

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ALESSANDRO MORAIS MARTINS

**INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA NA ANÁLISE TÉRMICA
COMPUTACIONAL DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

Ilha Solteira
2015

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALESSANDRO MORAIS MARTINS

**INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA NA ANÁLISE
TÉRMICA COMPUTACIONAL DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Martins, Alessandro Moraes.

M386i Influência dos modelos de turbulência na análise térmica computacional de equipamentos eletrônicos / Alessandro Moraes Martins. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015

141 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2015

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini

Inclui bibliografia

1. Modelos de turbulência. 2. Simulação numéricas. 3. Análise térmica. 4. Componentes eletrônicos.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Influência dos modelos de turbulência na análise térmica computacional de equipamentos eletrônicos

AUTOR: ALESSANDRO MORAIS MARTINS

ORIENTADOR: Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica,
Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. THIAGO ANTONINI ALVES
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Data da realização: 23 de novembro de 2015.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio e Márcia, e à minha irmã, Marília, fontes permanentes de inspiração, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bênçãos diárias e por cuidar dos que amo.

Aos meus pais, Antônio e Márcia, certamente sem vocês nada disso seria possível. Obrigado pela educação, carinho, amor, dedicação, por sempre me apoiarem, pelos conselhos e por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos. Vocês são os melhores pais do mundo!

À minha maninha, Marília, pela amizade, conversas, brincadeiras e por ser essa irmã maravilhosa. Do nosso jeito a gente se entende e sem falarmos muito sabemos que podemos sempre contar um com o outro.

Aos meus amigos/irmãos, Alexandre e Thomazwisk, pela amizade que construímos durante esses anos, pela companhia para uma conversa, trilha, viagem, acampamento ou um simples sorvete na praça. Vocês literalmente fazem parte da minha família e me ajudaram muito nessa jornada. Depois a gente marca um churrasco pra comemorar!

À minha namorada, Carolina, por ser minha companheira e parceira, pelo carinho, atenção, intervalos cronometrados, pelas revisões, por me entender e motivar. Saiba que você me faz muito feliz.

Aos professores Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini e Prof. Dr. Marcio Antônio Bazani, por terem acreditado em mim, pela oportunidade, compreensão, paciência e pelos ensinamentos. Obrigado por me guiarem nesse trabalho.

Aos amigos e companheiros de laboratório, Alex, Guilherme, Jeferson, Natalie, Obata, Reginaldo e Thiago pelas dicas entre uma simulação e outra, pela companhia nas madrugadas no laboratório ou em um lanche da tarde na cantina. Vocês tornaram o trabalho mais suave e contribuíram bastante pra meu crescimento profissional.

Aos amigos de graduação, Mika, Poli, Jaque, Ita, Moita, João, Bina, Dê, Yane, Wilson, Gamarra e Bia, Robson e Tarcísio, carregue um pouco de cada um de vocês comigo e vou me lembrar com alegria de todos os momentos que vivemos. Muito

obrigado por tudo! Certamente vocês não são amigos apenas de faculdade, mas sim amigos para toda vida.

Aos técnicos dos laboratórios e aos demais funcionários da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, por todo apoio e ajuda durante esses anos.

À FEPISA, pelo suporte financeiro concedido nesta pesquisa.

Aos docentes da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, por transmitirem seus conhecimentos.

“Para aqueles que acreditam, nenhuma prova é necessária. Para aqueles que não acreditam, nenhuma prova é possível”.

Stuart Chase

RESUMO

Para que todos os equipamentos e componentes eletrônicos funcionem adequadamente é necessária uma eficiente troca de calor entre os elementos e o meio para evitar o superaquecimento. A princípio, utilizava-se a convecção natural como principal forma de dissipação de calor. No entanto, com a miniaturização dos componentes eletrônicos e o aumento da potência desses componentes houve a necessidade de aumentar o fluxo de ar para a dissipação de calor e deste modo passou-se a utilizar a convecção forçada para manter os equipamentos dentro das faixas de temperatura recomendadas. Logo, com o gradativo aumento das velocidades de fluxo geraram-se assim escoamentos cada vez mais turbulentos, que são um grande aliado quando se busca uma maior troca de calor. Com isso a proposta deste trabalho é apresentar um estudo dos fenômenos ocorridos em uma placa eletrônica submetida a um escoamento turbulento através de simulações numéricas e realizar um comparativo com resultado experimental existente na literatura. Visando analisar a influência de cada modelo de turbulência aplicado ao caso de estudo. Pois, observou-se que há uma grande dificuldade para quem trabalha com simulação numérica em definir qual modelo utilizar dentre os diversos modelos de turbulência e é nesse aspecto que esse trabalho se baseia, facilitar a escolha do modelo de turbulência e apontar qual modelo de turbulência descreve melhor o problema aqui proposto. Para isso, blocos aquecidos sobre uma placa eletrônica foram submetidos a escoamentos com velocidades variando entre 1m/s a 4m/s, por serem as mais utilizadas na indústria para este tipo de escoamento, e através do estudo e refinamento das malhas, das análises dos escoamentos, das velocidades e das distribuições de temperatura buscou-se verificar o modelo de turbulência que melhor descreve o problema aqui escolhido.

Palavras-chave: Modelos de turbulência. Simulação numéricas. Análise térmica. Componentes eletrônicos.

ABSTRACT

For all equipment and electronic components function, properly efficient heat exchange is required between the elements and the means to prevent overheating. At first, it was used natural convection as the primary form of heat dissipation. However, with the miniaturization of electronic components and the increasing power of these components was necessary to increase the air flow for heat dissipation and thus passed to using forced convection to maintain the equipment within the temperature ranges recommended. Then, with the gradual increase in flow velocities were thus generated flows increasingly turbulent, which are a great ally when seeking a larger heat exchange. Thus, the purpose of this paper is to present a study of the phenomena occurring on an electronic board subjected to turbulent flow through numerical simulations and perform a comparison with existing experimental result in the literature. To analyze the influence of each turbulence model applied to the case study. Therefore, it was observed that there is a great difficulty for anyone working with numerical simulation to define which model to use among the various models of turbulence and is in this respect that this work is based, to facilitate the choice of turbulence model and point out which turbulence model best describes the problem proposed here. To this end, heated blocks on an electronic board were subjected to flows with speeds ranging from 1m/s to 4m/s, being the most used in industry for this type of flow and through study and refinement of the meshes, the analysis of flows, speeds and temperature distributions sought to verify the turbulence model that best describes the problem here chosen.

Keywords: Turbulence models. Numerical simulation. Thermal analysis. Eletronic components.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motivo da falha em equipamentos eletrônicos	29
Figura 2 - Sub-bastidor de transporte óptico de alta capacidade	30
Figura 3 - Análise da viscosidade no escoamento próximo à parede.....	46
Figura 4 - Túnel de vento.....	49
Figura 5 - Componentes posicionados à placa.....	50
Figura 6 - Distâncias entre componentes e suas posições na placa (mm).....	51
Figura 7 - Diagrama esquemático de um dos componentes simulado	52
Figura 8 - Posição dos aquecedores e termopares dentro do invólucro de resina	52
Figura 9 - Detalhes do sensor de temperatura no centro do resistor.....	53
Figura 10 - Imagem do Resistor (A) e Fotografia infravermelha do resistor (B)	53
Figura 11 - Ordenação ao longo do escoamento dos fios na face inferior placa	54
Figura 12 - Saída dos fios da seção de testes do túnel.....	54
Figura 13 - (A) Placa posicionada na Seção de Testes. (B) Seção de testes com janela para câmera infravermelha	55
Figura 14 - Vista isométrica da réplica e posicionamento dos componentes	57
Figura 15 - Vista superior do arranjo de componentes	57
Figura 16 - Vista isométrica da placa posicionada dentro do túnel de vento	58
Figura 17 - Vista superior da réplica inserida no túnel de vento	58
Figura 18 - Exemplos de malhas Estruturada (a) e Não Estruturada (b).....	59
Figura 19 - Exemplo de uma curva de independência de malha.....	60
Figura 20 - Parte da planilha utilizada no processo de escolha da malha	62
Figura 21 - Elementos com baixa distorção (a) e com alta distorção (b).....	63
Figura 22 - Definição para alinhamento das faces	63
Figura 23 - Malhas obtidas a partir da primeira triagem de avaliação das malhas.....	64
Figura 24 - Malhas obtidas na última avaliação e a malha escolhida destacada	65
Figura 25 - Localização dos planos x, y e z utilizados na comparação das malhas.....	66
Figura 26 - Comparativo das malhas a partir do plano yz em $x=22,5\text{mm}$	67
Figura 27 - Comparativo das malhas a partir do plano xz em $y=2,5\text{mm}$	68
Figura 28 - Comparativo das malhas a partir do plano xy em $z=15\text{mm}$	69

Figura 29 - Curvas de convergência dos modelos de turbulência, fonte de 3W.....	70
Figura 30 - Curvas de convergência dos modelos de turbulência, fonte de 5W.....	70
Figura 31 - Curvas de convergência dos modelos de turbulência, fonte de 10W.....	71
Figura 32 - Domínio computacional com a malha (seção de teste).....	72
Figura 33 - Representação das fontes com a respectiva malha.....	72
Figura 34 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 10W	73
Figura 35 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 5W.....	73
Figura 36 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 3W.....	74
Figura 37 - Domínio computacional com malha (réplica inserida no túnel de vento).....	75
Figura 38 - Componentes cilíndricos inseridos no túnel com a respectiva malha	76
Figura 39 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 10W	76
Figura 40 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 5W	76
Figura 41 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 3W	77
Figura 42 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 10W.....	78
Figura 43 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 10W.....	79
Figura 44 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 5W.....	80
Figura 45 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 5W.....	81
Figura 46 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 3W.....	82
Figura 47 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 3W.....	83
Figura 48 - Detalhes dos principais pontos de leitura de temperaturas e velocidade para as análises numéricas para réplica inserida no túnel de vento.....	84
Figura 49 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para o bloco de 10W.....	85
Figura 50 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para o bloco de 5W.....	86

Figura 51 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para o bloco de 3W	86
Figura 52 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para a fonte de 10W	87
Figura 53 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para a fonte de 5W	87
Figura 54 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para a fonte de 3W	88
Figura 55 - Distribuição de temperatura, contornos no plano x, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	88
Figura 56 - Distribuição de temperatura, contornos no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	89
Figura 57 - Distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	89
Figura 58 - Distribuição de temperatura, contornos no plano z, com referência o bloco 5W, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	90
Figura 59 - Distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	90
Figura 60 - Distribuição de temperatura, contornos no plano z com referência o bloco 10W, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	91
Figura 61 - Distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero</i>	

	<i>equation, (b) Spalart-Allmaras, (c) Two equation, (d) RNG, (e) Realizable Two equation, (f) Enhanced RNG</i>	91
Figura 62	- Distribuição de velocidade, contornos no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	92
Figura 63	- Distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	92
Figura 64	- Distribuição de velocidade, contornos no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	93
Figura 65	- Distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	93
Figura 66	- Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	95
Figura 67	- Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	96
Figura 68	- Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	96

Figura 69 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	97
Figura 70 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	97
Figura 71 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	98
Figura 72 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 1m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	98
Figura 73 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	100
Figura 74 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	100
Figura 75 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	101
Figura 76 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com	

<p>velocidade de 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	101
<p>Figura 77 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	102
<p>Figura 78 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	102
<p>Figura 79 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 1,5m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	103
<p>Figura 80 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	104
<p>Figura 81 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	105
<p>Figura 82 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i>, (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i>, (f) <i>Enhanced RNG</i></p>	105
<p>Figura 83 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) <i>Zero equation</i>, (b) Spalart-Allmaras, (c)</p>	

	<i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	106
Figura 84	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 2m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	106
Figura 85	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 2m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	107
Figura 86	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 2m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	107
Figura 87	- Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	109
Figura 88	- Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	109
Figura 89	- Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	110
Figura 90	- Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	110

- Figura 91** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 111
- Figura 92** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 111
- Figura 93** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 112
- Figura 94** - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 113
- Figura 95** - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 114
- Figura 96** - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 114
- Figura 97** - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 115
- Figura 98** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 3m/s

	- (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	115
Figura 99	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 3m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	116
Figura 100	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	116
Figura 101	- Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	118
Figura 102	- Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	118
Figura 103	- Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	119
Figura 104	- Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	119
Figura 105	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 3,5m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) Spalart-Allmaras, (c) <i>Two equation</i> , (d) RNG, (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	120

- Figura 106** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 120
- Figura 107** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 121
- Figura 108** - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 122
- Figura 109** - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 123
- Figura 110** - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 123
- Figura 111** - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 124
- Figura 112** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) Spalart-Allmaras, (c) *Two equation*, (d) RNG, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG* 124
- Figura 113** - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a

	4m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) <i>Spalart-Allmaras</i> , (c) <i>Two equation</i> , (d) <i>RNG</i> , (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	125
Figura 114	- Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 4m/s - (a) <i>Zero equation</i> , (b) <i>Spalart-Allmaras</i> , (c) <i>Two equation</i> , (d) <i>RNG</i> , (e) <i>Realizable Two equation</i> , (f) <i>Enhanced RNG</i>	125
Figura 115	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 1m/s	126
Figura 116	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 1,5m/s	127
Figura 117	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 2m/s	127
Figura 118	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 2,5m/s	128
Figura 119	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 3m/s	128
Figura 120	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 3,5m/s	129
Figura 121	- Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e as obtidas experimentalmente (Texp), do túnel submetido a uma velocidade de 4m/s	129
Figura 122	- Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e experimentais (Texp) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento 10W	130
Figura 123	- Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (Tnum) e experimentais (Texp) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento 5W	131

Figura 124 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento 3W	131
Figura 125 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento, fonte10W	132
Figura 126 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento, fonte5W	132
Figura 127 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento, fonte3W	133
Figura 128 - Comparativo dos tempos de simulação do túnel submetido a uma faixa de velocidades de 1m/s a 4m/s	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos componentes da réplica térmica (mm)	51
Tabela 2 - Quantidade de elementos em cada malha	66
Tabela 3 - Parâmetros quantitativos e qualitativos da malha escolhida.....	71
Tabela 4 - Dados da malha para o caso da réplica inserida no túnel de vento.....	75
Tabela 5 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 10W.....	78
Tabela 6 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 10W	79
Tabela 7 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 5W	80
Tabela 8 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 5W	81
Tabela 9 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 3W	82
Tabela 10 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 3W	83
Tabela 11 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a uma velocidade de 3m/s, com diferentes modelos de turbulência	85
Tabela 12 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 1m/s, com diferentes modelos de turbulência	94
Tabela 13 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 1m/s.....	95
Tabela 14 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 1,5 m/s, com diferentes modelos de turbulência	99
Tabela 15 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 1,5m/s.....	99
Tabela 16 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 2 m/s, com diferentes modelos de turbulência	103
Tabela 17 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 2m/s.....	104

Tabela 18 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 2,5m/s, com diferentes modelos de turbulência	108
Tabela 19 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 2,5m/s.....	108
Tabela 20 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 3m/s, com diferentes modelos de turbulência	112
Tabela 21 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 3m/s.....	113
Tabela 22 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 3,5m/s, com diferentes modelos de turbulência	117
Tabela 23 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 3,5m/s.....	117
Tabela 24 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 4m/s, com diferentes modelos de turbulência	121
Tabela 25 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 4m/s.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A_0	Constante de fechamento do modelo k - ε realizável
A_s	Função usada no fechamento do modelo k - ε realizável
C_{b1}, C_{b2}	Constantes de fechamento do modelo Spalart-Allmaras
C_{prod}	Constante de fechamento do modelo Spalart-Allmaras
$C_{\varepsilon1}, C_{\varepsilon2}, C_{\varepsilon3}$	Constantes utilizadas na equação de dissipação de energia turbulenta
$\tilde{C}_{\varepsilon2}$	Constante modificada da equação de dissipação de energia turbulenta
C_μ	Constante utilizada no cálculo da viscosidade turbulenta
C_{v1}	Constante de fechamento do modelo Spalart-Allmaras
C_{w1}, C_{w2}, C_{w3}	Constante de fechamento do modelo Spalart-Allmaras
E	Energia total
G_k	Produção de energia cinética turbulenta
G_v	Produção de viscosidade turbulenta
G_b	Geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade
I	Tensor unitário
Pr	Número de Prandtl
Pr_t	Número de Prandtl turbulento
R	Constante universal dos gases
Re	Número de Reynolds
S	Módulo do tensor taxa de deformação médio; Termo fonte; Medida escalar do tensor deformação
\tilde{S}	Medida escalar usada no modelo Spalart-Allmaras e k - ε <i>Realizable</i>
S_h	Termo fonte da equação de energia
\bar{S}_{ij}	Tensor taxa de deformação médio
T	Temperatura
U^*	Velocidade média adimensional usada em leis de parede; medida escalar usada no modelo k - ε <i>Realizable</i>
Y_v	Destruição de viscosidade turbulenta

Letras romanas minúsculas

c_p	Calor específico à pressão constante
d	Distância da parede
f_w	Função usada na destruição da viscosidade - modelo Spalart-Allmaras
f_{v1}	Função de dissipação viscosa do modelo Spalart-Allmaras
f_{v2}	Função usada na produção de viscosidade do modelo Spalart-Allmaras
\vec{g}	Gravidade
g	Função usada na destruição da viscosidade - modelo Spalart-Allmaras
h	Entalpia
k	Energia cinética turbulenta; condutibilidade térmica
k_t	Condutibilidade turbulenta
l	Comprimento; comprimento de escala
p	Pressão
r	Função usada na destruição da viscosidade do modelo Spalart-Allmaras
t	Tempo
\bar{u}	Velocidade ou grandeza média
\bar{u}_i	Componente de velocidade média
u'_i	Componente flutuante da velocidade ou grandeza do escoamento
\vec{u}	Vetor velocidade

Letras gregas maiúsculas

Ω	Magnitude de vorticidade
Ω_{ij}	Tensor taxa de rotação do campo de velocidades
$\bar{\Omega}_{ij}$	Tensor taxa de rotação médio
$\hat{\Omega}_{ij}$	Tensor taxa de rotação médio modificado
$\tilde{\Omega}_{ij}$	Tensor taxa de rotação médio modificado usado no modelo $k-\varepsilon$ realizável

Letras gregas minúsculas

α_k	Constante do número de Prandtl eficaz inverso para k
α_ε	Constante do número de Prandtl eficaz inverso para ε
β	Coefficiente de expansão térmica
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
ε_{ijk}	Tensor de permutação
η	Função usada para fechamento modelo k - ε realizável
κ	Constante de Von Kármán
μ	Viscosidade dinâmica molecular
μ_{eff}	Viscosidade dinâmica efetiva
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta
ν	Viscosidade cinemática molecular
$\tilde{\nu}$	Viscosidade cinemática turbulenta modificada
ρ	Massa específica
σ_{ij}	Tensor das tensões devido á viscosidade molecular
$\sigma_{\tilde{\nu}}$	Constante de fechamento do modelo Spalart-Allmaras
σ_k	Constante de fechamento; Constante utilizada na equação de energia cinética turbulenta
σ_ε	Constante de fechamento; constante utilizada na equação da dissipação da energia cinética turbulenta
τ_{ij}	Tensor das tensões cisalhantes turbulentas
$\bar{\tau}$	Tensor viscoso
φ	Função usada para fechamento do modelo k - ε realizável

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS E A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	28
1.2	TURBULÊNCIA.....	30
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
1.4	OBJETIVOS DO TRABALHO	34
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	35
2	MODELAGEM MATEMÁTICA	36
2.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	36
2.1.1	Equação de conservação de massa	36
2.1.2	Equação da quantidade de movimento	36
2.1.3	Equações da conservação da energia	37
2.1.4	Modelagem da turbulência	37
2.1.5	Modelos da turbulência	39
2.1.5.1	<i>Modelo de turbulência de zero equação (Zero equation)</i>	40
2.1.5.2	<i>Modelo de Turbulência de uma equação: spalart-allmaras</i>	40
2.1.5.3	<i>Modelo de turbulência de duas equações: k-épsilon padrão</i>	42
2.1.5.4	<i>Modelo de turbulência de duas equações: k-épsilon RNG</i>	43
2.1.5.5	<i>Modelo de turbulência de duas equações: enhanced RNG</i>	45
2.1.5.6	<i>Modelo de turbulência de duas equações: realizable</i>	46
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL	49
3.1	TÚNEL DE VENTO	49
3.2	RÉPLICA TÉRMICA.....	50
4	ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL	56
4.1	SOFTWARE	56
4.2	GEOMETRIA.....	56
4.2.1	Placa sem o túnel de vento	57
4.2.2	Placa sem o túnel de vento	58
4.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	58
4.4	TEORIA DE MALHAS	59
4.4.1	Seleção e independência da malha	61
5	RESULTADOS	66
5.1	ETAPA DE REALIZAÇÃO DAS MALHAS.....	66

5.1.1	Seleção e independência da malha	74
5.2	RÉPLICA.....	77
5.3	RESULTADOS NUMÉRICOS	84
5.3.1	Comparação entre os resultados numéricos e experimentais	85
5.3.2	Comparativo dos modelos de turbulência à diferentes velocidades.....	94
5.3.2.1	<i>Velocidade de 1,0m/s.....</i>	94
5.3.2.2	<i>Velocidade de 1,5m/s.....</i>	99
5.3.2.3	<i>Velocidade de 2,0m/s.....</i>	103
5.3.2.4	<i>Velocidade de 2,5m/s.....</i>	108
5.3.2.5	<i>Velocidade de 3,0m/s.....</i>	112
5.3.2.6	<i>Velocidade de 3,5m/s.....</i>	117
5.3.2.7	<i>Velocidade de 4,0m/s.....</i>	121
5.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	126
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	135
6.1	CONCLUSÕES	135
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
	REFERÊNCIAS.....	137

1 INTRODUÇÃO

1.1 EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS E A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Hoje é muito comum a utilização de equipamentos eletrônicos no dia a dia. Da tarefa mais simples até a mais complexa é muito difícil encontrar alguma atividade que não dependa, direta ou indiretamente, dos dispositivos eletrônicos. Atualmente são bilhões de pessoas no mundo dependentes dessas tecnologias, o que indica que esse setor irá crescer bastante com o passar dos anos.

