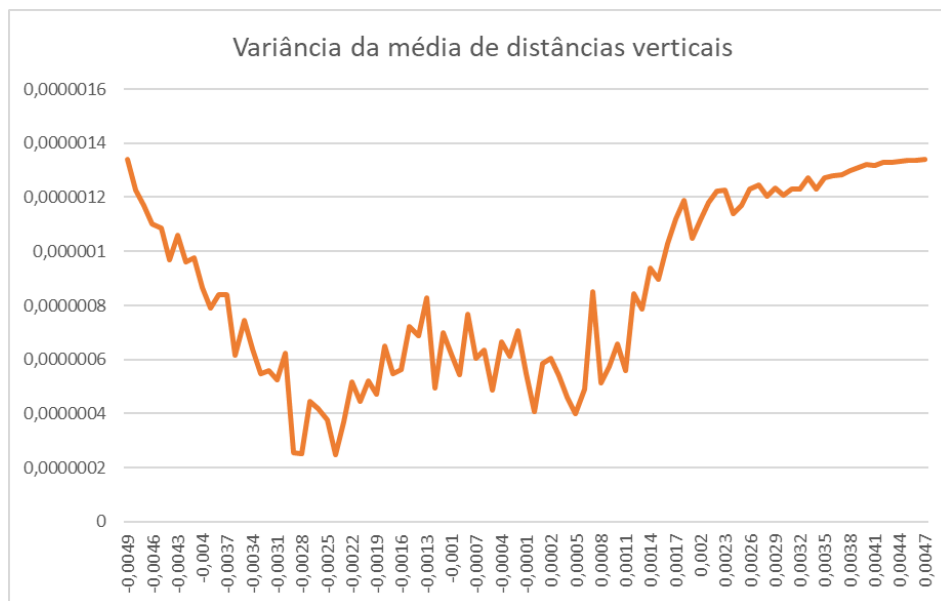


Figura 112: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 15 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z.

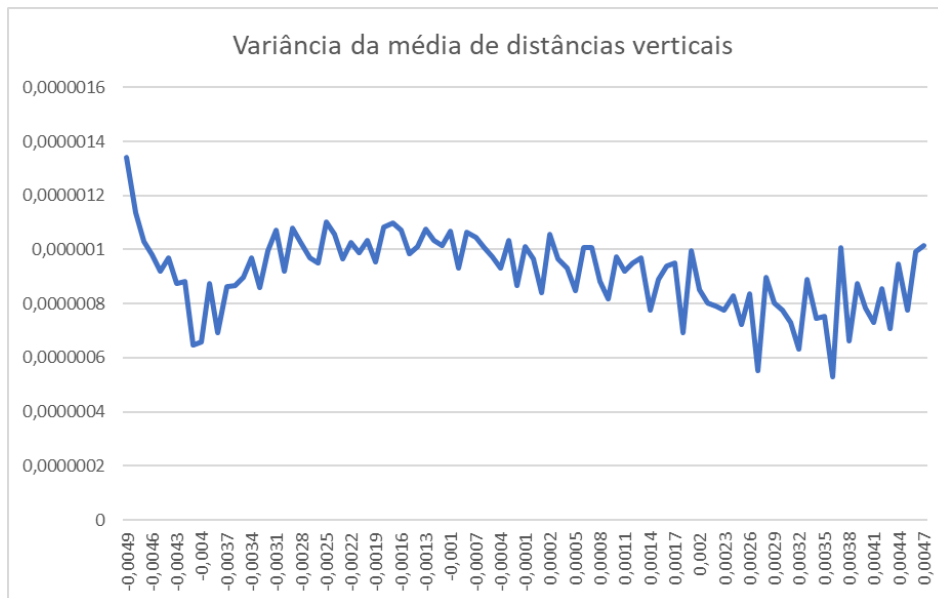


Figura 113: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Y.