Com a globalização é incrível observar a rapidez com que as informações são difundidas. Com isso empresas em todo o mundo estão cada vez mais em busca de equipamentos eletrônicos de alto desempenho. Seja para facilitar a comunicação, com diversas partes do mundo, ou para aumentar sua produção industrial. Assim para que isso seja possível é necessário possuir máquinas mais eficientes, robustas e velozes.

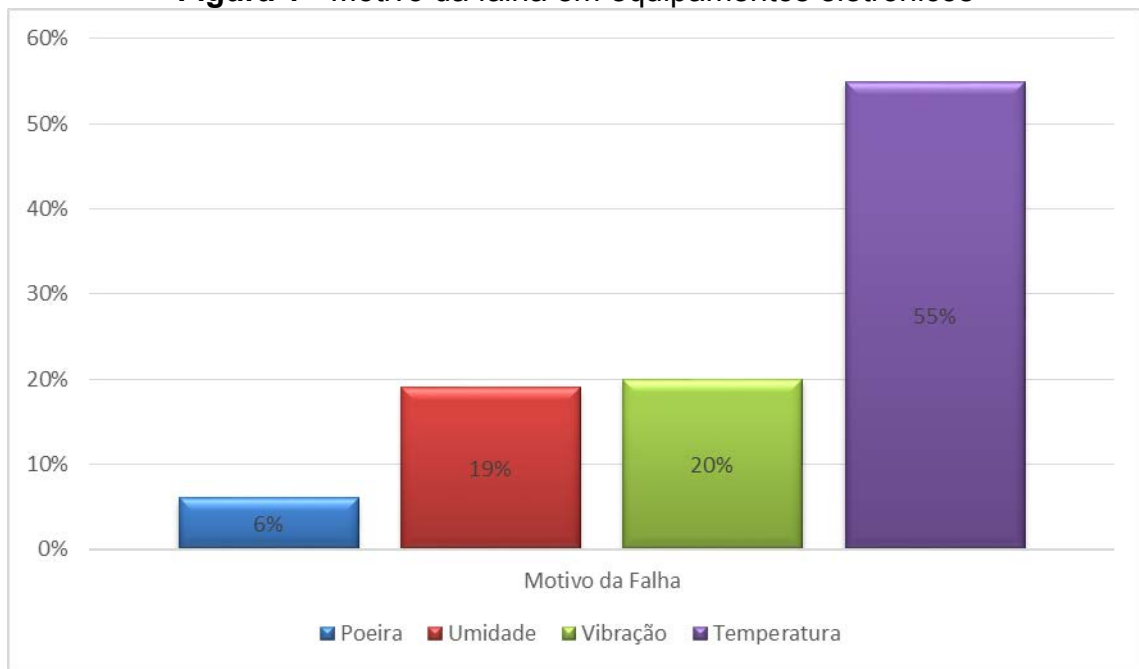
De tal modo essa crescente demanda do mercado promove o desenvolvimento tecnológico de equipamentos mais eficientes e compactos. Fábricas, em todo mundo, investem na criação de equipamentos que atendam tais expectativas. No entanto, como em qualquer desenvolvimento tecnológico, existem entraves que dificultam sua evolução e, nesse caso, o entrave encontrado é o aquecimento dos componentes eletrônicos. Esse fator influencia o funcionamento, o desempenho dos equipamentos, sua confiabilidade e vida útil.

A remoção do calor gerado por um dispositivo eletrônico, de modo que as condições de funcionamento do ponto de vista térmico sejam satisfeitas, tem sido um grande problema. O desempenho elétrico da maioria dos componentes começa a se degradar quando a temperatura da junção fica acima de 150°C diminuindo os ganhos do dispositivo e a eficiência de velocidade de processamento. Além disso, um aumento na temperatura gera uma drástica aceleração da fadiga térmica reduzindo sua vida útil, chegando a níveis em que o equipamento funcionará por metade do tempo pelo qual foi projetado (CUNHA, 2014).

Segundo Ramsey et al. (2004) a temperatura é responsável por mais da metade das falhas que ocorrem em dispositivos elétricos como pode ser visto na Figura 1, o que leva a conclusão de que o inadequado gerenciamento térmico pode

levar o equipamento a um risco iminente de falha. Organizações, tais como NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), estimam que entre 50 e 90, em porcentagem, das falhas podem ser atribuídas a problemas induzidos ou diretamente relacionados à dissipação térmica.

Figura 1 - Motivo da falha em equipamentos eletrônicos



Fonte: Adaptado de Ramsey (2004).

Sempre que um equipamento não é adequadamente refrigerado, sua temperatura interna, assim como de componentes específicos, irão gradativamente aumentar e se este aumento for maior que o suportado o equipamento pode deixar de funcionar ou até mesmo se incendiar. Portanto, o maior causador de defeitos em dispositivos microeletrônicos é o superaquecimento.

No trabalho com bastidores para telecomunicação (Figura 2), por exemplo, para que todos os equipamentos e componentes eletrônicos funcionem adequadamente é necessária uma eficiente troca de calor entre os elementos e o meio para evitar o superaquecimento. Portanto, quando se estuda a dissipação de calor nos componentes eletrônicos se utiliza o escoamento de ar, geralmente ventiladores, para diminuir a temperatura, no entanto, à medida que a temperatura aumenta é necessário aumentar também o escoamento e, por conseguinte, geram-se assim escoamentos cada vez mais turbulentos. Assim a turbulência se torna uma grande aliada quando se busca uma maior troca de calor.

Figura 2 - Sub-bastidor de transporte óptico de alta capacidade



Fonte: Padtec (2014).

1.2 TURBULÊNCIA

A maioria dos escoamentos encontrados na natureza é turbulento. Esses escoamentos podem ser encontrados em diversas áreas de estudo: Meteorologia, Aeronáutica, Engenharia Civil, Nuclear, Oceanografia e dentre outras áreas da ciência.

Leonardo da Vinci certamente foi um precursor de muitos conceitos em mecânica dos fluidos, deixando diversas contribuições. Da Vinci foi o primeiro a fazer uma afirmação quantitativa sobre a equação da continuidade. Em suas notas e desenhos reconheceu padrões de escoamentos turbulentos, regiões de escoamentos separados, recirculantes e esteiras. Além de introduzir o princípio do túnel de vento e o conceito de formas aerodinâmicas para reduzir o arrasto (SILVA FREIRE, 2002).

Séculos depois Osborne Reynolds já falava de escoamentos sinuosos, enquanto Boussinesq nomeava de escoamento turbilhante e tumultuado. Mas o primeiro a utilizar a expressão “regime turbulento” foi Boulangier (1909) em um tratado de trabalhos hidráulicos. Euler a essa altura já tinha o conhecimento da influência da viscosidade e da parede como causa do aparecimento dos escoamentos turbulentos. Contudo, foi Boussinesq o primeiro a quantificar a turbulência (SILVA FREIRE, 2002)

Esses foram os primeiros passos para o que chamamos hoje de turbulência e diversos nomes de cientistas podem ser citados: Galilei, Descartes, Newton, Bernoulli, Navier, Stokes, Saint-Venant, Reynolds, Prandtl, Von Kármán, Kolmogorov, Rayleigh entre outros. Todos esses nomes ofereceram importantes contribuições ao tema.

Os pesquisadores do passado deixaram suas contribuições com um embasamento físico e matemático bem estabelecido. No entanto, as equações que regem o estudo dos escoamentos turbulentos são bastante complexas. Sua complexidade consiste na utilização do modelo matemático baseado nas equações de momento e de continuidade. Além de ter associado ao sistema as condições iniciais e de contorno que geram uma grande dificuldade para se alcançar a solução completa do problema (ARAÚJO, 2012)

Dessa forma, com o advento da informática os pesquisadores voltaram seus esforços para o desenvolvimento de técnicas de simulação numérica com o intuito de obter aproximações em suas soluções matemáticas e assim poder descrever a turbulência.

No entanto, quando se depara com esse tipo de problema se esbarra também na falta de informações referentes à que tipo de modelo de turbulência utilizar e em qual seria o modelo mais adequado para o *layout* estudado. É uma grande dificuldade para quem trabalha com simulação numérica definir qual modelo utilizar dentre os diversos modelos de turbulência e é nesse aspecto que esse trabalho se baseia, facilitar a escolha do modelo de turbulência e apontar o que melhor descreve o problema aqui proposto.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma breve apresentação da revisão bibliográfica dos principais trabalhos existentes na literatura e as suas respectivas contribuições são apresentadas a seguir.

A turbulência é um fenômeno que acontece muito comumente na natureza e por este motivo é pesquisada por vários séculos tendo como principal motivação três fatores: a maioria dos escoamentos são turbulentos, a importância prática do transporte e mistura de matéria e pela capacidade da turbulência aumentar muito a taxa desses processos. (POPE, 2000)

Abrunhosa (2003) investigou o problema de fechamento e modelagem da turbulência ao estudar as duas principais linhas de modelagem em uso: a modelagem estatística clássica (média de Reynolds) e a modelagem de submalha, conhecida também como simulação de grandes escalas. Primeiramente averiguou os modelos de turbulência baseados na média de Reynolds através da solução de escoamentos complexos, dando atenção principalmente para os modelos de duas equações $k-\varepsilon$ incluindo também o modelo renormalizado RNG (Renormalisation Group). Analisou os vários termos da equação da energia cinética turbulenta na região da parede e em especial o termo de difusão de pressão, o qual também foi avaliado para as regiões de recirculação. Posteriormente analisou a capacidade de previsão da metodologia de simulação de grandes escalas LES (Large Eddy Simulation) e o desempenho do modelo de Smagorinsky para prever escoamentos limitados por fronteiras sólidas.

Velayati e Yaghoubi (2005) variaram o número de Reynolds, a altura do canal e dos blocos e analisaram numericamente o escoamento turbulento e a transferência de calor sobre eles a fim de verificar os efeitos desses parâmetros: a posição de recolamento da camada limite, o campo de velocidade, distribuição de temperatura e número de Nusselt das superfícies dos blocos. Para a análise numérica utilizaram o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG e validaram os resultados com medições experimentais. E obtiveram uma boa concordância entre os resultados. Em suas conclusões apresentam uma correlação para o coeficiente de transferência de calor sobre a superfície dos blocos. E concluíram também que na região próxima ao recolamento da camada limite existem maiores valores de transferência de calor.

Ratnam e Vengadesan (2008) fizeram um estudo de um escoamento incompressível com fluxo turbulento totalmente desenvolvido sobre um cubo aquecido. Sendo que o principal objetivo desse estudo era descobrir o modelo de turbulência de duas equações que seria adequado para uma estrutura complexa de escoamento que envolvesse recirculação, separação e recolamento da camada limite. Cada um dos modelos analisados tiveram melhores previsões em regiões distintas. Mas, de uma maneira geral, observou-se que a os vórtices em torno do cubo provocaram grande variação no coeficiente de transferência convectiva local. Atingindo o seu valor mínimo nas regiões de recirculação e o seu valor máximo próximo à região de recolamento da camada limite.

Pereira (2010) estudou computacionalmente os escoamentos turbulentos em torno de cilindros circulares e quadrados com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva de alguns modelos de turbulência do tipo RANS: $k-\varepsilon$ padrão, RNG, $k-\omega$, Spalart-Allmaras e SST. Nas simulações em torno de cilindros quadrados para número de Reynolds de 20.000 obteve valores bem próximos aos comparados experimentalmente utilizando o modelo RNG, visto que esse amplifica os efeitos de menor escala e possui melhores resultados para esse tipo de escoamento, comparado com os outros modelos analisados. No entanto, para o escoamento turbulento em torno de um cilindro circular, em comparação com a literatura, os modelos não apresentaram resultados satisfatórios. Em relação a esse mesmo escoamento com um número de Reynolds mais baixo, em torno de 10.000, novamente o modelo $k-\varepsilon$ RNG apresentou os melhores resultados, sendo considerado o mais confiável e preciso para esse tipo de escoamento.

Jeonghyung Park et al. (2011) mostraram em seu estudo que a qualidade da malha influencia diretamente no resultado e é relevante na convergência e precisão dos resultados. No entanto, sabe-se que com o refinamento maior da malha o custo computacional é aumentado. Nos processos de otimização é possível observar claramente uma melhora na qualidade da malha, no entanto, a convergência com esse método é bem mais lenta. Apresentaram um esquema para utilização no processo de otimização da malha que consiste em alternar a utilização da qualidade da malha original imprecisa com uma mais eficiente em iterações, de modo a diminuir o tempo de convergência, ao passo que a solução do problema original de malha melhora a qualidade. Com essa solução, que se revelou melhor para

velocidades mais altas, conseguiu-se uma melhoria da qualidade da malha em até 55, em porcentagem, comparado com o procedimento de otimização.

Lim et al. (2011) fizeram o estudo comparativo numérico e experimental do fluxo térmico em rotores de geradores de ímãs permanentes e apresentaram uma relevante revisão das técnicas de transferência de calor por convecção e ressaltaram a importância dos dados experimentais para um refinamento das simulações na busca de melhores soluções em simulações numéricas.

Araújo (2012) empregou os modelos de turbulência de RANS (Reynold-Averaged Navier-Stokes) de uma equação de Spalart-Allmaras e estudou o escoamento turbulento e incompressível em torno de uma placa fina, usando pequenos ângulos de incidência. Analisou também outros modelos de turbulência como o modelo SST k - ω (Shear-Stress Transport k - ω) e RSM (Reynolds Stress Model). Teve como seu principal objetivo comparar o desempenho numérico destes três modelos usando como base experimentos da literatura realizados com o uso de túneis de vento. Em seus resultados observou que os modelos Spalart-Allmaras e SST não apresentaram bons resultados, porém o modelo SST conseguiu prever estruturas complexas. Chegou então à conclusão que o modelo Spalart-Allmaras demandou um esforço computacional menor, obteve bons resultados para coeficientes de pressão sobre a placa, perfis de velocidade média e dentre os três modelos proporcionou as melhores previsões de comprimento de recolamento da camada limite, mas embora com boas previsões não conseguiu prever corretamente as grandezas turbulentas de segunda ordem e conseqüentemente não capturou a bolha de recirculação secundária tendo assim um resultado geral inferior ao modelo SST.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho visa agregar à literatura e contribuir com o entendimento dos fenômenos ocorridos em uma placa eletrônica submetida a um escoamento turbulento. Assim como verificar os efeitos da turbulência sobre esses componentes e mostrar uma análise da influência de cada modelo de turbulência aplicado ao problema proposto.

Para isso será realizada uma análise numérica e comparada com um resultado experimental da literatura. Nos casos analisados, a placa com os blocos

aquecidos dissipando energia térmica será submetida a um escoamento com velocidades variando entre 1m/s a 4m/s, referente a faixa de $6603 < Re < 26411$. E para cada uma dessas velocidades será analisada a influência dos modelos de turbulência nos resultados obtidos. Podendo assim verificar qual modelo será mais adequado para o problema escolhido.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além desse capítulo introdutório, o trabalho se divide em mais cinco capítulos. No Capítulo 2 é feita uma descrição analítica do problema apresentado e uma breve revisão dos conceitos matemáticos envolvidos na transferência de calor. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia experimental utilizada. No Capítulo 4 é mostrada a metodologia numérica empregada. No Capítulo 5 os resultados obtidos nas simulações numéricas e as comparações com os resultados experimentais são apresentados. Por fim, no Capítulo 6 são exibidas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros na área.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta seção tratará dos principais equacionamentos necessários para entendimento e solução do problema. Através das equações da continuidade, energia e de quantidade de movimento o escoamento de um fluido é modelado matematicamente

2.1.1 Equação de conservação de massa

A equação da continuidade, ou conservação de massa, é escrita na forma:

$$\frac{\rho}{t} \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

No qual ρ é a massa específica, t é o tempo e \vec{u} é o vetor velocidade.

2.1.2 Equação da quantidade de movimento

A equação da quantidade de movimento pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + S \quad (2)$$

Na qual p é a pressão estática, $\bar{\tau}$ é o tensor viscoso, $\rho \vec{g}$ é a força gravitacional e S são outras fontes que possam surgir.

Para o caso de fluido Newtoniano a equação da tensão viscosa ($\bar{\tau}$) pode ser expressa por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \quad (3)$$

Na qual μ é a viscosidade molecular e I é o tensor unitário.

2.1.3 Equações da conservação da energia

A equação da conservação de energia para uma região de fluido pode ser escrita em termos da entalpia h

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) = \nabla \cdot [(k + k_t)\nabla T] + S_h \quad (4)$$

Na qual k é a condutividade térmica, k_t é a condutividade devido ao transporte turbulento ($k_t = c_p \mu_t / Pr_t$) e o termo fonte S_h inclui quaisquer fontes de calor volumétrico que seja definida.

Na condução em regiões sólidas resolve-se uma simples equação de condução que inclui o fluxo de calor devido à condução e fontes de calor volumétrico dentro do sólido:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \quad (5)$$

Na qual ρ é a densidade, k é a condutividade, T é a temperatura e S_h é o termo fonte da equação da energia

A Equação 5 é resolvida simultaneamente com a equação de energia de transporte, Equação 4, na região do fluido para se obter a previsão completa de transferência de calor, condução e convecção associados.

2.1.4 Modelagem da turbulência

Embora informações sobre as menores escalas sejam importantes, em muitas situações uma descrição do escoamento médio é suficiente para prever situações práticas. Assim, sem resolver inteiramente o escoamento turbulento, existem algumas técnicas que podem retirar informações preciosas dele e se tornarem interessantes e importantes para aplicações industriais.

Uma dessas modelagens da turbulência é obtida através das equações médias de Reynolds, essas equações são obtidas através da decomposição das

incógnitas das equações originais em dois componentes: um componente médio e outro flutuante. Por exemplo, a velocidade em notação indicial é decomposta como:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (6)$$

Na qual \bar{u}_i é o componente de velocidade médio e u' é o componente flutuante.

Ao aplicar a decomposição de Reynolds a todas as quantidades do escoamento e utilizar o artifício de média sobre as equações resultantes, alcança-se então as equações para a descrição do movimento médio. Conhecida como equações de Navier-Stokes com média de Reynolds – RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

O artifício de média insere o termo $-\rho\overline{u'_i u'_j}$ que atua como tensão sobre o movimento médio resolvido e são os componentes do tensor de Reynolds:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u'_i u'_j} \quad (7)$$

No entanto, mesmo com a equação da continuidade e com as equações de Navier-Stokes não há um sistema fechado de equações. Sendo assim necessário elaborar alguma hipótese sobre as tensões de Reynolds para se obter o fechamento do problema.

Portanto, dentro das abordagens utilizadas para modelar as tensões de Reynolds, duas se destacam:

- Modelar a equação de transporte do tensor de Reynolds
- Modelos de viscosidade turbulenta

A primeira abordagem soluciona variantes mais simples do tensor de Reynolds, utilizando-se de *diversas hipóteses e aproximações. A segunda abordagem, modelos de viscosidade turbulenta, utiliza a tensão de Reynolds com uma função da viscosidade turbulenta e do tensor taxa de deformação do escoamento médio.

Um método comum emprega a hipótese de Boussinesq para relacionar a tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média:

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \quad (8)$$

Com o uso da hipótese de Boussinesq somente uma equação para a viscosidade turbulenta é inserida o que simplifica o problema de fechamento da turbulência, não sendo necessário assim calcular separadamente cada componente do tensor de Reynolds.

Os principais modelos de viscosidade turbulenta são os modelos de uma e duas equações diferenciais e os modelos algébricos.

Os modelos algébricos ou modelos de zero equação utilizam para o comprimento característico e velocidade apenas uma especificação algébrica que relacionam o fluxo médio e as propriedades geométricas.

Os modelos de uma equação resolvem somente uma equação diferencial que prediz o transporte de uma única escala turbulenta, usada comumente no cálculo da viscosidade turbulenta em conjunto com uma segunda escala que é resolvida utilizando-se relações algébricas. Nos modelos de duas equações a segunda escala de turbulência também é resolvida usando uma segunda equação diferencial parcial (REZENDE, 2009).

Para melhor exemplificar, a hipótese de *Boussinesq* é usada no modelo *Spalart-Allmaras* e os modelos *k*-épsilon. A vantagem desta abordagem é o custo computacional relativamente baixo associado ao cálculo da viscosidade turbulenta μ_t . No caso do modelo de *Spalart-Allmaras*, apenas uma equação de transporte adicional (representando viscosidade turbulenta) é resolvida. No caso dos modelos de *k*-épsilon, duas equações de transporte adicionais (para a energia cinética de turbulência, k , e para a taxa de dissipação de turbulência, ϵ) são resolvidas, e μ_t é calculado como uma função de k e ϵ .

2.1.5 Modelos da turbulência

Nos tópicos seguintes serão apresentadas a teoria e as equações clássicas para os 6 modelos de turbulência utilizados. Entre eles estão: o modelo de equação zero (*Zero equation*), o modelo de uma equação *Spalart-Allmaras*, o modelo de duas equações *k*-épsilon padrão, o modelo *k*-épsilon RNG (renormalizado), o modelo *k*-épsilon realizável (*k*-épsilon *Realizable*) e o modelo avançado *k*-épsilon RNG (*Enhanced k*-épsilon).

2.1.5.1 Modelo de turbulência de zero equação (Zero equation)

O modelo de Zero equação (*Zero equation*) é simples de implementar e usar, pode produzir resultados aproximados rapidamente e serve como uma boa estimativa inicial para simulações seguintes que farão uso de modelos de turbulência mais avançados, principalmente quando não se tem ideia da convergência do problema.

O modelo de comprimento de mistura *Zero equation*, também conhecido como modelo algébrico, para calcular a viscosidade turbulenta μ_t utiliza-se da seguinte relação:

$$\mu_t = \rho l^2 S \quad (9)$$

Na qual, o comprimento de mistura, l , é definido como:

$$l = \min(\kappa d, 0,09 d_{max}) \quad (10)$$

Sendo $\kappa = 0,419$ (constante von Kármán) e d é a distância entre a parede.

S é o módulo do tensor médio da taxa de deformação, definido como:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (11)$$

Com a média da taxa de deformação \bar{S}_{ij} dada pela equação:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

2.1.5.2 Modelo de Turbulência de uma equação: spalart-allmaras

O modelo Spalart-Allmaras foi criado com um enfoque maior para aplicações aeroespaciais. Principalmente para problemas de escoamentos nas regiões das paredes. Seus resultados nessas situações são excelentes, conseguindo alcançar bons resultados onde a camada limite é submetida a gradientes de pressão

adversos. O modelo Spalart-Allmaras é um modelo de uma equação, relativamente simples, que resolve uma equação diferencial parcial de transporte para a viscosidade turbulenta. Neste modelo a tensão de Reynolds não inclui seu último termo ($\frac{2}{3}k\delta$) que representa a flutuação da pressão e assim pode ser determinada pela expressão:

$$-\overline{u'u'} = \mu_t(\nabla\bar{u} + \nabla\bar{u})^T \quad (13)$$

Sendo a viscosidade turbulenta definida como:

$$\mu_t = \rho\tilde{\nu}f_{v1} \quad (14)$$

Na qual f_{v1} é uma função de amortecimento para a viscosidade, que permite representar de forma mais realista a região próxima à parede, dada por:

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \quad ; \quad \chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (15)$$

Na qual C_{v1} é uma constante empírica.

A equação de transporte para a variável auxiliar $\tilde{\nu}$ é dada por (DECK, 2002):

$$\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i\tilde{\nu})}{\partial x_j} = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right\} - Y_v \quad (16)$$

Na Equação 16, G_v é o termo de produção. Dacles-Mariani *et al.* (1995) combinam os efeitos dos tensores de rotação e de cisalhamento na definição da produção de μ_t , de forma a evitar a superestimativa da viscosidade turbulenta em regiões em que a vorticidade excede o cisalhamento. G_v é então baseado numa modificação da magnitude de vorticidade Ω de forma a manter as características da região logarítmica, na qual Ω_{ij} é o tensor taxa de rotação médio.

$$G_v = C_{b1}\rho\tilde{\Omega}\tilde{\nu} \quad ; \quad \tilde{\Omega} = \Omega + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} + C_{prod} \min(0, S - \Omega) \quad (17)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right); \quad \Omega = \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (18)$$

Aqui, d é a distância à parede, $C_{prod} = 2,0$, κ é a constante de Von Kármán e f_{v2} é uma fração de amortecimento, dada por:

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \quad (19)$$

O termo de destruição Y_v é dado por:

$$Y_v = C_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 \quad (20)$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6} \quad (21)$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r) \quad (22)$$

$$r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{\Omega} \kappa^2 d^2} \quad (23)$$

As constantes do modelo são (DECK *et al.*, 2002):

$$C_{b1} = 0,1355; C_{b2} = 0,622; C_{w2} = 0,3; C_{w3} = 2,0; C_{v1} = 7,1;$$

$$\sigma_{\tilde{v}} = 2/3; k = 0,41; C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}$$

2.1.5.3 Modelo de turbulência de duas equações: k -épsilon padrão

O modelo k - ε padrão é um modelo onde há duas equações de transporte. Uma equação para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ε).

Tornou-se carro-chefe de cálculos de escoamentos práticos de engenharia, desde que foi proposto por Lauder e Spalding. É um modelo com baixo custo computacional que contempla uma vasta quantidade de fenômenos, sendo assim implementado na grande maioria dos códigos de CFD. Isso explica seu uso frequente nas indústrias, tanto para escoamentos industriais quanto para simulações de transferência de calor (LAUNDER; SPALDING, 1972).

É um modelo que se baseia em considerações empíricas e fenomenológicas, sendo assim considerado um modelo semi-empírico.

No modelo k - ε padrão as duas equações, (k) e (ε), são modeladas pelas seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (24)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (25)$$

Na qual σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ e $C_{\varepsilon 3}$ são constantes. Os termos σ_k e σ_ε são, respectivamente, os números de Prandtl para a energia cinética turbulenta e para sua taxa de dissipação. Estes valores foram determinados a partir de experimentos com ar e água para escoamentos de cisalhamento turbulento incluindo escoamentos de cisalhamento homogêneos. E tem sido constatado que funcionam bem para uma vasta gama de escoamentos.

No modelo k - ε padrão, a viscosidade turbulenta é calculada através da energia cinética turbulenta e de sua taxa de dissipação:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (26)$$

Na qual C_μ é uma constante.

2.1.5.4 Modelo de turbulência de duas equações: k - ε RNG

Devido aos seus bons resultados o modelo k - ε padrão tornou-se um dos modelos mais empregado na indústria. No entanto, apesar de ser um modelo que

possui vários pontos fortes, algumas deficiências também foram encontradas. E em busca de aumentar o desempenho do modelo algumas melhorias foram feitas, dando origem ao modelo RNG k - ε .

O modelo RNG k - ε faz uso de uma técnica estatística chamada de Teoria de Renormalização de Grupo. O modelo RNG k - ε possui uma série de melhorias. Entre elas pode-se citar: a adição do efeito de vorticidade na turbulência, o que aumenta consideravelmente a precisão dos escoamentos com vórtices; e a implementação de um termo adicional na equação de dissipação de energia cinética turbulenta (ε), a fim de melhorar precisão em escoamentos com deformações bruscas (YAKHOT, 1986).

Com essas modificações adicionais, o modelo tornou-se mais confiável e preciso do que o modelo k - ε padrão, atendendo assim a uma maior gama de escoamentos.

O modelo de k - ε RNG tem uma forma semelhante ao modelo de k - ε padrão:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (27)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (28)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média. G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade, α_k e α_ε são constantes dos números de Prandtl eficazes inversos para k e ε , respectivamente.

A principal diferença entre os modelos de k - ε RNG e padrão situa-se no termo adicional na equação ε dado por:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (29)$$

Na qual $\eta \equiv Sk/\varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$.

Pode-se combinar a Equação (29) e os dois últimos termos da Equação (28), assim a equação ε resultante pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - \tilde{C}_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (30)$$

Na qual $\tilde{C}_{\varepsilon 2}$ é dado por :

$$\tilde{C}_{\varepsilon 2} \rho \equiv C_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (31)$$

Em regiões onde $\eta \ll \eta_0$ o termo R faz uma contribuição positiva, e $\tilde{C}_{\varepsilon 2}$ torna-se maior do que $C_{\varepsilon 2}$. Como resultado, para escoamentos levemente a moderadamente deformados, o modelo RNG tende a dar resultados largamente comparáveis com o modelo de k - ε padrão.

Em regiões de taxa de deformação grandes (η/η_0), no entanto, o termo R faz uma contribuição negativa, fazendo com que o valor de $\tilde{C}_{\varepsilon 2}$ inferior a $C_{\varepsilon 2}$. Em comparação com o modelo de k - ε , menor destruição de ε aumenta ε , reduzindo k e, eventualmente, a viscosidade eficaz. Como resultado, nos fluxos rapidamente deformáveis, o modelo RNG produz uma viscosidade turbulenta inferior do modelo k - ε padrão.

Assim, o modelo RNG é mais sensível aos efeitos da deformação rápida e de curvatura do que o modelo de k - ε padrão, o que explica o desempenho superior do modelo RNG para certas classes de escoamentos.

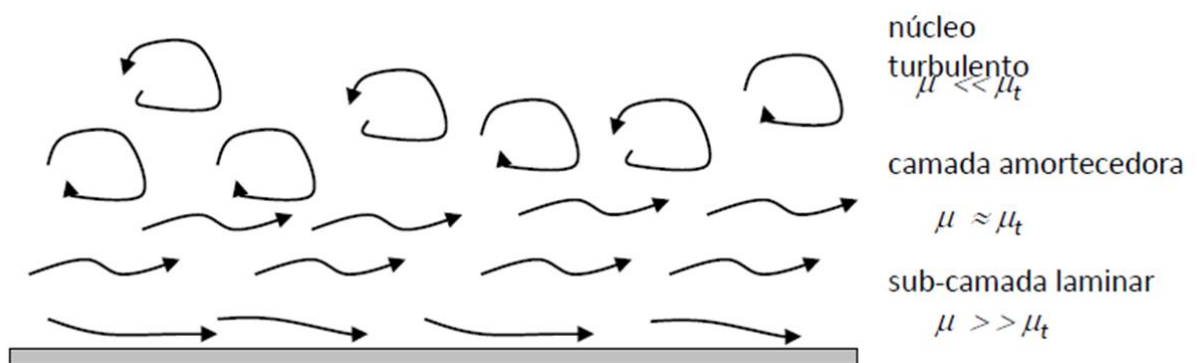
2.1.5.5 Modelo de turbulência de duas equações: enhanced RNG

Os modelos de duas equações k - ε , possuem bons resultados, principalmente, para escoamentos em regiões distantes da parede (centro/núcleo). No entanto, para se alcançar um resultado significado e previsões bem-sucedidas dos escoamentos turbulentos que represente melhor a realidade, a modelagem próxima da parede necessita de um cuidado particular. Principalmente se tratando de escoamentos turbulentos onde as paredes são as principais fontes de vorticidade, turbulência e onde se encontra um maior gradiente das variáveis da solução.

O modelo avançado RNG (*Enhanced* RNG) traz um melhor tratamento de parede com o intuito de resolver o escoamento próximo a parede com maior precisão. A modelagem do modelo *Enhanced* RNG próximo da parede, combina os três modelos $k-\varepsilon$ (padrão, RNG e realizável) com o modelo de duas camadas e uma função de parede avançada (WOLFSTEIN, 1969)

A região perto da parede pode ser dividida em três camadas. Na camada mais interna, a subcamada viscosa, o escoamento é praticamente laminar, e a viscosidade molecular desempenha papel dominante na quantidade de movimento e transferência de calor ou massa. Na camada externa, completamente turbulenta, a turbulência desempenha um papel importante. E por fim, existe a região de transição entre a subcamada viscosa e a camada completamente turbulenta onde os efeitos da viscosidade molecular e a turbulência são igualmente importantes.

Figura 3 - Análise da viscosidade no escoamento próximo à parede



Fonte: Nieckele (2014).

2.1.5.6 Modelo de turbulência de duas equações: *realizable*

O modelo $k-\varepsilon$ realizável é um modelo relativamente recente. O termo "realização" significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas sobre as tensões de Reynolds, de acordo com a física de escoamentos turbulentos.

Pode ser observado que em algumas situações o modelo $k-\varepsilon$ padrão pode apresentar inconsistências físicas e tornar-se "não realizável". Com o intuito de tornar o modelo $k-\varepsilon$ sempre realizável, determinadas modificações foram feitas no modelo padrão dando assim origem ao modelo $k-\varepsilon$ realizável.

Uma dessas alterações se refere a nova formulação da viscosidade turbulenta. Com relação ao cálculo da viscosidade turbulenta, mantém-se a mesma equação do modelo padrão,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (32)$$

No entanto, C_μ passa a não ser mais uma constante, variando em função da velocidade angular do sistema de referência, da taxa de deformação e de rotação e dos campos das variáveis turbulentas k e ε , como pode ser visto a seguir,

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (33)$$

Sendo que,

$$U^* \equiv \sqrt{\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (34)$$

Em que,

$$A_0 = 4,04; \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (35)$$

$$\varphi = \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (36)$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (37)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (38)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} \equiv \hat{\Omega}_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad ; \quad \hat{\Omega}_{ij} \quad \bar{\Omega}_{ij} \quad \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (39)$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ é um tensor de rotação médio visto em um sistema de referência rotativo com velocidade angular ω_k .

Outra alteração, conforme proposto por Shih et al. (1995), versa na alteração da equação da taxa de dissipação ε . A modificação consiste em eliminar o termo $C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$. Pois, quando a energia cinética turbulenta (k) tende a zero ocorre à singularidade, devido à presença de (k) no denominador da fração. Desta forma, tem-se que,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{u}_i\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1\rho\varepsilon S - C_2\rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + S_\varepsilon \quad (40)$$

Já a equação da energia cinética turbulenta (k) se mantém igual à do modelo k - ε padrão,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon \quad (41)$$

$$C_1 = \max \left[0,43 ; \frac{1}{+5} \right] \quad ; \quad = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (42)$$

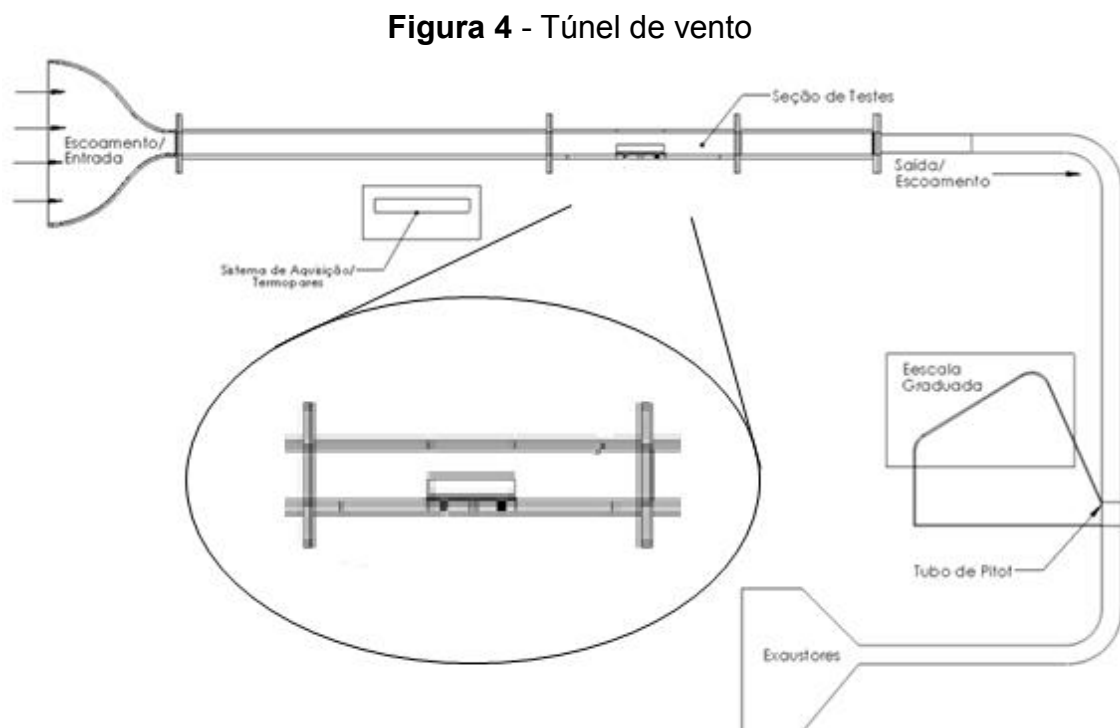
Terminada a apresentação das equações governantes e do equacionamento dos modelos de turbulência segue-se para o próximo capítulo onde será descrita a parte experimental do trabalho

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os equipamentos e a metodologia utilizados por (CUNHA, 2014) para a obtenção dos dados experimentais, que serão comparados aos resultados obtidos através das simulações computacionais.

3.1 TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento, Figura 4, utilizado neste trabalho foi o construído e instalado no Laboratório de Simulações Numéricas - LabSiN, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica - DEM da Unesp de Ilha Solteira. O túnel é composto de um plenum com proteção à entrada de particulado sólido; uma estrutura em colmeia, para auxiliar a entrada do escoamento; uma seção de desenvolvimento do escoamento, para garantir um escoamento completamente desenvolvido na entrada da seção de testes e uma seção de testes.



Fonte: Adaptado de Obata (2014).

As dimensões do túnel de vento são de 360 mm de largura, 60 mm de altura e 2220 mm de comprimento. O escoamento é criado através de sucção por um conjunto de três exaustores, podendo obter velocidades da ordem 4,5 m/s. O túnel

conta ainda com uma abertura revestida com material transparente à radiação infravermelha, utilizada para visualização através de câmeras térmicas, ou termovisores.

3.2 RÉPLICA TÉRMICA

A réplica experimental tem o intuito de simular uma placa de circuito impresso dissipando potência e assim ser utilizada para comparar os dados experimentais com os resultados obtidos na simulação numérica. A réplica utilizada refere-se ao trabalho de (CUNHA, 2014) e será descrita a seguir.

Os componentes estão dispostos da forma mostrada na Figura 5. Os componentes não aquecidos (1, 2, 3 e 4) são perfis de alumínio usinados e recebem a coloração preta para permitir a visualização da distribuição de temperatura em suas superfícies, através de câmera térmica por radiação infravermelha. Os componentes estão fixos com uma fina camada de pasta térmica em uma placa de fenolite, material utilizado em placas de circuito impresso, com condutividade térmica (k) constante de 0,33W/mK e a resina, por sua vez, possui uma condutividade térmica entre 0,27 a 0,32W/mK.

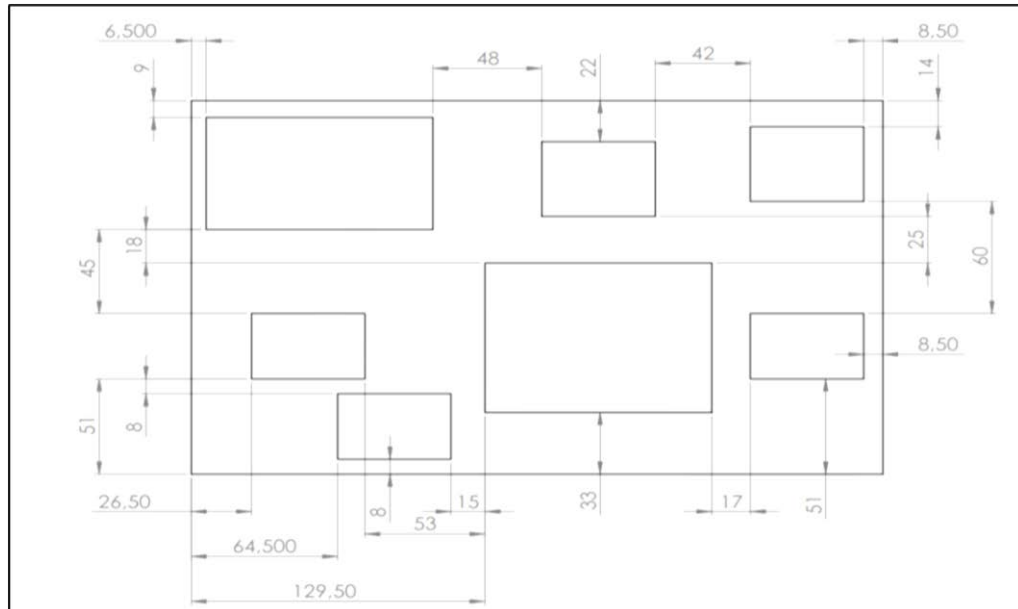
Figura 5 - Componentes posicionados à placa



Fonte: Adaptado de Cunha (2014).

A Figura 6 mostra o posicionamento dos componentes na placa, *layout* principal, com suas respectivas distâncias em milímetro.

Figura 6 - Distâncias entre componentes e suas posições na placa (mm)



Fonte: Cunha (2014).

A dimensão dos componentes e as potências dos blocos que dissipam calor estão descritos na Tabela 1.

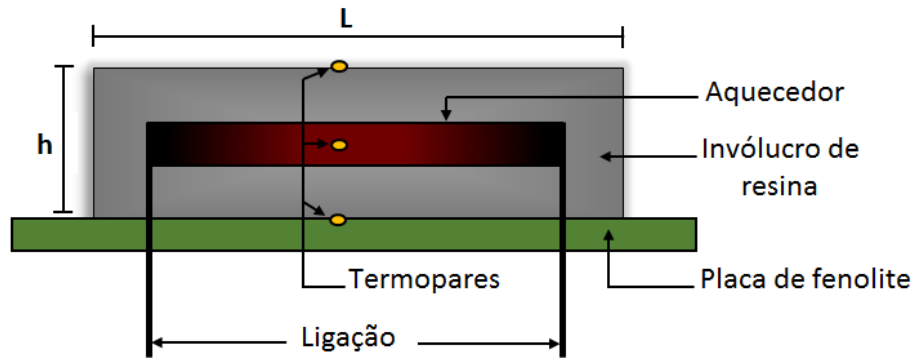
Tabela 1 - Características dos componentes da réplica térmica (mm)

COMPONENTE	COMPRIMENTO	ALTURA	LARGURA	POTÊNCIA	MATERIAL
A	50	20	35	5 W	Resina + Resistor
B	100	20	80	10 W	Resina + Resistor
C	50	20	40	3 W	Resina + Resistor
1	50	20	35	-	Alumínio
2	100	30	60	-	Alumínio
3	50	20	35	-	Alumínio
4	50	15	40	-	Alumínio
Placa	300	2	200	-	Fenolite

Fonte: Cunha (2014).

Os componentes aquecidos (A, B e C) tiveram suas temperaturas monitoradas no centro e nas superfícies inferior e superior, por meio de termopares, conforme diagrama presente na Figura 7.