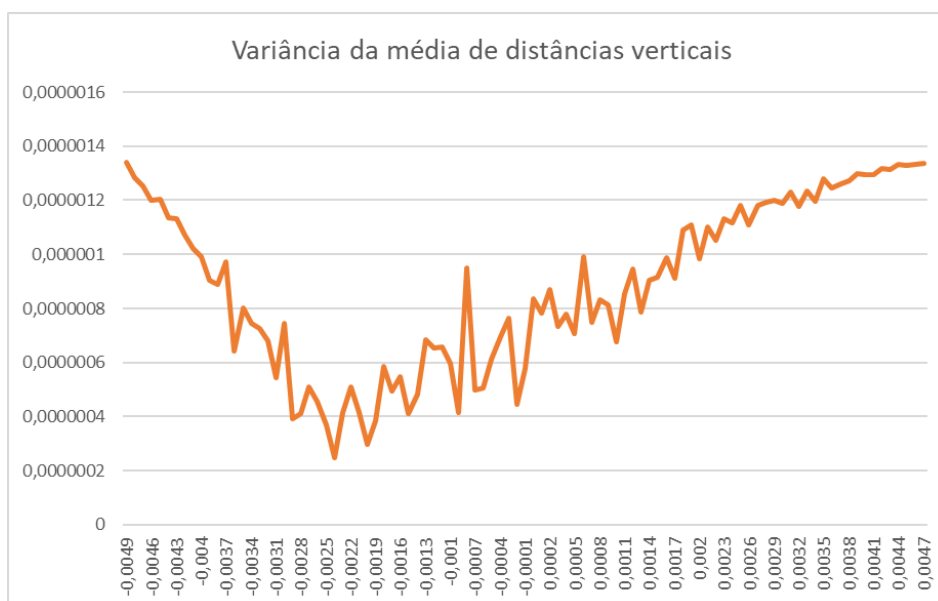


Figura 114: Gráficos da variância da média de distâncias verticais de um gerador de vórtice a 20 mm do referencial global (zona superior). Dados retirados do gráfico em Z.

## J Análise exata da conduta de controlo

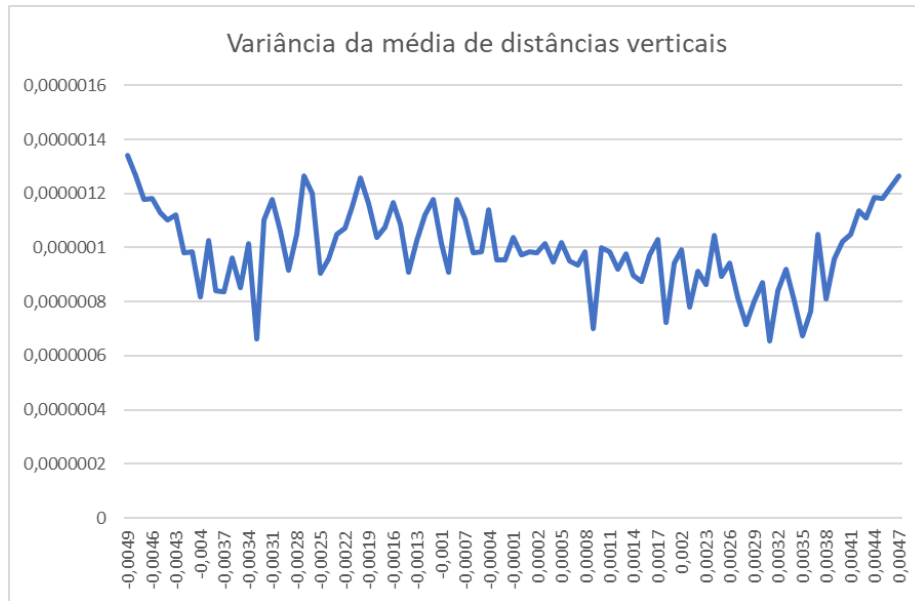


Figura 115: Gráficos da variância da média de distâncias verticais da conduta de controlo relativo ao conjunto de pontos em Y