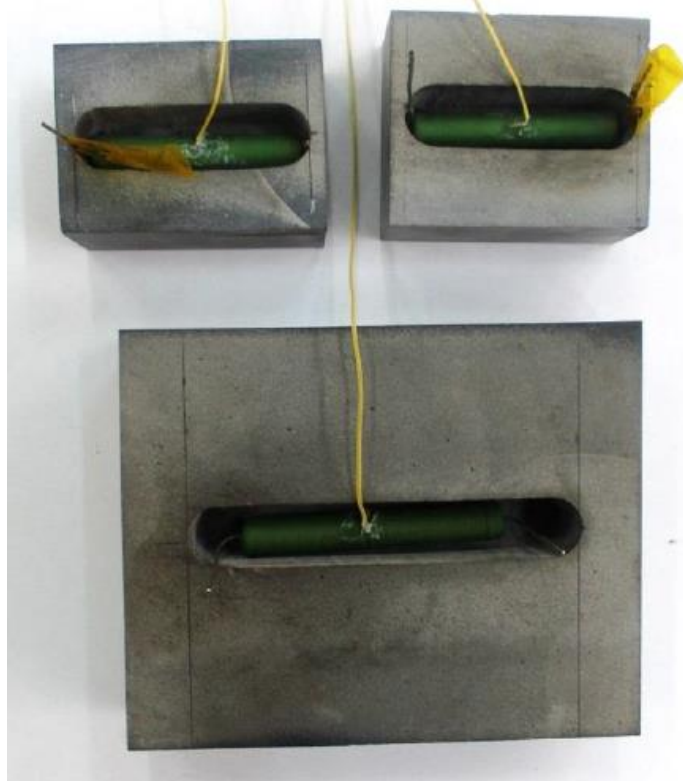
Figura 7 - Diagrama esquemático de um dos componentes simulado



Fonte: Cunha (2014).

A Figura 8 mostra a montagem dos aquecedores dentro do invólucro de resina. Pode-se observar os blocos perfurados e o posicionamento dos aquecedores. Observa-se também o posicionamento do termopar, fio amarelo, colocado na superfície do aquecedor.

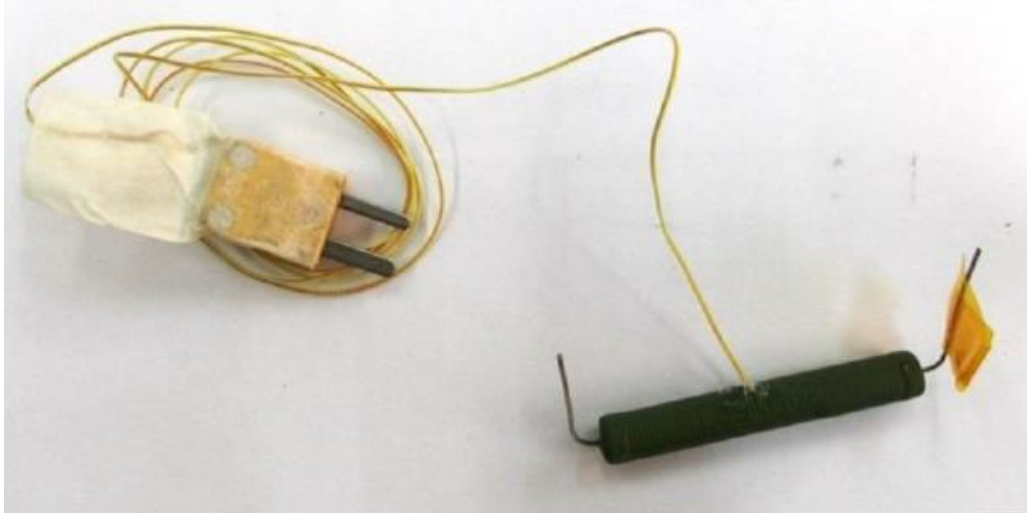
Figura 8 - Posição dos aquecedores e termopares dentro do invólucro de resina



Fonte: Cunha (2014).

O aquecedor posicionado no centro do invólucro de resina proporciona o encapsulamento do mesmo e na aferição da temperatura um termopar é posicionado no centro do aquecedor. A Figura 9 mostra com mais detalhes o sensor de temperatura antes de ser inserido dentro do invólucro de resina.

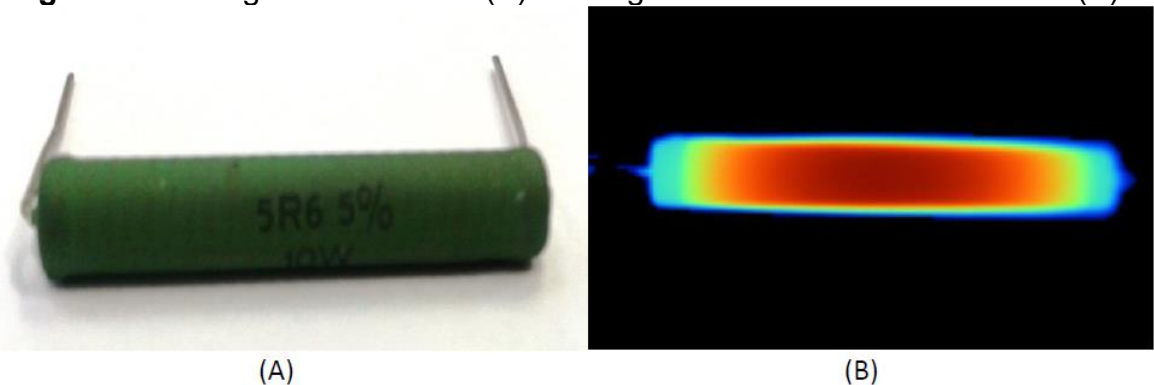
Figura 9 - Detalhes do sensor de temperatura no centro do resistor



Fonte: Cunha (2014).

A Figura 10 apresenta uma imagem do resistor utilizado e uma fotografia infravermelha com um resistor aquecido e a distribuição de temperatura ao longo da superfície do aquecedor.

Figura 10 - Imagem do Resistor (A) e Fotografia infravermelha do resistor (B)



Fonte: Cunha (2014).

A réplica foi posicionada no centro da seção de testes do túnel de vento, de maneira a não perturbarem o escoamento os fios dos termopares foram alinhados ao longo do escoamento e ordenados como pode ser observado nas Figuras 11 e

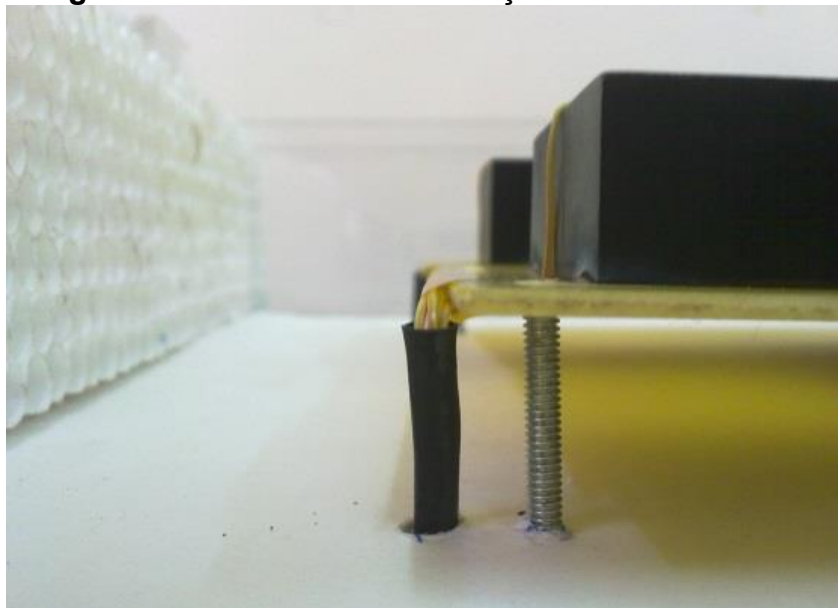
12. Para isso foram reunidos em feixes e conduzidos para fora da seção de testes com auxílio de condutos termo retráteis que ofereceram a rigidez necessária para acomodar os fios.

Figura 11 - Ordenação ao longo do escoamento dos fios na face inferior placa



Fonte: Cunha (2014).

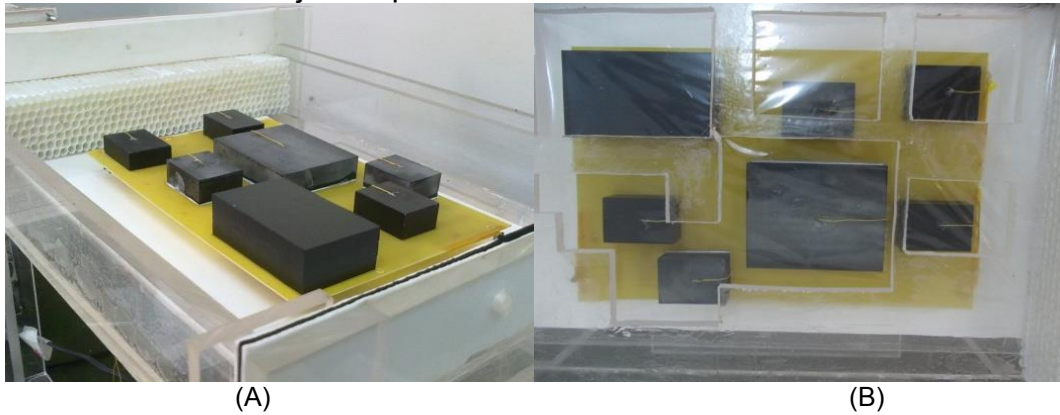
Figura 12 - Saída dos fios da seção de testes do túnel



Fonte: Cunha (2014).

O posicionamento da placa na seção de teste do túnel de vento pode ser observado na Figura 13 (A) e em (B) tem-se a seção fechada com a janela para câmera infravermelha pronta para ensaios.

Figura 13 - (A) Placa posicionada na Seção de Testes. (B) Seção de testes com janela para câmera infravermelha



Fonte: Cunha (2014).

Este capítulo teve como intuito mostrar os componentes, equipamentos e a metodologia empregada para obtenção de dados experimentais que serão utilizados como parâmetro de comparação com os resultados alcançados computacionalmente, estes apresentados nos capítulos seguintes.

4 ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Os modelos de turbulência foram criados a partir de certa necessidade particular, para situações específicas que podem não ser as mesmas desse trabalho. Porém, mesmo que tais modelos de turbulência tenham sido criados a partir de análises específicas e para determinados escoamento e condições de contorno, eles não se aplicam somente para os casos que foram criados e comumente são encontrados nos diversos *software* de análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Assim esse trabalho em questão visa analisar e aplicar esses modelos de turbulência para o caso aqui estudado. Verificando assim sua compatibilidade com o caso abordado.

Como citado anteriormente, existem diversas técnicas de modelagem numérica para modelos de turbulência. No entanto, este trabalho terá enfoque nos métodos baseados na clássica decomposição média de Reynolds também conhecidos como Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS.

4.1 SOFTWARE

As simulações foram realizadas no programa comercial de volumes finitos CFD Ansys/Fluent®, incluindo as etapas de pré e pós-processamento. Para isso utilizou-se um computador Dell *Workstation Precision T7500* Intel® Xeon® com 2 processadores somando 8 núcleos com capacidade de processamento de 2,13 GHz em cada núcleo e 48 GB de memória RAM.

4.2 GEOMETRIA

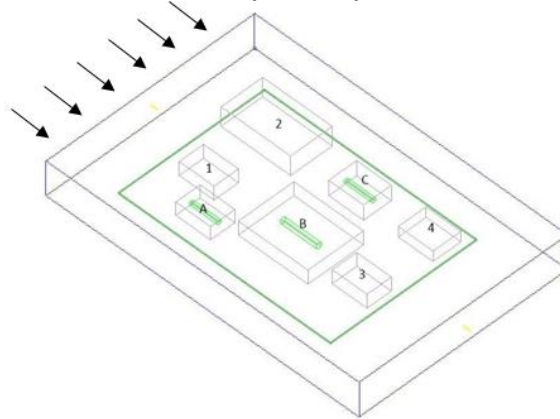
O *layout* de disposição dos componentes foi definido a partir da configuração utilizada no trabalho de (CUNHA, 2014). Tal *layout* favorece o estudo da turbulência pela utilização de blocos que produzem perturbações no escoamento. Além disso, o *layout* proposto possui posições perfeitamente adequadas para a visualização do escoamento.

Nesse trabalho foram analisados dois casos: O primeiro levando em consideração somente a seção de teste com a placa sem o túnel de vento e outro com a análise completa do túnel com a placa inserida na seção de testes.

4.2.1 Placa sem o túnel de vento

Na Figura 14, é mostrado o posicionamento dos componentes na placa sem o túnel de vento.

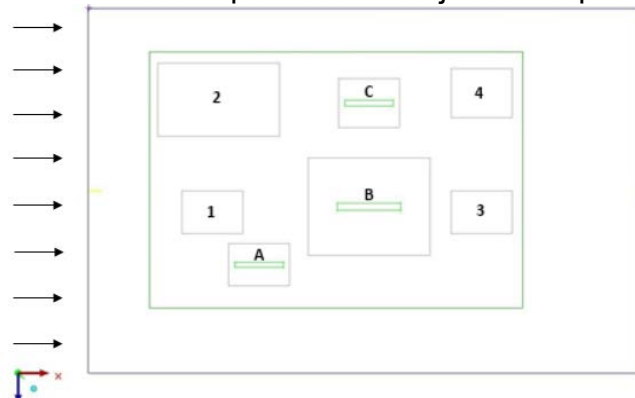
Figura 14 - Vista isométrica da réplica e posicionamento dos componentes



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 14 e 15 pode-se observar o posicionamento dos componentes. Os números 1, 2, 3 e 4 representam os blocos de liga alumínio e as letras A, B e C são os componentes monitorados, compostos de um resistor comercial e envolvidos por resina epóxi para encapsulamentos. Convém deixar claro que os componentes A, B e C são os termos fontes e os blocos 1, 2, 3 e 4 não possuem fontes internas e tem a função de servir como barreiras físicas e perturbarem o escoamento. Portanto, vale ressaltar que todos os componentes foram simulados, porém os resultados obtidos referem-se apenas aos termos fontes monitorados que mostraram resultados mais significativos para o estudo.

Figura 15 - Vista superior do arranjo de componentes

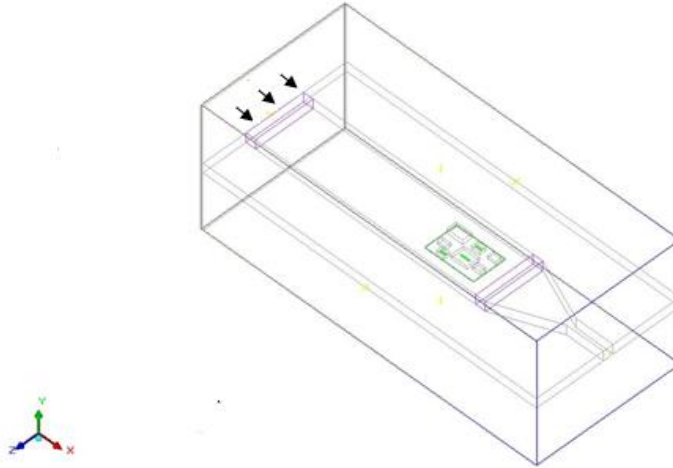


Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2 Placa sem o túnel de vento

Nas Figuras 16 e 17 são mostrados o posicionamento dos componentes na placa inserida no túnel de vento. A placa possui o mesmo *layout* mostrado nas Figuras 14 e 15.

Figura 16 - Vista isométrica da placa posicionada dentro do túnel de vento



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 17 - Vista superior da réplica inserida no túnel de vento



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Com a geometria definida verificou-se as variáveis que possuíam maior influência no escoamento e na transferência de calor. Adotando assim as condições de contorno de velocidade (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0m/s) e temperatura de

entrada ambiente (20°C), o comportamento turbulento definido pelos modelos de turbulência escolhidos e dos mecanismos de troca de calor de condução e convecção (para este trabalho a radiação não foi levada em consideração pois neste tipo de escoamento, com convecção forçada, a radiação agrega contribuições significativas aos resultados) e a influência que o aquecimento dos componentes a montante proporcionam aos posicionados ao decorrer do escoamento.

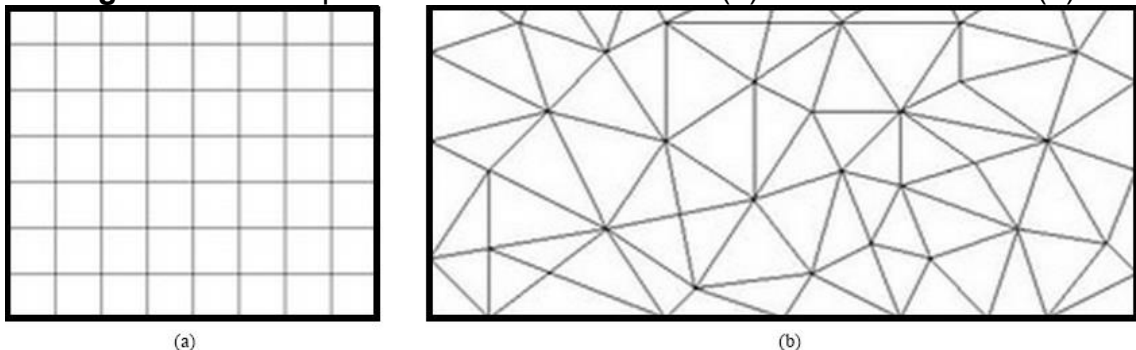
Inicialmente foi feita a modelagem do túnel todo, completo e depois as condições de contorno na entrada e na saída foram obtidas. Assim com essas condições de contorno modelou-se somente a seção de teste. Todas as simulações foram feitas a partir dessas condições de contorno que vieram do modelo completo, túnel mais placa inserida na seção de testes.

4.4 TEORIA DE MALHAS

A etapa de realização da malha é uma das mais importantes da simulação numérica e possui influência direta nos resultados. Fazer uma malha consiste em subdividir o domínio em domínios menores nos quais são resolvidas as equações que regem o problema.

Em relação ao tipo de malha elas podem ser classificadas como: malhas estruturadas e malhas não estruturadas (Figura 18). As malhas estruturadas são subdivididas em elementos bidimensionais e tridimensionais que geralmente são quadriláteros e hexaédricos. As malhas não estruturadas possuem formas variadas, tridimensionalmente falando as formas mais utilizadas são os tetraedros.

Figura 18 - Exemplos de malhas Estruturada (a) e Não Estruturada (b)



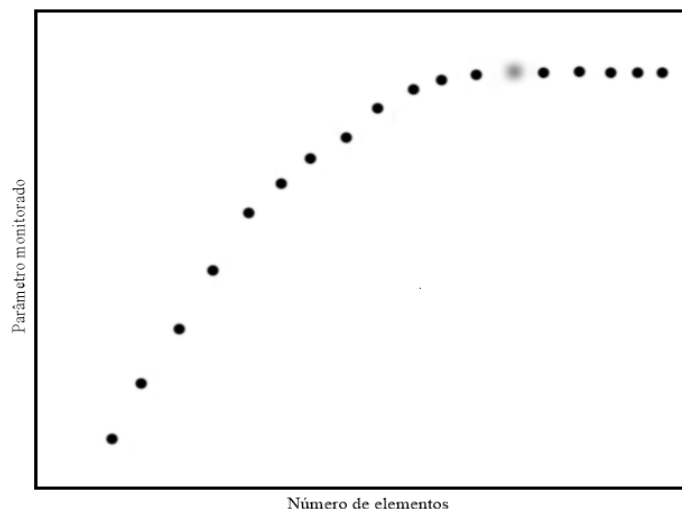
Fonte: Elaboração do próprio autor.

As malhas estruturadas são preferidas para domínios com geometrias mais simples. Já as malhas não estruturadas se tornam mais apropriadas para geometrias mais complexas, pois possui uma maior flexibilidade de seus elementos e uma melhor adaptação à geometria dos objetos.

Para contemplar um problema a malha precisa ser refinada nas regiões onde existem variações rápidas na solução. Como, por exemplo, nas regiões de camada limite ou de ondas de choque. No entanto, se torna inviável refinar todo o domínio do problema, pois quanto maior a quantidade de volumes, maior é a demanda de esforço computacional. Assim, torna-se necessário encontrar uma malha ideal que possua a menor quantidade de elementos, mas que ainda represente o problema e não altere os resultados obtidos.

Para encontrar essa malha ideal utiliza-se o procedimento de teste de malha. Com o teste é possível definir a melhor malha que produza o resultado mais satisfatório com o menor custo computacional. O teste de malha consiste em realizar várias simulações aumentando gradativamente o número de elementos e ao mesmo tempo monitorar um parâmetro específico do problema. A partir do momento que se aumenta o número de elementos da malha e não há variação no parâmetro monitorado pode-se dizer que aquela malha está independente. Isso quer dizer que a partir daquele ponto elevar o número de elementos só aumentará o custo computacional e não trará nenhum benefício para os resultados.

Figura 19 - Exemplo de uma curva de independência de malha



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 19 apresenta a curva obtida pela relação entre um parâmetro monitorado e a quantidade de número de elementos, utilizada para verificar a independência da malha. Pode-se observar que a partir do ponto cinza desfocado os resultados do parâmetro monitorado não variam mais com o aumento do número de elementos.

4.4.1 Seleção e independência da malha

Com geometria e *layout* escolhidos avança-se para a etapa de seleção das malhas. É necessário encontrar uma malha independente, a qual, não influencie os resultados. Para isso é necessário estabelecer parâmetros de controle para verificar se a malha está independente.

O primeiro passo para se fazer uma malha adequada é definir qual tipo de malha será utilizada levando em conta a complexidade da geometria do seu modelo. Dentre as opções encontram-se as malhas estruturadas e as não estruturadas. Devido ao *layout* e por ser uma geometria simples escolheu-se utilizar a malha estruturada (*Hexa cartesian*) para o *layout* da placa na seção de testes.

O próximo passo é escolher o máximo tamanho do elemento (*max element size*) e o espaçamento mínimo entre os elementos (*minimum gap*). Após diversas simulações e testes encontrou-se um valor ótimo de *max element size* e *minimum gap* levando em consideração a geometria do problema, se adequando perfeitamente e produzindo bons resultados. Em seguida foram realizados ajustes finos da malha através dos seguintes itens: mínimo espaçamento entre os elementos (*min element in gap*), quantidade mínima de elementos na aresta (*min elements on edge*) e máxima proporção de tamanho (*max size ratio*). Todos esses itens foram variados a fim de se encontrar a malha mais adequada para o caso. Assim produziu-se uma planilha com o intuito de varrer a maior quantidade de malhas e avaliar, entre elas, qual seria a melhor para o problema proposto.

A Figura 20 mostra uma parte da planilha de análise de malhas, nela varia-se o tamanho do mínimo espaçamento entre os elementos (*min element in gap*) e a quantidade mínima de elementos na aresta (*min elements on edge*) de 1 a 10, com incremento de 1 e varia a máxima proporção de tamanho (*max size ratio*) de 1,1 a 10, também com incremento de 1 (exceto no primeiro passo que a variação é de 0,9). Computando assim um total de 1000 malhas para serem analisadas.

Figura 20 - Parte da planilha utilizada no processo de escolha da malha

Mínimo espaçamento entre elementos	Mínimo elementos na aresta	Máxima proporção de tamanho	Nº elementos	Alinhamento entre as faces	Qualidade	Volume mínimo	Volume máximo	Distorção	Melhores
5,0	1,0	1,1	889200	0,894289	0,724466	9	8	0,704865	
5,0	1,0	2,0	1026027	0,917847	0,713297	10	7	0,740181	
5,0	1,0	3,0	1159648	0,933307	0,805123	11	8	0,766183	
5,0	1,0	4,0	1301520	0,996170	0,935183	11	9	0,944263	
5,0	1,0	5,0	1456380	0,986676	0,902021	12	9	0,895962	
5,0	1,0	6,0	1722350	0,994963	0,978832	12	9	0,936076	
5,0	1,0	7,0	1804176	0,996472	0,967465	13	9	0,946505	
5,0	1,0	8,0	1949400	0,999658	0,990495	13	9	0,983667	
5,0	1,0	9,0	2019928	0,999740	0,987340	13	9	0,989100	
5,0	1,0	10,0	2027300	0,999172	0,986159	13	9	0,976615	
5,0	2,0	1,1	1031472	0,822675	0,840850	9	9	0,704840	
5,0	2,0	2,0	1064028	0,889424	0,838482	10	8	0,740181	
5,0	2,0	3,0	1201064	0,933306	0,893396	11	8	0,766183	
5,0	2,0	4,0	1346400	0,995750	0,935182	11	9	0,944263	
5,0	2,0	5,0	1503360	0,986677	0,948699	12	9	0,895965	
5,0	2,0	6,0	1673140	0,994964	0,978379	12	9	0,936080	
5,0	2,0	7,0	1804176	0,996471	0,971978	13	9	0,946503	
5,0	2,0	8,0	1949400	0,999661	0,990866	13	9	0,983679	
5,0	2,0	9,0	2073084	0,999740	0,987340	13	9	0,989099	
5,0	2,0	10,0	2134000	0,999172	0,990687	13	9	0,976609	
5,0	3,0	1,1	1260840	0,819447	0,888287	9	9	0,704840	
5,0	3,0	2,0	1140030	0,889424	0,887625	10	8	0,740172	
5,0	3,0	3,0	1283896	0,933306	0,913424	11	8	0,766181	
5,0	3,0	4,0	1436160	0,995750	0,973950	11	9	0,944260	
5,0	3,0	5,0	1597320	0,986675	0,963242	12	9	0,895958	
5,0	3,0	6,0	1771560	0,994962	0,981259	12	9	0,936073	
5,0	3,0	7,0	1904408	0,996471	0,977546	13	9	0,946504	
5,0	3,0	8,0	2052000	0,999657	0,994137	13	9	0,983670	
5,0	3,0	9,0	2126240	0,999740	0,987340	13	9	0,989095	
5,0	3,0	10,0	2187350	0,999172	0,993556	13	9	0,976612	
5,0	4,0	1,1	1492851	0,824193	0,914095	10	9	0,704835	

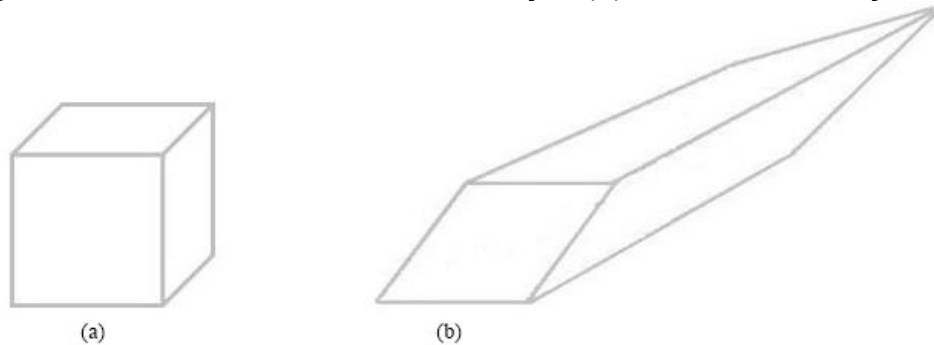
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para avaliar as malhas, foram ponderados os seguintes itens: número de elementos, o alinhamento entre as faces (*face alignment*), a qualidade (*quality*), volume máximo e mínimo dos elementos e a distorção dos elementos (*skewness*). O primeiro item, número de elementos, é uma análise quantitativa muito importante e está diretamente atrelada ao custo computacional. Os demais itens fornecem informações qualitativas da malha. Com uma escala de avaliação que varia de 0 (péssimo) a 1 (ótimo). O *face alignment* mede o alinhamento entre os elementos, o *quality* a qualidade geral da malha, o volume o tamanho dos elementos e finalmente o *skewness* mostra quão distorcidos estão os elementos.

O ideal para um elemento seria um elemento equilátero, Figura 21a. No entanto, como isso geralmente não é possível, deve se concentrar em tentar obter formas regulares para cada elemento. Reduzindo assim o número de elementos longos e finos e o número de elementos distorcidos que diminuem a precisão e desestabilizam a solução. Por exemplo, na Figura 21 são mostradas as distorções dos elementos (*skewness*) um dos fatores de avaliação da qualidade de malha. O elemento (a) mostra um elemento com baixa distorção, considerado ideal para um

boa malha e o elemento (b) com altas distorções e uma vez utilizado acarretará imprecisões aos resultados.

Figura 21 - Elementos com baixa distorção (a) e com alta distorção (b)



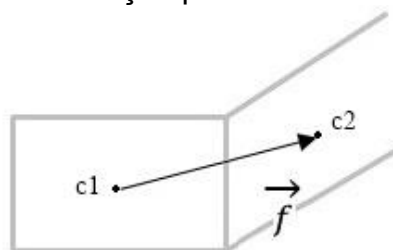
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Alinhamento das faces é uma das medidas de qualidade de malha definida como:

$$\text{Alinhamento da face} = \overline{c_1c_2} \cdot \vec{f}$$

Na Figura 22 pode-se observar dois elementos adjacentes no qual c_1 e c_2 são os centroides de dois elementos adjacentes e o vetor \vec{f} é o vetor normal entre as duas faces dos elementos. Faces estas que quando não estão alinhados podem resultar em um elemento longo e estreito, prejudicial para a solução numérica.

Figura 22 - Definição para alinhamento das faces



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Todos os itens de avaliação de qualidade foram anotados e avaliados. As melhores malhas e mais bem avaliadas foram separadas para uma análise mais minuciosa. Esta análise ponderava a qualidade da malha e a quantidade de elementos, verificando-se assim qual dentre elas teria o melhor custo benefício (maior qualidade com a menor quantidade de elementos).

A Figura 23 mostra a primeira filtragem dentre as 1000 malhas feitas. Pode-se observar que existe uma grande variação entre o número de elementos, entre 900.000 a 1.400.000 elementos aproximadamente. Após essa primeira triagem é feita a escolha das melhores malhas para finalmente se escolher a malha que será utilizada na simulação.

Figura 23 - Malhas obtidas a partir da primeira triagem de avaliação das malhas

Mínimo espaçamento entre elementos	Mínimo elementos na aresta	Máxima proporção de tamanho	Nº elementos	Alinhamento entre as faces	Qualidade	Volume mínimo	Volume máximo	Distorção
7,0	1,0	6,0	961272	0,999783	0,987888	14	9	0,987380
7,0	1,0	7,0	1018647	0,999931	0,996438	14	9	0,992500
7,0	1,0	8,0	1045760	0,999961	0,995817	15	9	0,994582
7,0	2,0	4,0	847552	0,998103	0,987735	12	9	0,962204
7,0	2,0	5,0	917280	0,999454	0,992725	13	9	0,979304
7,0	2,0	6,0	961272	0,999783	0,990410	14	9	0,987377
7,0	2,0	7,0	1046178	0,999930	0,997467	14	9	0,992476
7,0	2,0	8,0	1045760	0,999961	0,996442	15	9	0,994585
7,0	3,0	4,0	872480	0,998103	0,990260	12	9	0,962202
7,0	3,0	5,0	943488	0,999454	0,994836	13	9	0,979302
7,0	3,0	6,0	987974	0,999783	0,993265	14	9	0,987378
7,0	3,0	7,0	1086696	0,999993	0,997734	14	9	0,992499
7,0	3,0	8,0	1073280	0,999961	0,996501	15	9	0,994555
7,0	4,0	4,0	897408	0,998103	0,992538	12	9	0,962000
7,0	4,0	7,0	1101240	0,999930	0,998162	14	9	0,992485
7,0	4,0	8,0	1100800	0,999996	0,996447	15	9	0,994500
7,0	5,0	7,0	1156302	0,999930	0,998156	14	9	0,992483
7,0	5,0	8,0	1155840	0,999961	0,996434	15	9	0,994558
7,0	6,0	8,0	1210880	0,999960	0,996448	15	9	0,994577
7,0	7,0	7,0	1266426	0,999930	0,997985	14	9	0,992482
7,0	7,0	8,0	1265920	0,999996	0,996415	15	9	0,994588
7,0	8,0	6,0	1254994	0,999783	0,996721	14	9	0,987367
7,0	8,0	7,0	1293957	0,999930	0,998028	14	9	0,992476
7,0	8,0	8,0	1320960	0,999961	0,996484	15	9	0,994574
7,0	9,0	6,0	1281696	0,999783	0,986522	14	9	0,987357
7,0	9,0	7,0	1349019	0,999930	0,997984	14	9	0,992488
7,0	9,0	8,0	1376000	0,999996	0,996494	15	9	0,994561
7,0	10,0	6,0	1335100	0,997830	0,996638	14	9	0,987362
7,0	10,0	7,0	1404081	0,999930	0,997650	14	9	0,992483
7,0	10,0	8,0	1431040	0,999996	0,996451	15	9	0,994570
8,0	1,0	7,0	1018647	0,999993	0,996438	14	9	0,992500
8,0	2,0	7,0	1046178	0,999930	0,997467	14	9	0,992476
8,0	3,0	7,0	1046178	0,999931	0,997734	14	9	0,992499
8,0	3,0	8,0	1073280	0,999961	0,996501	15	9	0,996501
8,0	4,0	7,0	1101240	0,999930	0,998162	14	9	0,992485
8,0	4,0	8,0	1100800	0,999961	0,996447	15	9	0,994584
8,0	5,0	6,0	1094782	0,999783	0,995482	14	9	0,987374
8,0	5,0	7,0	1156302	0,999930	0,998156	14	9	0,992483
8,0	6,0	7,0	1211364	0,999930	0,998075	14	9	0,992487
8,0	7,0	7,0	1266426	0,999930	0,997985	14	9	0,992482
8,0	8,0	7,0	1293957	0,999930	0,998028	14	9	0,992476
8,0	8,0	8,0	1320960	0,999961	0,996484	15	9	0,994574
8,0	9,0	7,0	1349019	0,999931	0,997984	14	9	0,992488

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 24 mostra as finalistas entre as malhas e a malha escolhida destacada em azul.

Figura 24 - Malhas obtidas na última avaliação e a malha escolhida destacada

Mínimo espaçamento entre elementos	Mínimo elementos na aresta	Máxima proporção de tamanho	Nº elementos	Alinhamento entre as faces	Qualidade	Volume mínimo	Volume máximo	Distorção
7,0	2,0	4,0	847552	0,998103	0,987735	12	9	0,962204
7,0	3,0	4,0	872480	0,998103	0,990260	12	9	0,962202
7,0	4,0	4,0	897408	0,998103	0,992538	12	9	0,962000
7,0	2,0	5,0	917280	0,999454	0,992725	13	9	0,979304
7,0	3,0	5,0	943488	0,999454	0,994836	13	9	0,979302
7,0	2,0	6,0	961272	0,999783	0,990410	14	9	0,987377
7,0	1,0	6,0	961272	0,999783	0,987888	14	9	0,987380
7,0	3,0	6,0	987974	0,999783	0,993265	14	9	0,987378
7,0	1,0	7,0	1018647	0,999931	0,996438	14	9	0,992500
8,0	1,0	7,0	1018647	0,999993	0,996438	14	9	0,992500
7,0	2,0	7,0	1046178	0,999930	0,997467	14	9	0,992476
8,0	2,0	7,0	1046178	0,999930	0,997467	14	9	0,992476
8,0	3,0	7,0	1046178	0,999931	0,997734	14	9	0,992499
7,0	3,0	7,0	1086696	0,999993	0,997734	14	9	0,992499
8,0	5,0	6,0	1094782	0,999783	0,995482	14	9	0,987374
7,0	4,0	7,0	1101240	0,999930	0,998162	14	9	0,992485
8,0	4,0	7,0	1101240	0,999930	0,998162	14	9	0,992485

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No entanto, após escolhida a malha é necessário verificar a sua independência. Para isso realizam-se simulações com malhas desde o nível mais grosseiro até a mais refinada. Até encontrar o momento em que os resultados não variam mais com a malha e assim pode-se dizer que a partir daquele ponto a malha está independente.

5 RESULTADOS

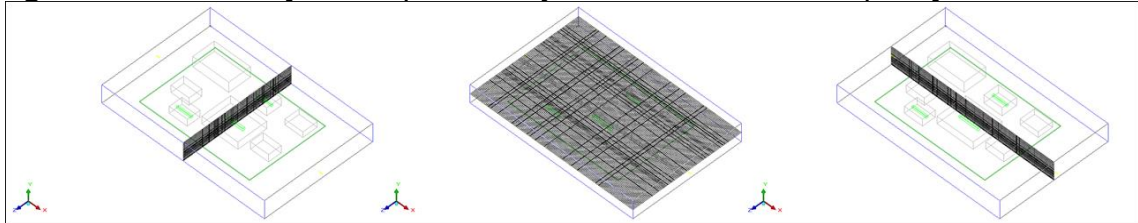
Neste capítulo serão apresentados os dados obtidos nas análises numéricas, experimentais e a comparação entre elas.

5.1 ETAPA DE REALIZAÇÃO DAS MALHAS

Definida a geometria do problema iniciou-se o estudo de independência da malha a fim de encontrar a melhor malha, com o menor custo computacional e que na qual se tivesse a certeza da mínima influência desta sobre os resultados.

Diversas malhas foram analisadas levando-se em consideração os parâmetros de qualidade descritos anteriormente, até se chegar finalmente na malha ideal. A Figura 25 mostra a localização dos planos utilizados para mostrar a comparação entre as malhas que são apresentadas nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 25 - Localização dos planos x, y e z utilizados na comparação das malhas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pode-se observar claramente a diferença das malhas com o aumento do número de elementos. O aumento é crescente do caso representado pela letra (a) com 880.440 elementos e termina no caso (o) com 7.165.680 elementos. Na Tabela 2 a quantidade de elementos em cada caso pode ser visualizada.

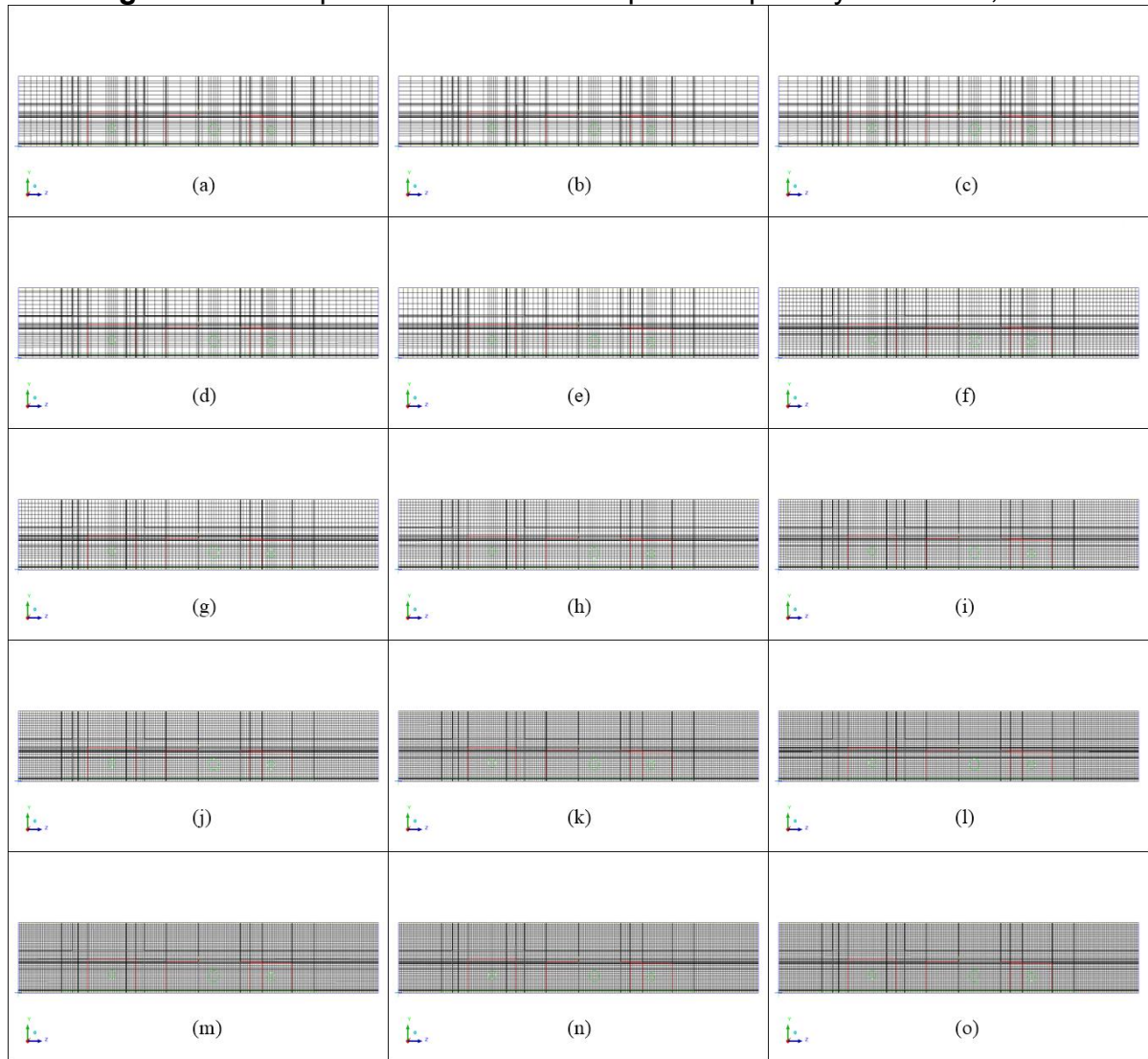
Tabela 2 - Quantidade de elementos em cada malha

<i>Nome da Malha</i>	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)
<i>Número de Elementos</i>	880.440	896.192	965.448	1.103.740	1.405.369	1.914.075	1.914.075	2.081.160	2.665.796	3.382.400	4.134.000	5.051.640	6.411.552	6.988.020	7.165.680

Fonte: Elaboração do próprio autor.

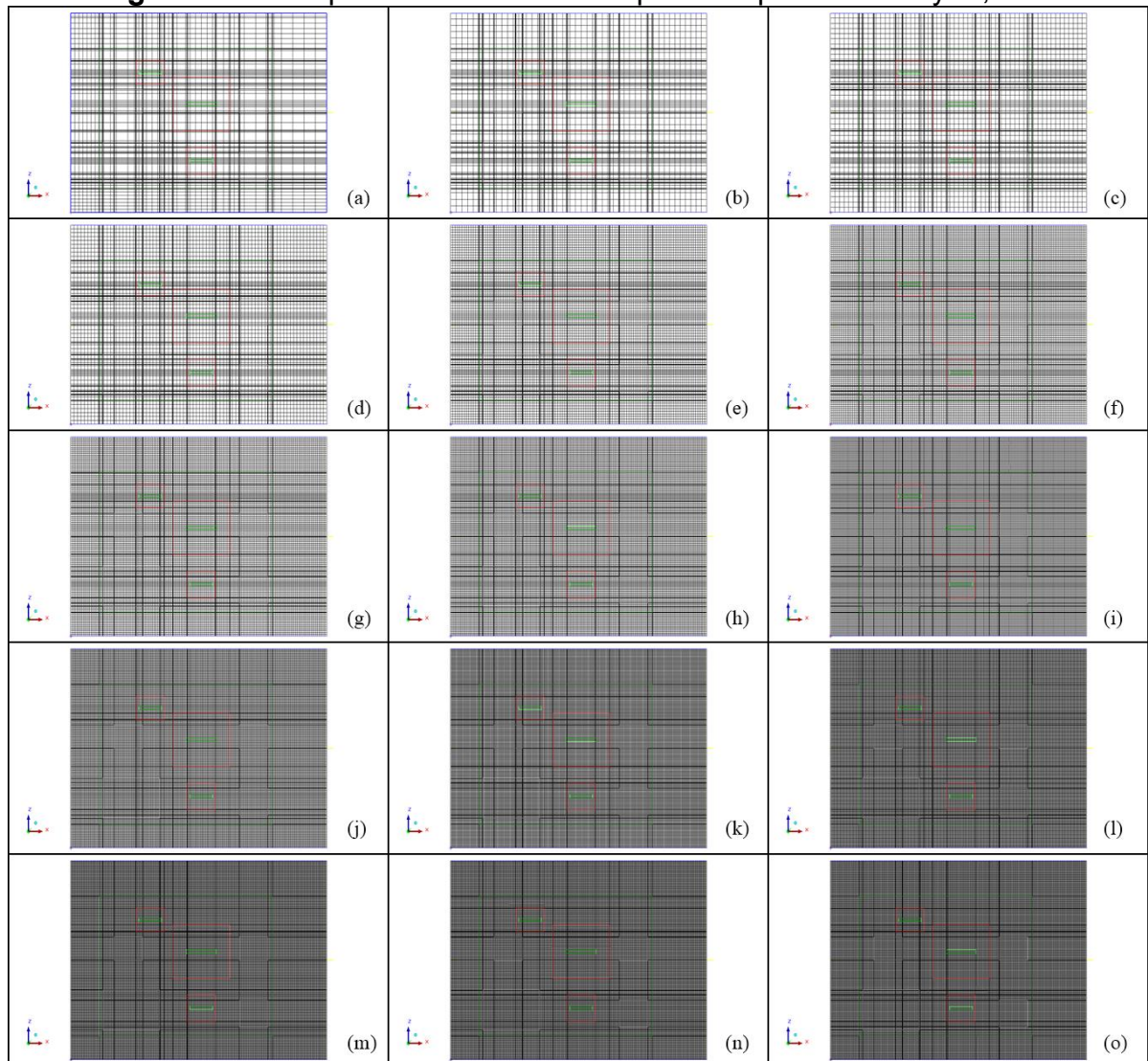
A Figura 26, 27 e 28 mostram a comparação das malhas a partir do plano x, y e z, respectivamente.