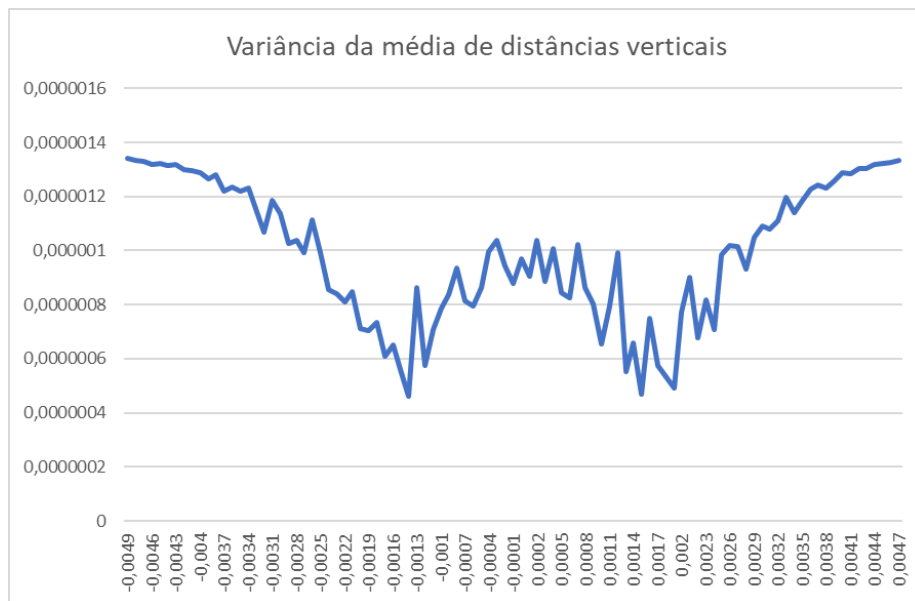


Figura 116: Gráficos da variância da média de distâncias verticais da conduta de controlo relativo ao conjunto de pontos em Z

## K Subfase

Tabela 25: Tabela de independência da malha na sub-fase. Foi obtida 106817 elementos

Design Point	TKE	Var%	fuel	Var%
85441	0,158563	-	2,14E-20	-
106817	0,158773	0,13217	2,22E-20	3,641217

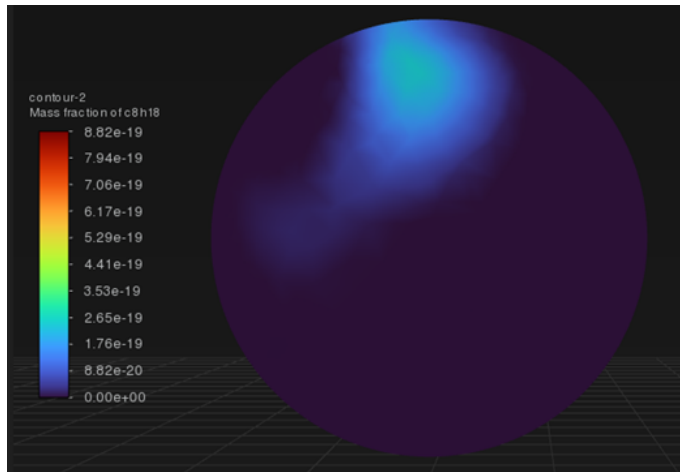


Figura 117: Contornos da fração mássica de combustível na zona de teste de 4 geradores colocados a 20 mm de distância do referencial global

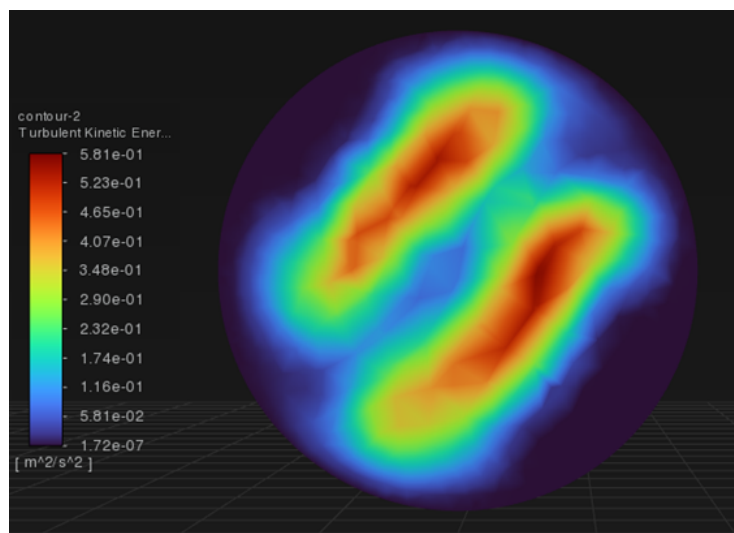


Figura 118: Contornos de TKE de 4 geradores de vórtice distanciados 20 mm do referencial global.