Figura 26 - Comparativo das malhas a partir do plano yz em $x=22,5\text{mm}$



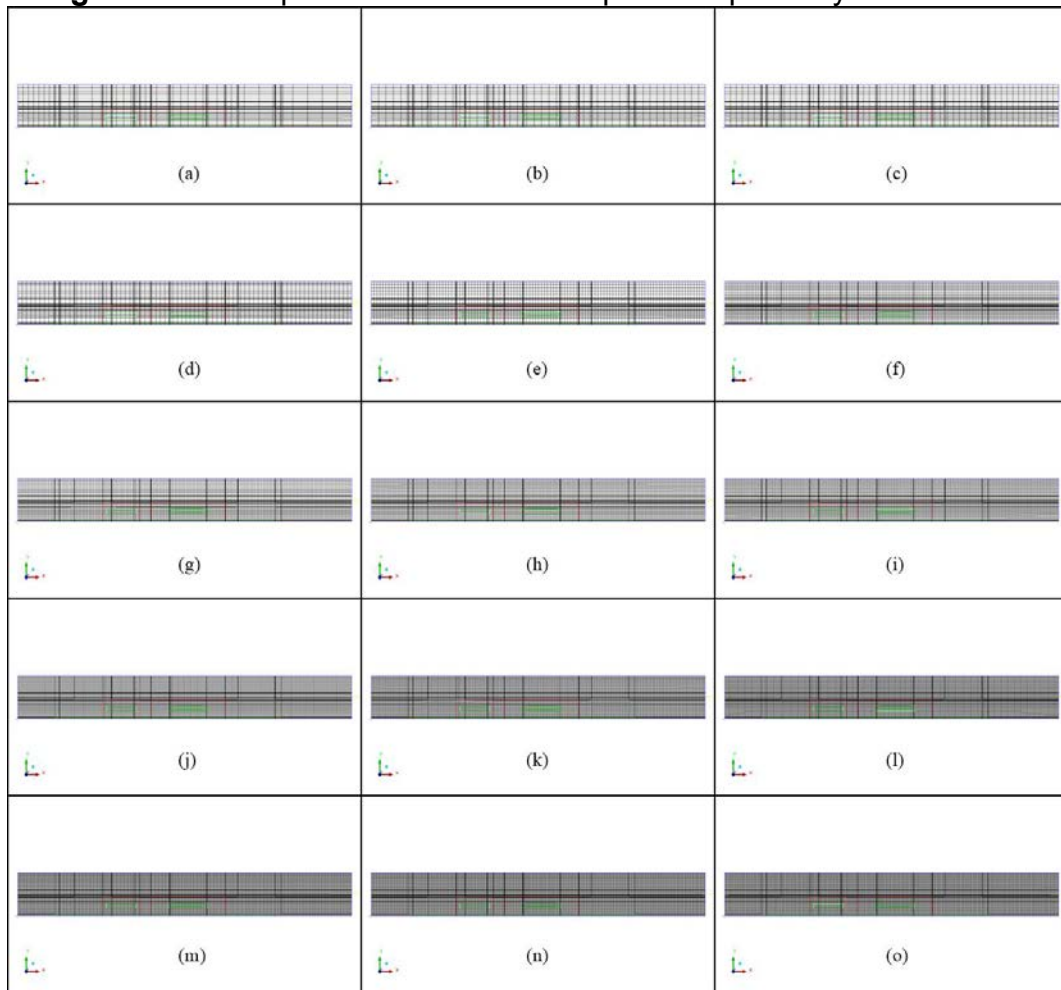
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 27 - Comparativo das malhas a partir do plano xz em $y=2,5\text{mm}$



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 - Comparativo das malhas a partir do plano xy em $z=15\text{mm}$

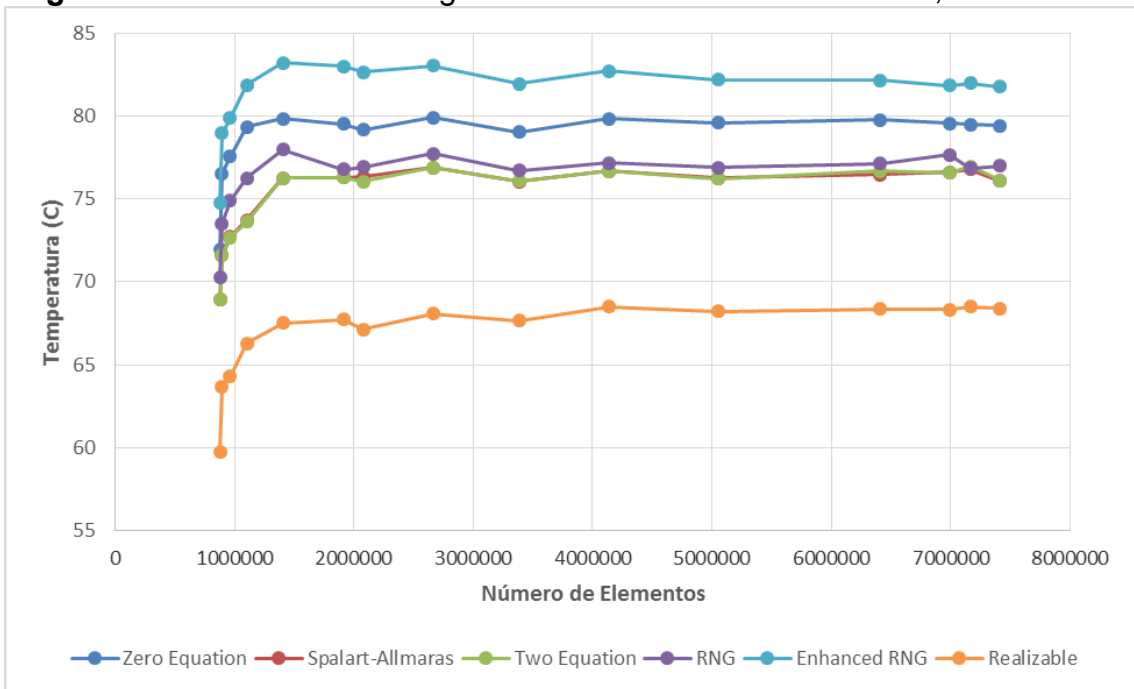


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para encontrar a curva de independência da malha não se levou em consideração o número de iterações como parâmetro para finalizar as simulações. Todos os casos foram rodados até atingirem os resíduos mínimos estabelecidos para as equações de momento, continuidade e energia. O que garante assim uma melhor confiabilidade nos resultados obtidos.

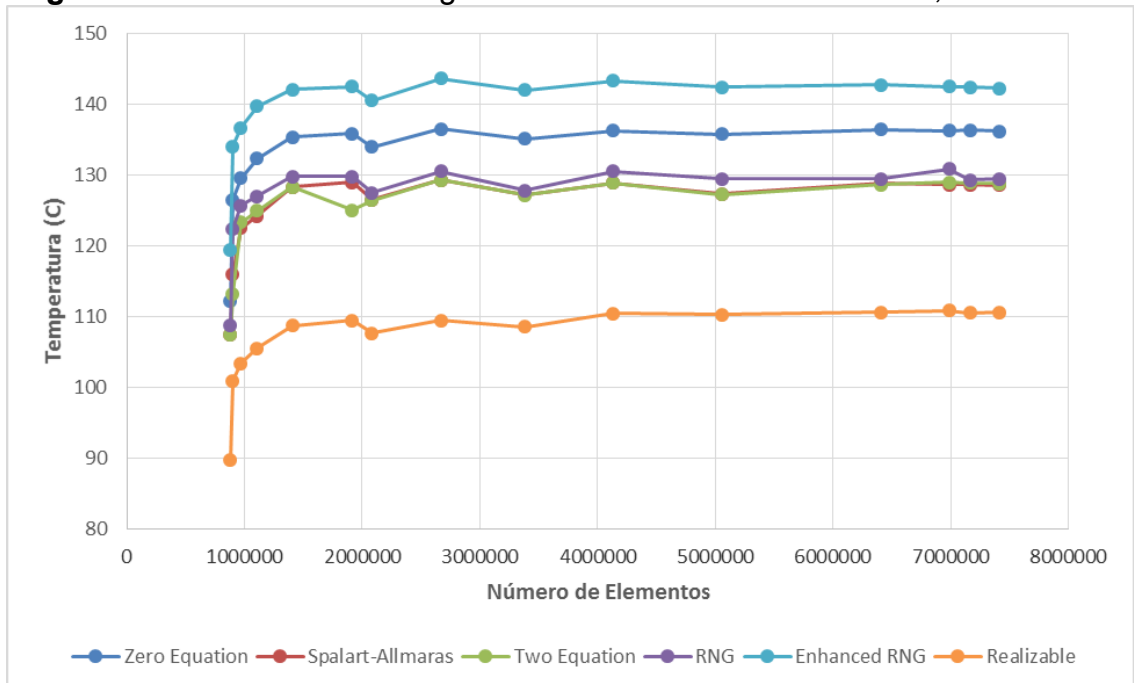
As Figuras 29, 30 e 31 mostram essas curvas de convergência obtidas relacionando o número de elementos em cada simulação e sua respectiva temperatura para aquela quantidade de elementos. Nestes casos o parâmetro monitorado é a temperatura na fonte de 3, 5 e 10 W, respectivamente.

Figura 29 - Curvas de convergência dos modelos de turbulência, fonte de 3W

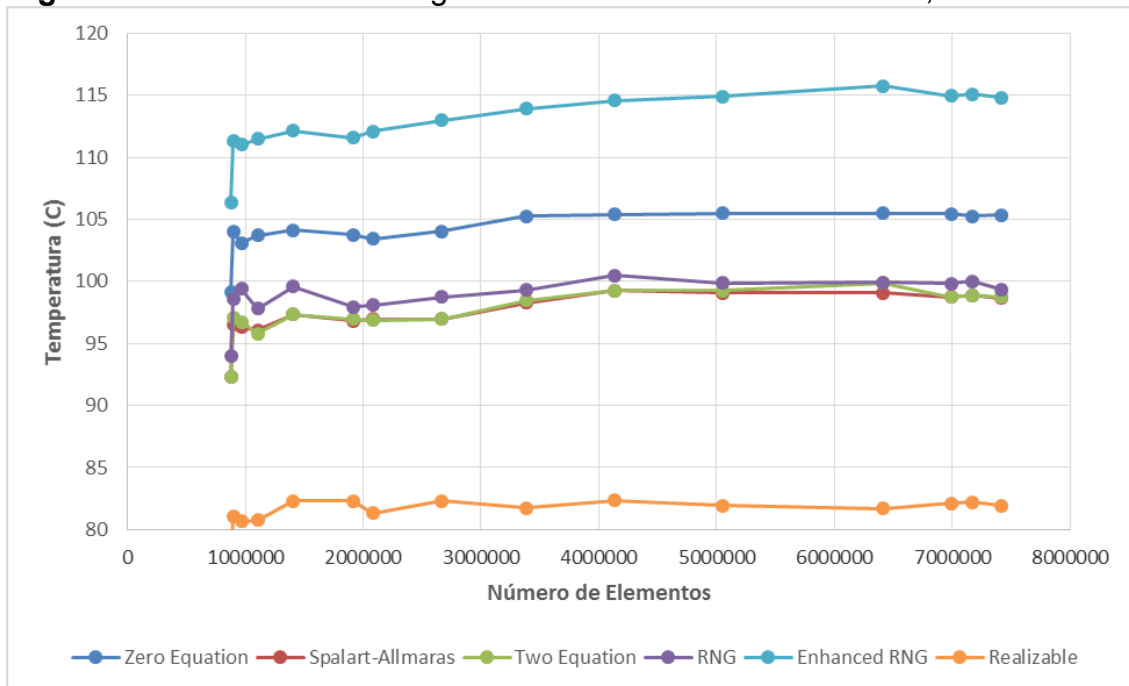


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 30 - Curvas de convergência dos modelos de turbulência, fonte de 5W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 31 - Curvas de convergência dos modelos de turbulência, fonte de 10W

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após analisar as curvas de convergência, Figuras 29, 30 e 31, decidiu-se adotar a malha com 6.411.552 elementos, Tabela 2 e Figuras 26(m), 27(m) e 28(m), por observar que com o aumento do refinamento da malha, a variação dos resultados era mínima. Os dados da malha escolhida possuem a configuração mostrada na Tabela 3:

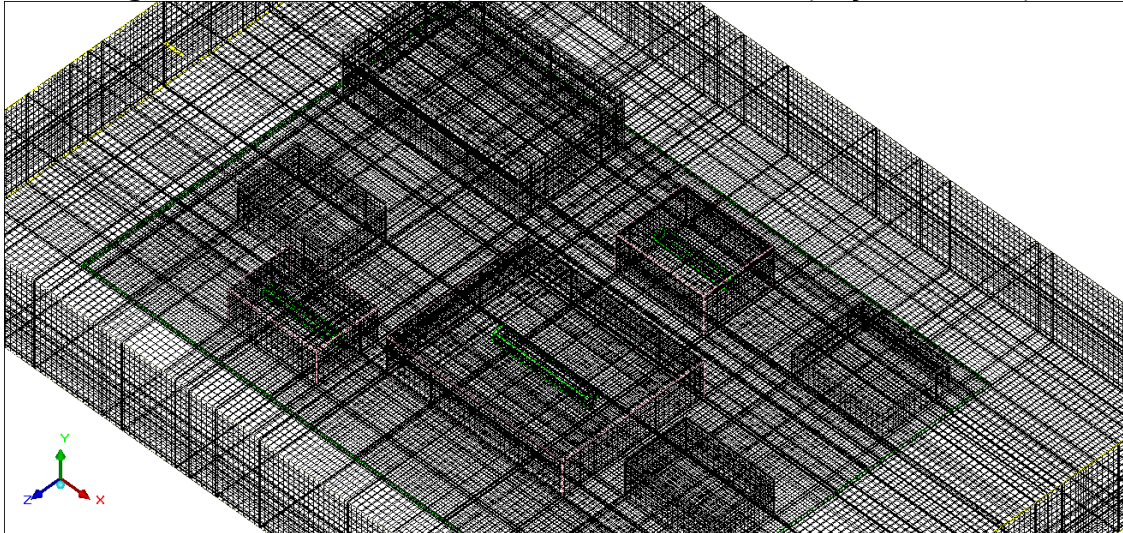
Tabela 3 - Parâmetros quantitativos e qualitativos da malha escolhida

Tamanho máximo dos elementos (mm)		Mínimo espaçamento entre os elementos (mm)	
X	1,35	X	3,5
Y	1,35	Y	0,2
Z	1,35	Z	2,5
Número de elementos	6.411.552	Alinhamentos entre as faces	0,999931
Mínimo espaçamento entre os elementos	7	Distorção	0,992500
Mínimo elementos na aresta	1	Qualidade	0,996438
Máxima proporção de tamanho	7	Volume min e máx	e-14 -> e-09

Fonte: Elaboração do próprio autor.

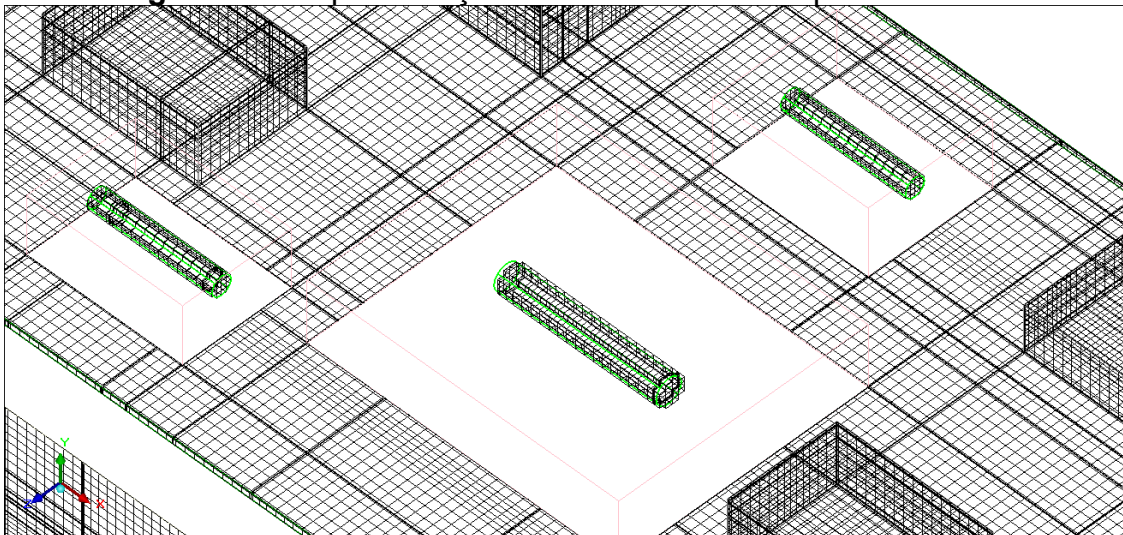
As Figuras 32 a 36 mostram os detalhes da malha utilizada para réplica.

Figura 32 - Domínio computacional com a malha (seção de teste)



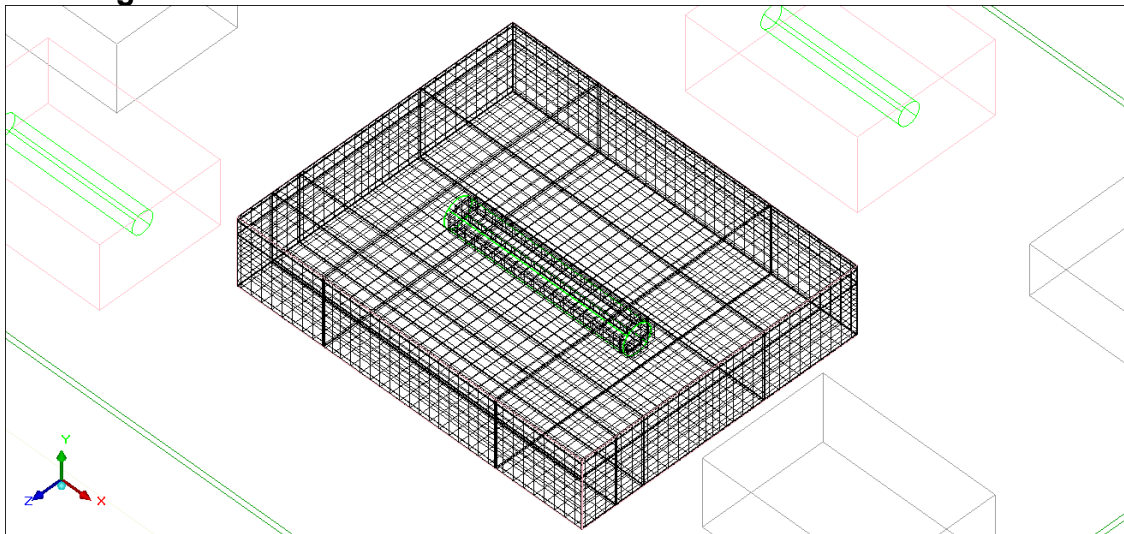
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 33 - Representação das fontes com a respectiva malha



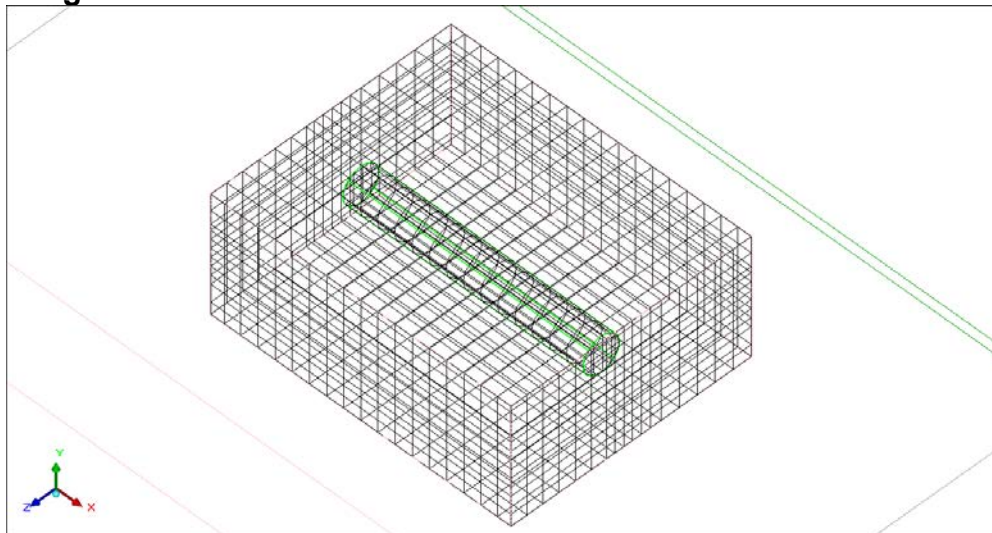
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 34 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 10W



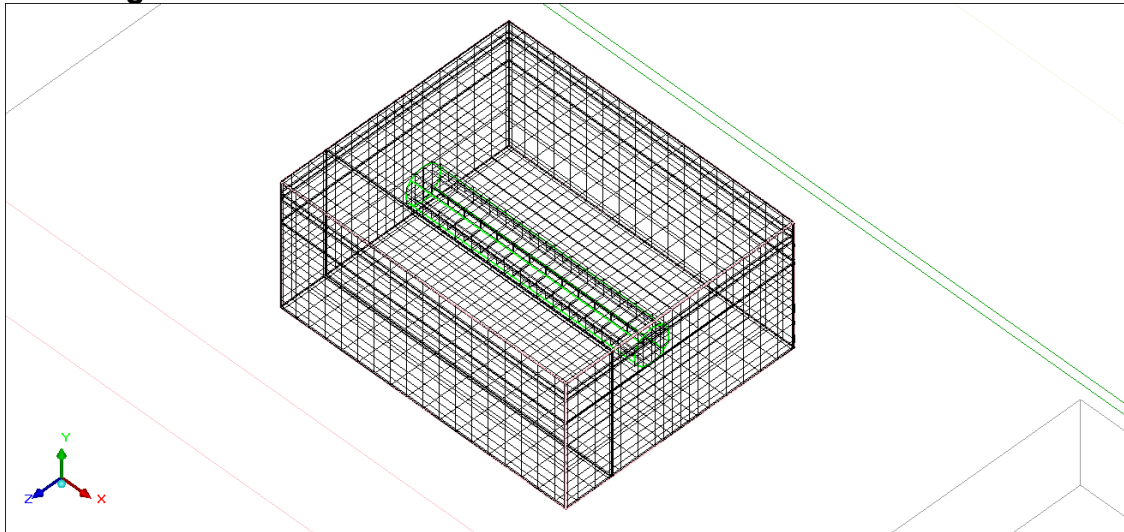
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 35 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 5W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 36 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 3W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A princípio, sobre as malhas pode-se dizer que a utilizada nesse primeiro caso, apenas a seção de testes sem o túnel completo, forneceu as diretrizes para a realização das malhas dos próximos casos.

5.1.1 Seleção e independência da malha

Com o intuito de melhor representar o problema estudado e se aproximar das condições utilizadas no experimento realizou-se a simulação da réplica inserida no túnel de vento. Para essa simulação seguiu-se os mesmos passos descritos anteriormente para a elaboração da malha. A fim de obter a melhor malha para analisar o caso estudado.

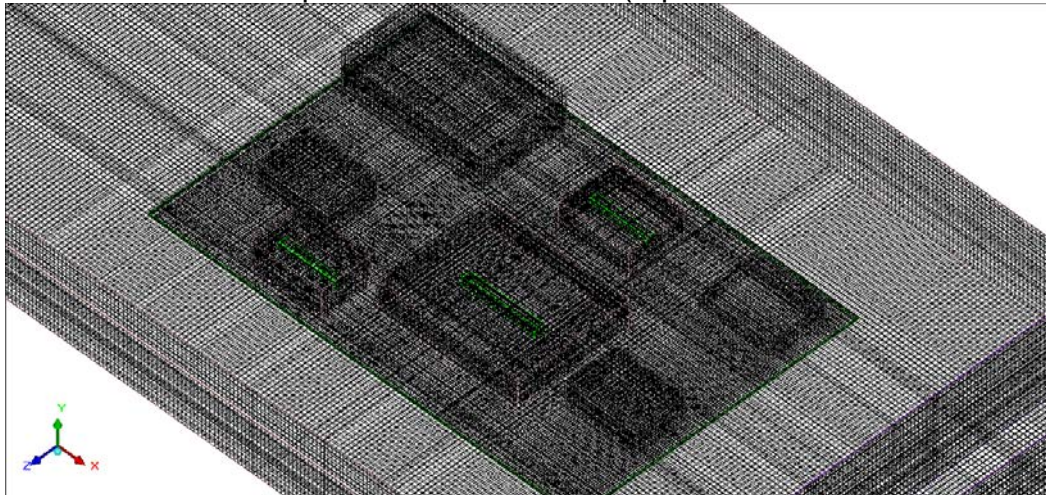
No entanto, devido à maior complexidade da geometria do túnel optou-se por utilizar uma malha não estruturada a fim de obter melhores resultados. A tabela 4 mostra a configuração da malha escolhida para as simulações com a réplica inserida no túnel de vento.

Tabela 4 - Dados da malha para o caso da réplica inserida no túnel de vento

Tamanho máximo dos elementos (mm)		Mínimo espaçamento entre os elementos (mm)	
X	3	X	0,6
Y	3	Y	0,2
Z	3	Z	0,6
Malha não estruturada (<i>Hexa unstructured</i>)			
Número de elementos	2.588.528	Alinhamentos entre as faces	0,487755
Mínimo espaçamento entre os elementos	2	Distorção	0,087907
Mínimo elementos na aresta	2	Qualidade	0,044005
Máxima proporção de tamanho	2	Volume min e máx	e-10 -> e-08

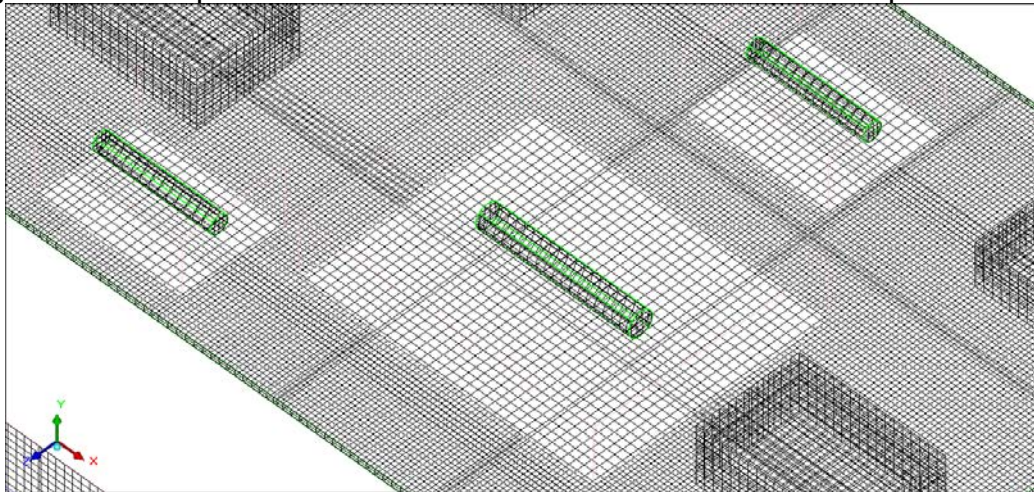
Fonte: Elaboração do próprio autor.

As Figuras 37 a 41 mostram os detalhes da malha utilizada para a análise da réplica inserida no túnel de vento.

Figura 37 - Domínio computacional com malha (réplica inserida no túnel de vento)

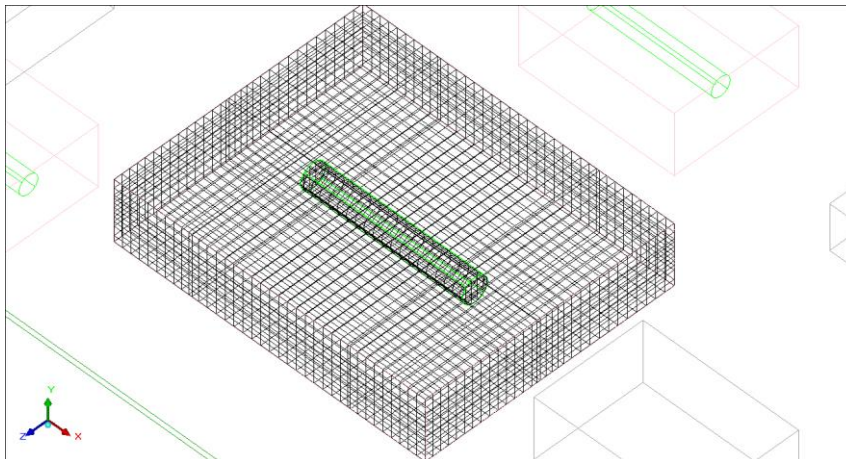
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 38 - Componentes cilíndricos inseridos no túnel com a respectiva malha



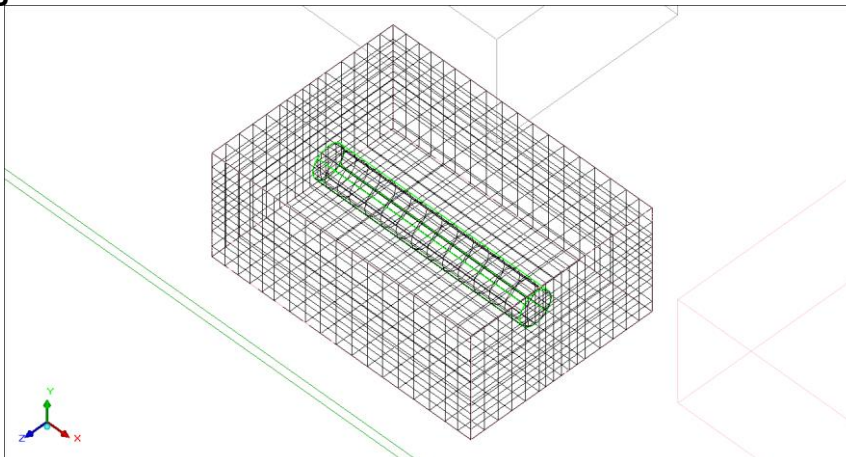
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 39 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 10W



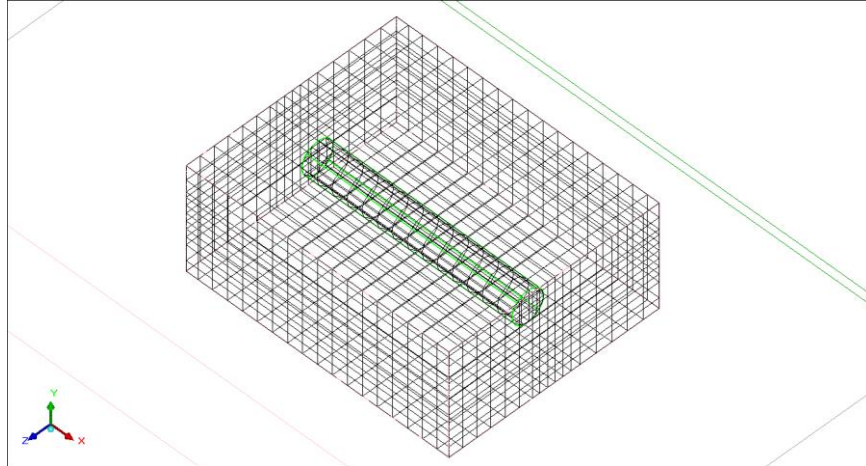
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 40 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 5W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 41 - Detalhe da malha no bloco e na fonte cilíndrica de 3W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.2 RÉPLICA

Os dados apresentados a seguir fazem parte do trabalho realizado por CUNHA, 2014. A partir da temperatura ambiente e regulando-se a velocidade de entrada do túnel de vento pode-se produzir um escoamento em torno de blocos aquecidos.

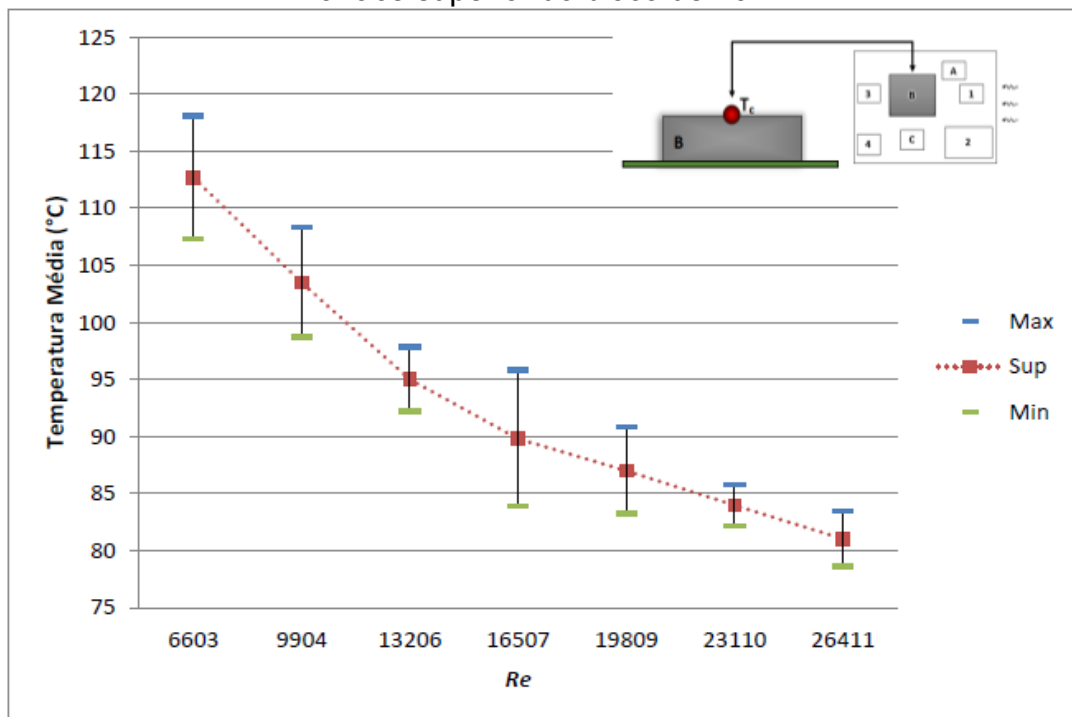
As velocidades utilizadas variam entre 1,0m/s a 4,0m/s com um passo de 0,5 m/s entre cada caso, totalizando assim 7 velocidades de estudo (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 m/s), referente a faixa de $6603 < Re < 26411$. Os resultados experimentais são apresentados nas Figuras 42 a 47 e nas Tabelas 5 a 11. Nas figuras além dos valores médios são exibidos também os valores máximos e mínimos das temperaturas para cada velocidade. Essas medidas foram realizadas para as fontes de 10W, 5W e 3W e os pontos de monitoramento estão localizados na face superior e no centro do bloco.

Tabela 5 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 10W

TERMOPAR SUPERIOR	Variação das temperaturas (em °C)		
	Velocidade (m/s)	Máxima	Média
1,0	118,07	112,71	107,35
1,5	108,29	103,49	98,70
2,0	97,83	95,01	92,18
2,5	95,79	89,82	83,85
3,0	90,77	87,00	83,23
3,5	85,78	83,98	82,17
4,0	83,49	81,05	78,60

Fonte: Cunha (2014).

Figura 42 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 10W



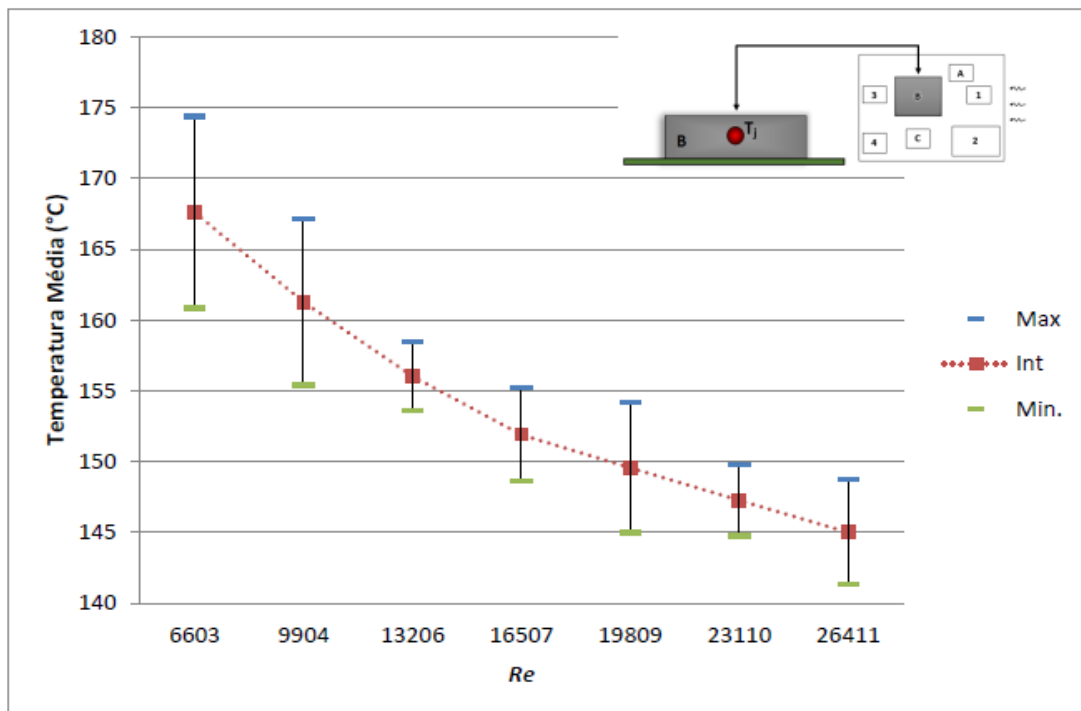
Fonte: Cunha (2014).

Tabela 6 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 10W

TERMOPAR INTERNO <i>Velocidade (m/s)</i>	Variação das temperaturas (em °C)		
	Máxima	Média	Mínima
1,0	174,35	167,58	160,81
1,5	167,13	161,25	155,38
2,0	158,45	156,02	153,59
2,5	155,18	151,90	148,62
3,0	154,17	149,57	144,97
3,5	149,77	147,26	144,74
4,0	148,72	145,01	141,30

Fonte: Cunha (2014).

Figura 43 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 10W



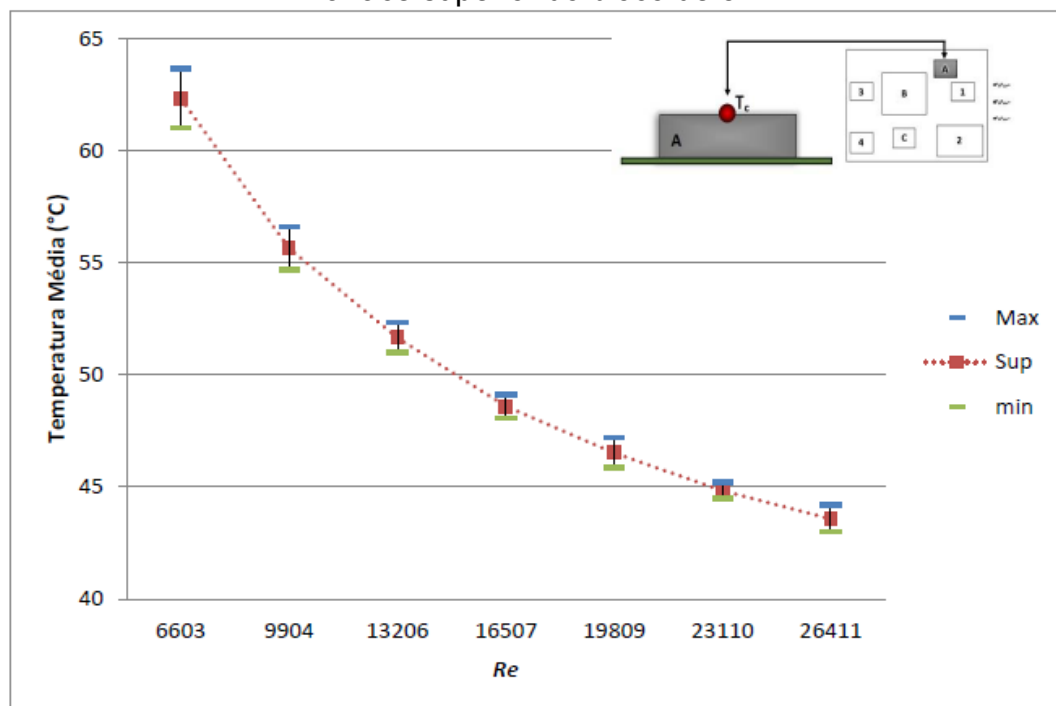
Fonte: Cunha (2014).

Tabela 7 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 5W

TERMOPAR SUPERIOR	Variação das temperaturas (em °C)		
	Máxima	Média	Mínima
Velocidade (m/s)			
1,0	63,62	62,30	60,98
1,5	56,58	55,63	54,68
2,0	52,31	51,65	51,00
2,5	49,11	48,59	48,07
3,0	47,19	46,52	45,84
3,5	45,21	44,84	44,47
4,0	44,18	43,57	42,97

Fonte: Cunha (2014).

Figura 44 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 5W



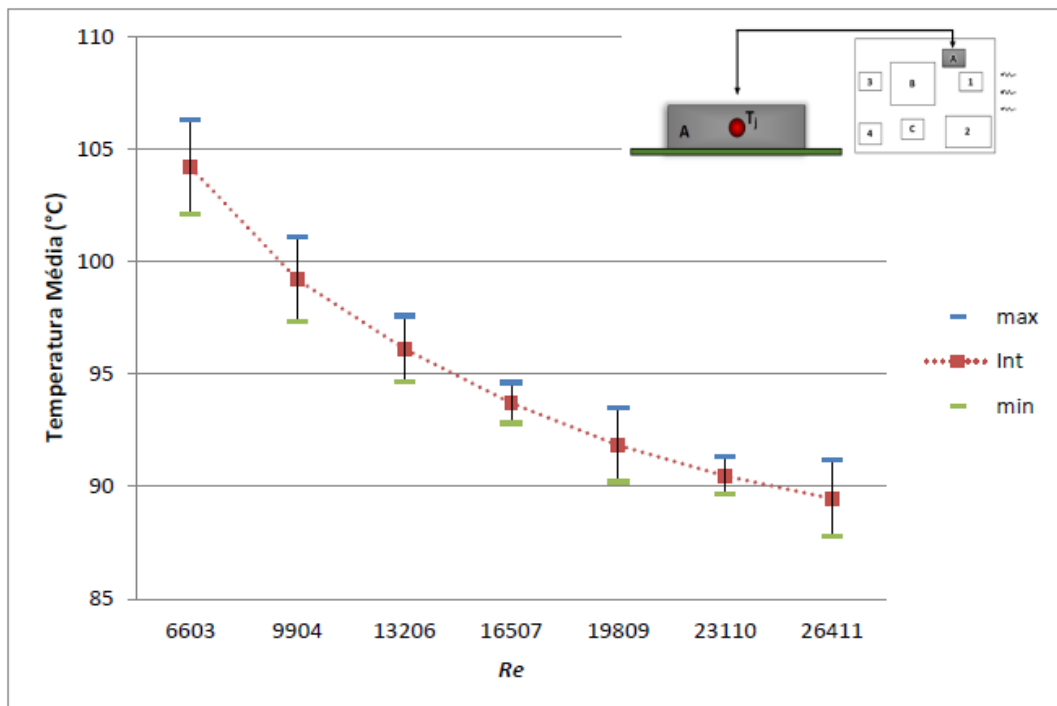
Fonte: Cunha (2014).