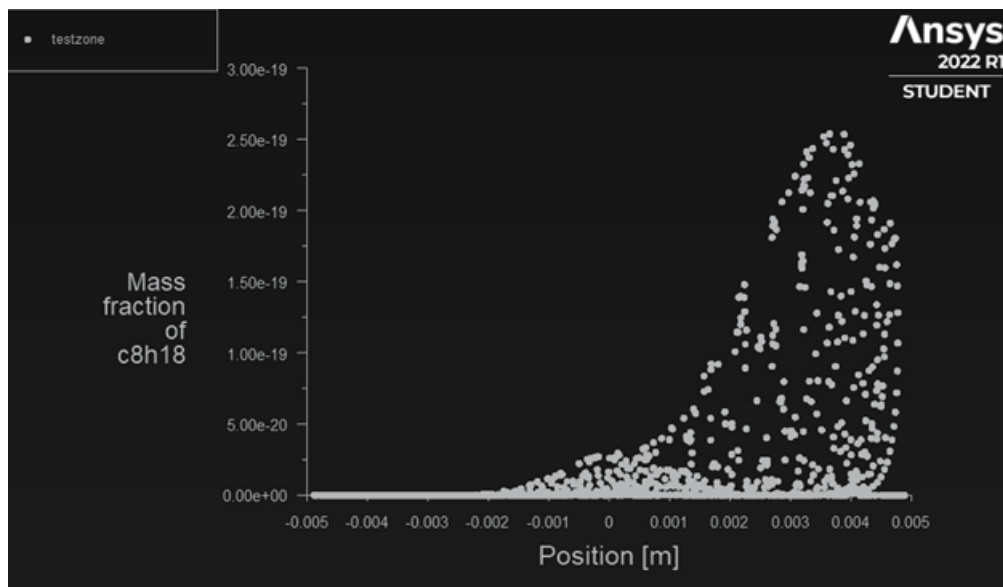


Figura 119: Gráfico de pontos dos de fração mássica de combustível. Desenhado em Y

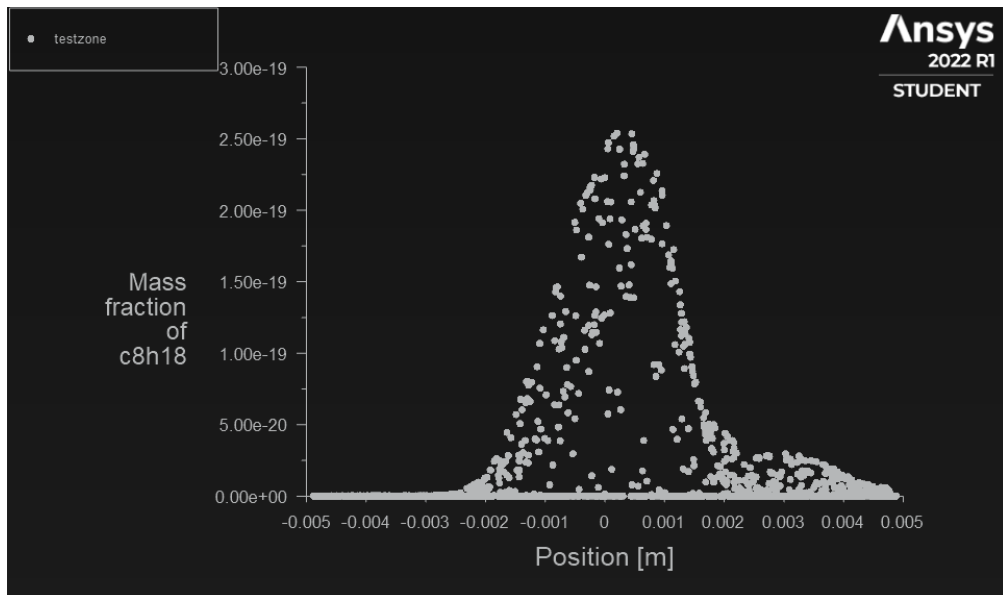


Figura 120: Gráfico de pontos dos de fração mássica de combustível. Desenhado em Z

## L Peças imprimidas em 3D

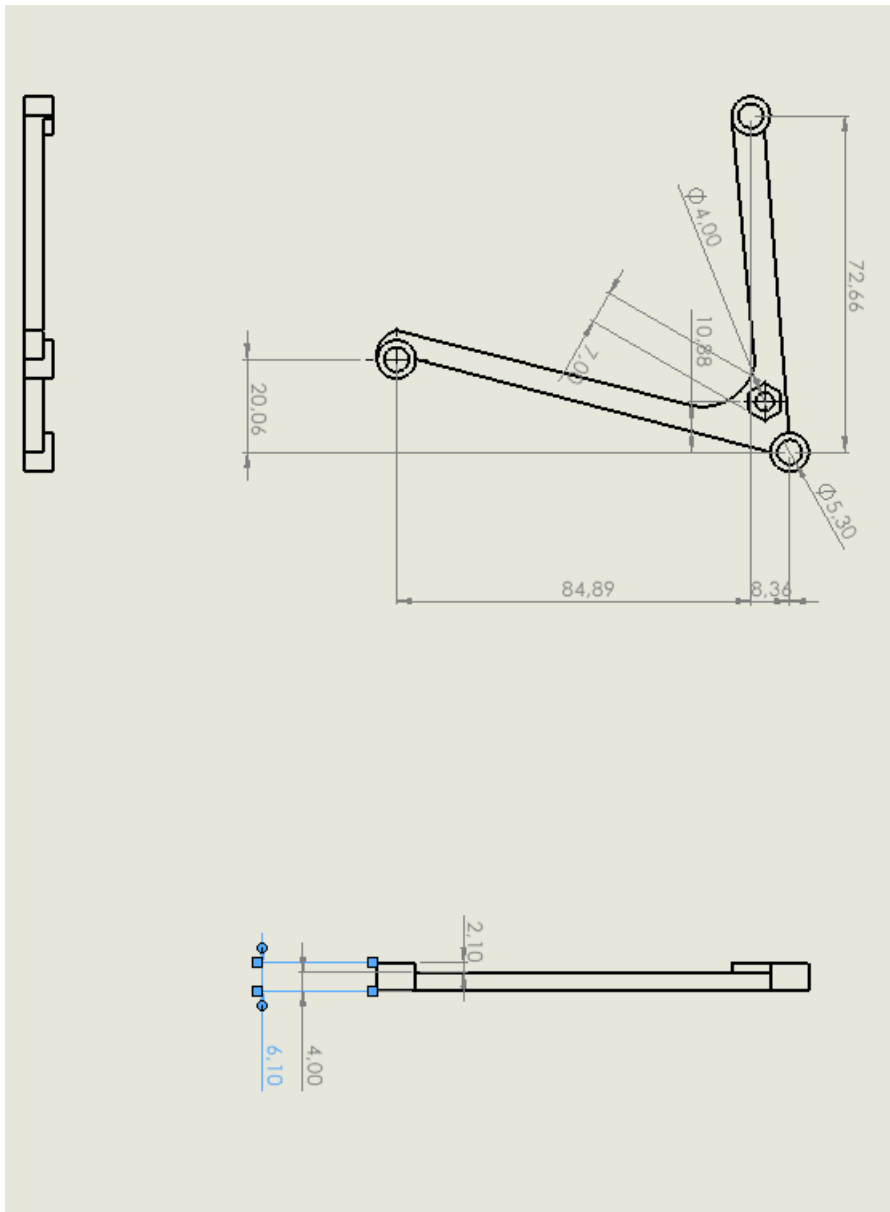


Figura 121: Três vistas ortogonais da peça de União entre a conduta e o motor.

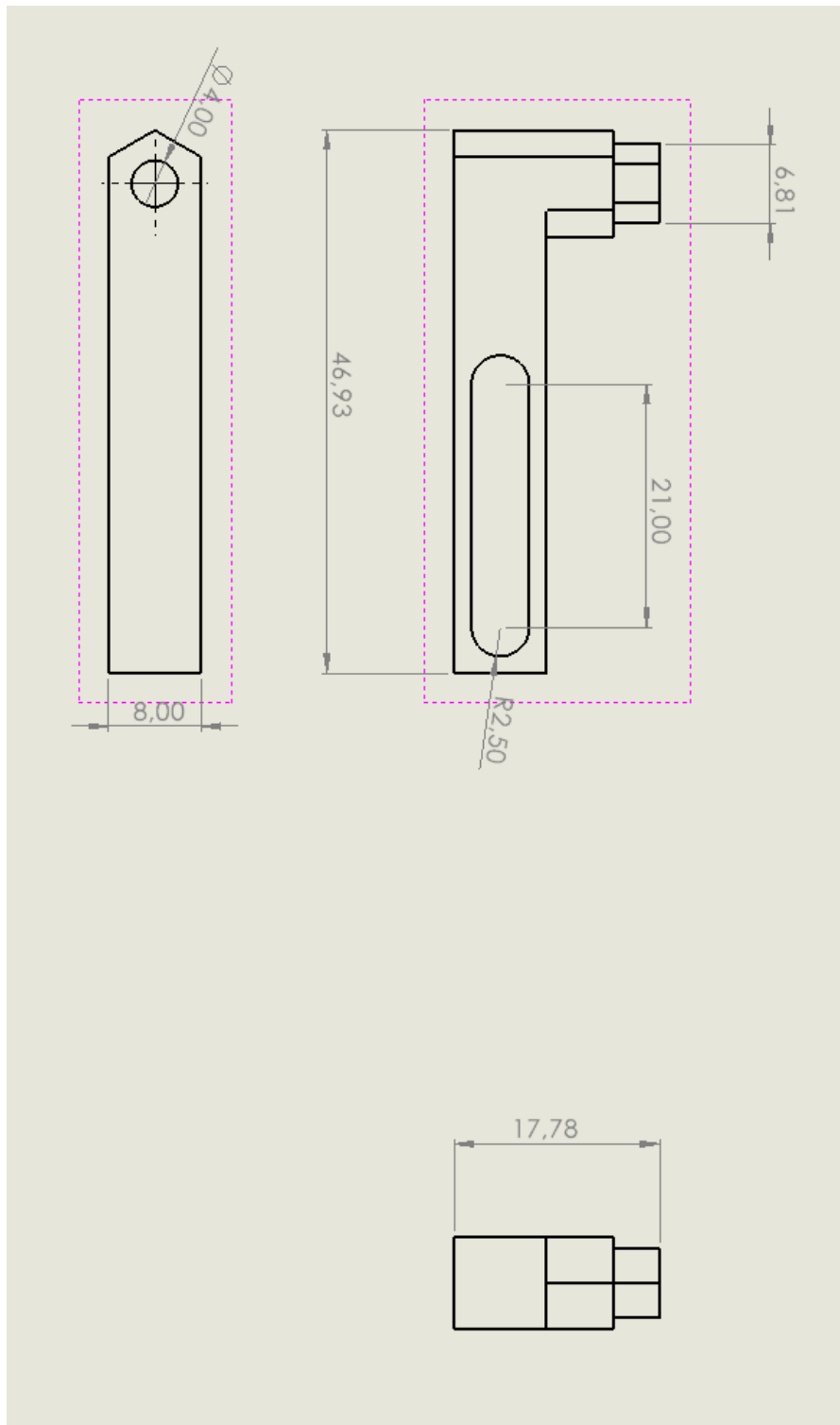


Figura 122: Três vistas ortogonais da peça de Offset.

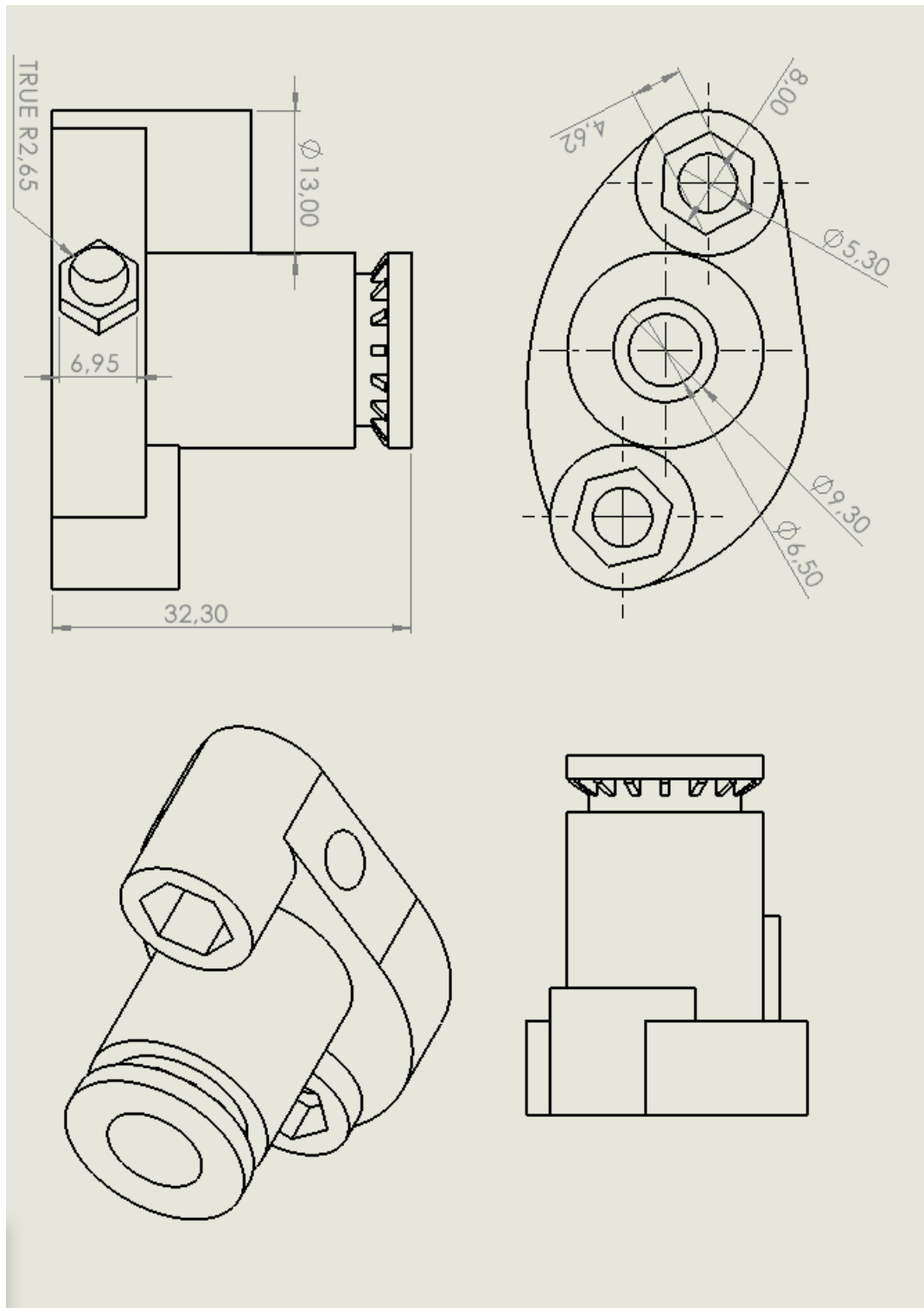


Figura 123: Três vistas ortogonais da peça da conduta de controlo

## M Programação Arduino

Na figura seguinte é possível ver o Arduino (Nano) usado e as ligações deste. Para a célula de carga foi necessário implementar um amplificador antes (circundado a vermelho). Por outro lado, também é necessário fazer um *Pull-up* do sensor Hall. No entanto, a componente usada já tinha este integrado pelo que não é possível observar isto na figura.

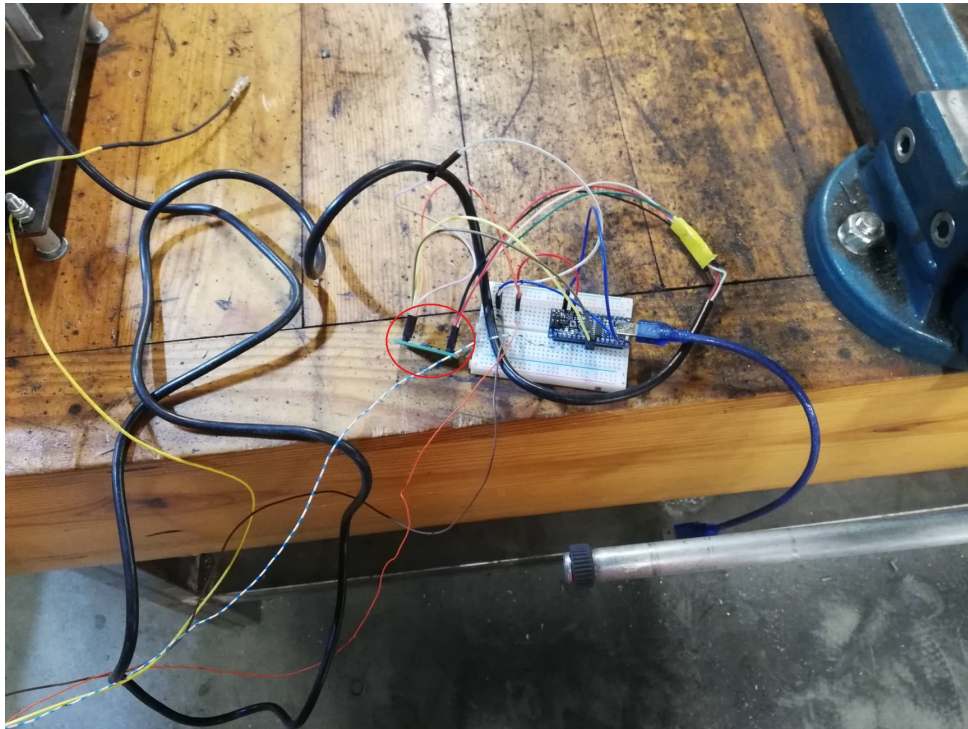


Figura 124: Ligações elétricas usadas no Arduino para testar

Código implementado:

```
#include <HX711.h >
HX711 scale;

const int CLK = 6;
const int DOUT = 5;
float weight;
float Calibration = 230;

// digital pin 2 is the hall pin
int hallpin = 2;
// set number of hall trips for RPM reading (higher improves accuracy)
float hallthresh = 15.0;
```

```
void setup() {
// initialize serial communication at 9600 bits per second:
Serial.begin(9600);
// make the hall pin an input:
pinMode(hallpin, INPUT);

scale.begin(DOUT, CLK);
scale.tare();
scale.set_scale(Calibration);
}

void loop() {
// preallocate values for task
float hallcount = 1.0;
float start = micros();
bool on_state = false;
// counting number of times the hall sensor is tripped
// but without double counting during the same trip
while(true){
    if(digitalRead(hallpin)==0){
        if (on_state==false){
            on_state = true;
            hallcount+=1.0;
        }
        else{
            on_state = false;
        }
    }

    if (hallcount;=hallthresh){
        break;
    }
}

// print information about Time and RPM
float endtime = micros();
float timepassed = ((endtime-start)/1000000.0);
float rpmval = (hallcount/timepassed)*60.0;
weight = scale.get_units();
weight=weight*0.001*0.035*9.81*(-1);

Serial.print(rpmval);
Serial.print(',');
Serial.println(weight); //Dados em N/m
delay(1); // delay in between readsfor stability
}
```