Tabela 8 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 5W

TERMOPAR INTERNO <i>Velocidade (m/s)</i>	Variação das temperaturas (em °C)		
	Máxima	Média	Mínima
1,0	120,14	115,74	111,35
1,5	112,26	109,04	105,81
2,0	105,07	103,53	101,98
2,5	100,79	99,24	97,70
3,0	98,81	96,30	93,79
3,5	94,80	93,28	91,76
4,0	92,04	90,25	88,45

Fonte: Cunha (2014).

Figura 45 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 5W



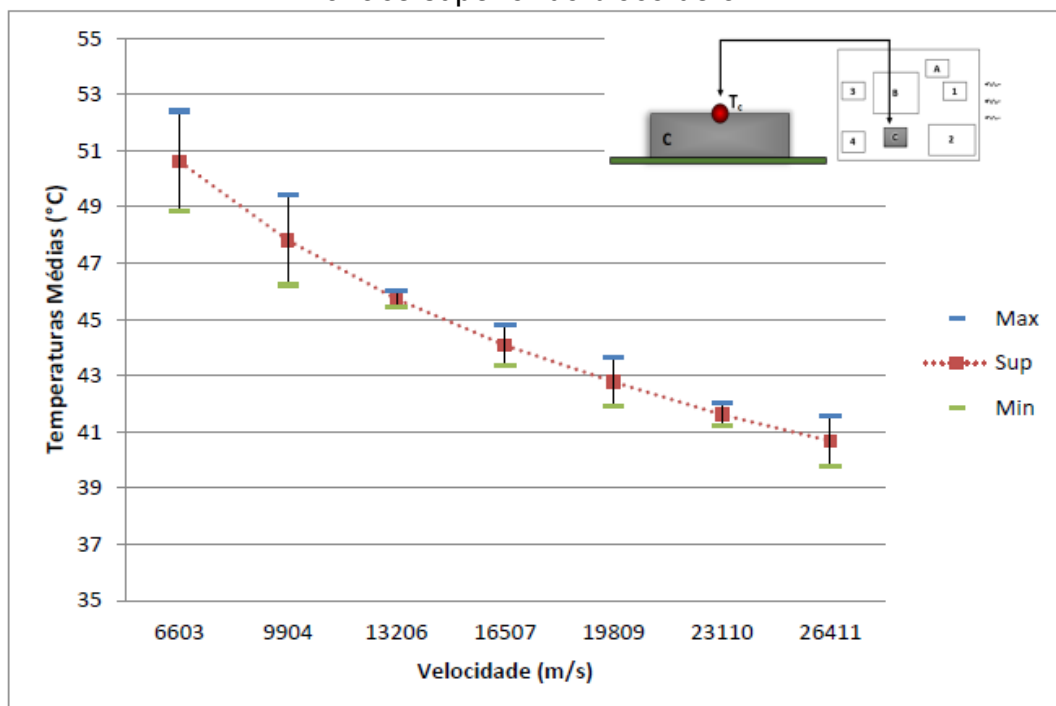
Fonte: Cunha (2014).

Tabela 9 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 3W

TERMOPAR SUPERIOR	Variação das temperaturas (em °C)		
	Velocidade (m/s)	Máxima	Média
1,0	52,41	50,62	48,83
1,5	49,43	47,82	46,21
2,0	46,00	45,73	45,45
2,5	44,80	44,08	43,37
3,0	43,65	42,78	41,91
3,5	42,01	41,61	41,22
4,0	41,58	40,68	39,77

Fonte: Cunha (2014).

Figura 46 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado na face superior do bloco de 3W



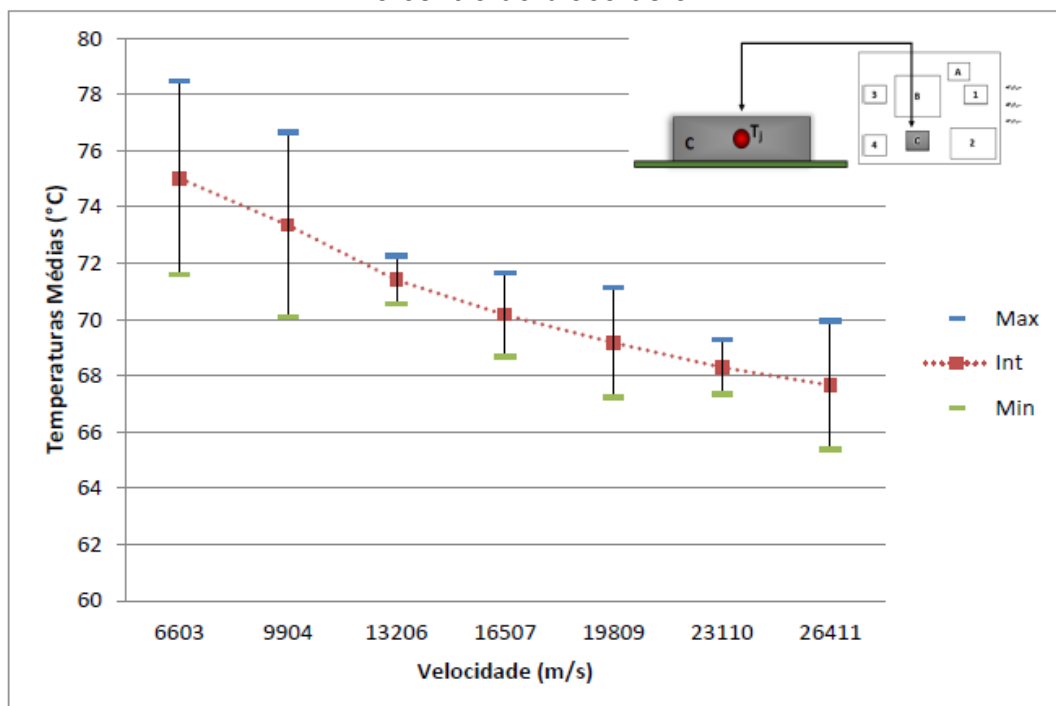
Fonte: Cunha (2014).

Tabela 10 - Valores das temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 3W

TERMOPAR INTERNO	Variação das temperaturas (em °C)			
	Velocidade (m/s)	Máxima	Média	Mínima
1,0		78,46	75,02	71,58
1,5		76,65	73,36	70,07
2,0		72,26	71,41	70,56
2,5		71,67	70,17	68,67
3,0		71,13	69,18	67,24
3,5		69,28	68,30	67,33
4,0		69,94	67,66	65,38

Fonte: Cunha (2014).

Figura 47 - Temperaturas mínimas e máximas obtidas a partir do termopar localizado no centro do bloco de 3W



Fonte: Cunha (2014).

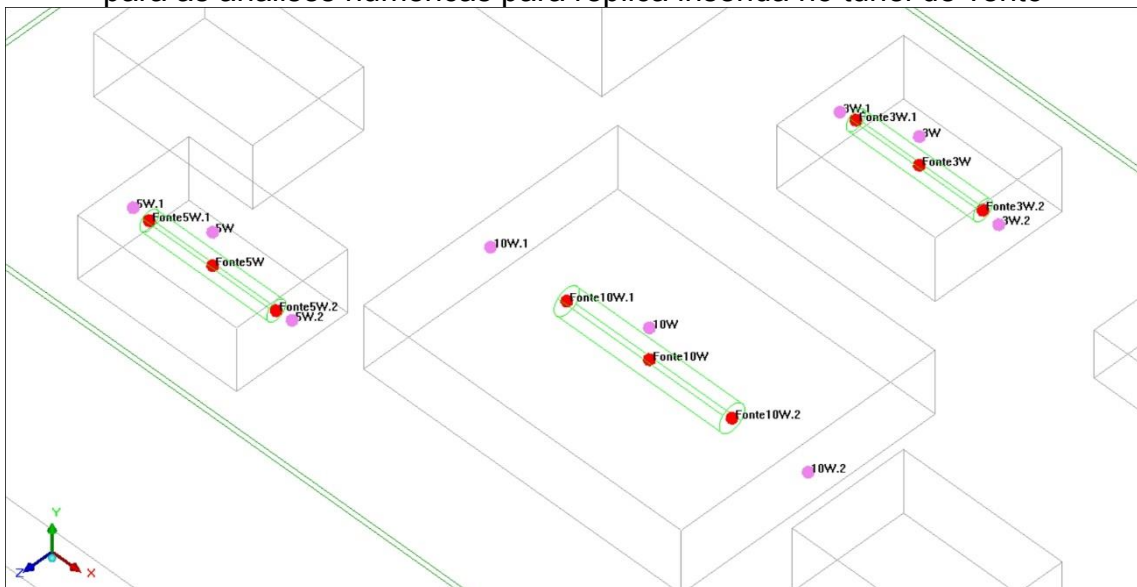
Importante ressaltar que para cada velocidade foram realizadas várias medidas obtendo um valor médio para cada caso e que tais velocidades foram escolhidas por serem as principais faixas de velocidades obtidas no resfriamento das cabines eletrônicas.

5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados obtidos numericamente podem ser vistos a seguir nos próximos tópicos. Sendo eles os resultados da réplica apenas na seção de teste e da réplica com fonte inserida no túnel de vento completo.

Teve-se o cuidado para que os pontos de monitoramento utilizados nas simulações fossem posicionados nos mesmos locais utilizados nos experimentos para os termopares. A Figura 48 mostra esse posicionamento dos pontos de monitoramento, que realizam medidas de velocidade e temperatura nas simulações. Os pontos 3W.1, 5W.1, 10W.1 realizam o monitoramento na superfície dos blocos a jusante do escoamento, os pontos 3W.2, 5W.2, 10W.2 realizam o monitoramento na superfície dos blocos a montante do escoamento e os pontos 3W, 5W, 10W realizam o monitoramento no centro da superfície da face superior dos blocos. Segue-se o mesmo padrão de nomenclatura para as fontes que aferem as temperaturas relativas as fontes de calor.

Figura 48 - Detalhes dos principais pontos de leitura de temperaturas e velocidade para as análises numéricas para réplica inserida no túnel de vento



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.1 Comparação entre os resultados numéricos e experimentais

A Tabela 11 mostra a diferença, em porcentagem, entre os resultados quantitativos obtidos experimentalmente e os resultados numéricos.

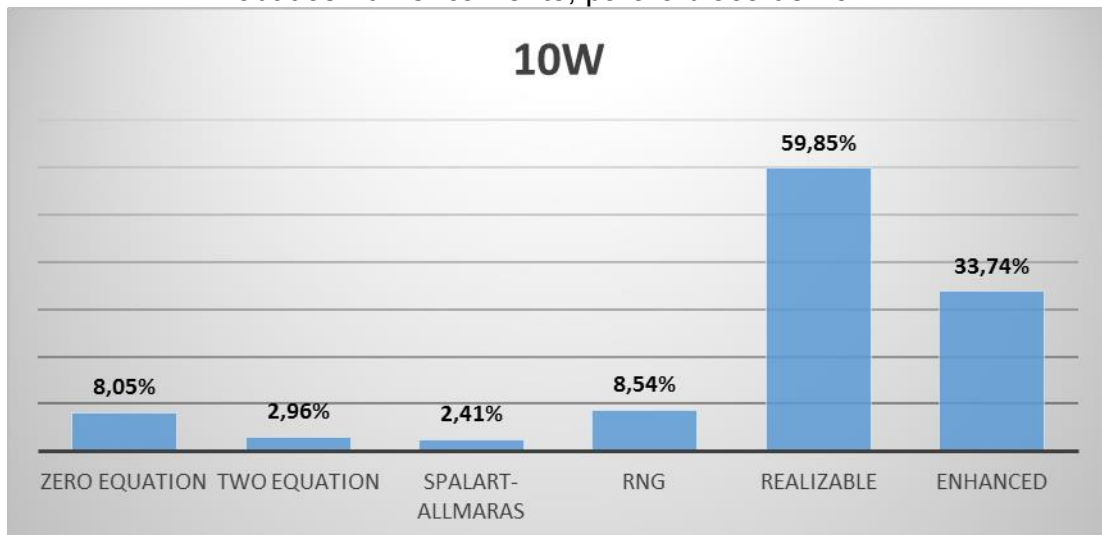
Tabela 11 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a uma velocidade de 3m/s, com diferentes modelos de turbulência

Placa - Velocidade 3 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	8,05%	2,96%	2,41%	8,54%	59,85%	33,74%	
5W	28,98%	16,46%	16,88%	3,07%	45,55%	51,55%	
3W	4,91%	10,74%	11,41%	16,50%	47,26%	14,22%	
Fonte10W	11,99%	47,84%	47,92%	8,07%	5,62%	18,44%	
Fonte5W	16,51%	33,13%	33,04%	14,11%	4,42%	23,34%	
Fonte3W	8,41%	39,65%	39,03%	6,48%	11,56%	14,84%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

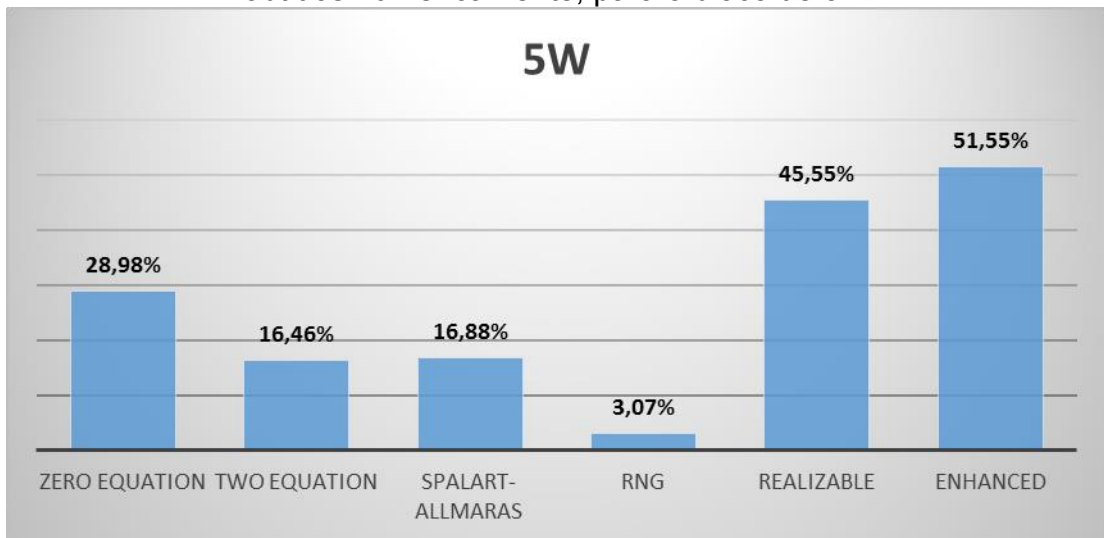
Para melhor avaliar os resultados, as Figuras 49 a 54 mostram os gráficos de comparação entre os resultados numéricos e os experimentais.

Figura 49 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para o bloco de 10W



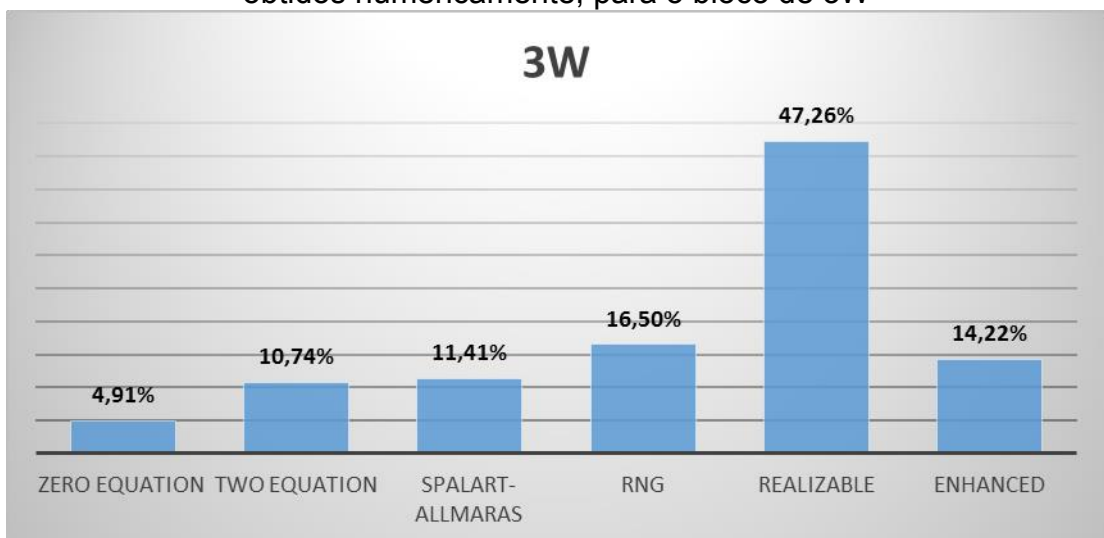
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para o bloco de 5W



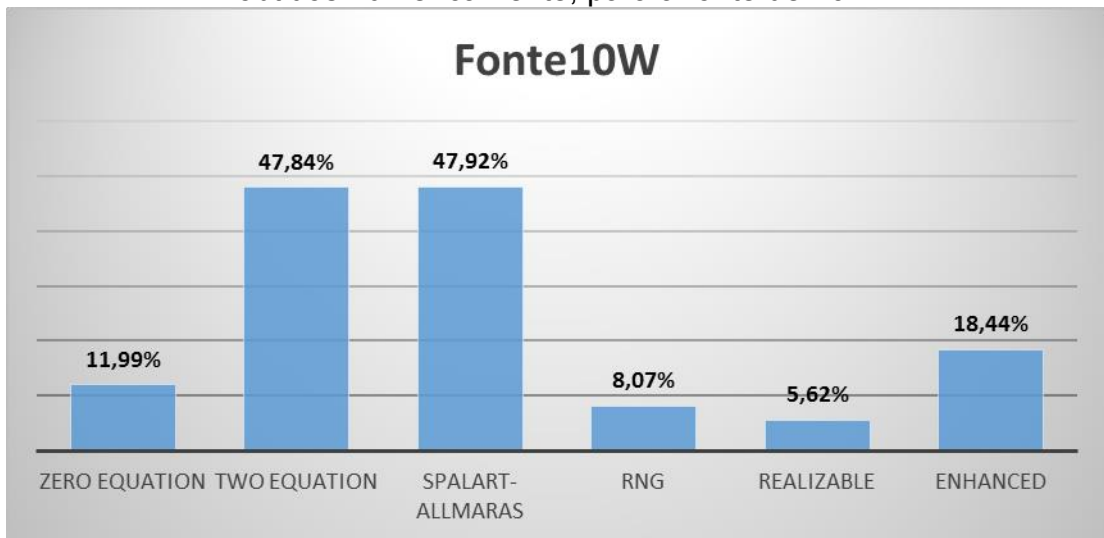
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 51 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para o bloco de 3W



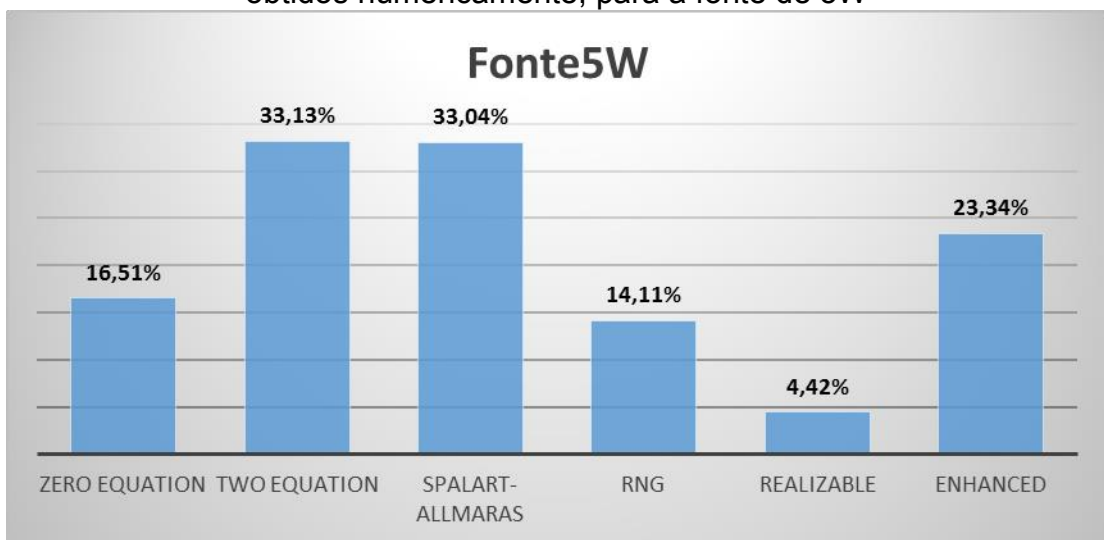
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 52 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para a fonte de 10W



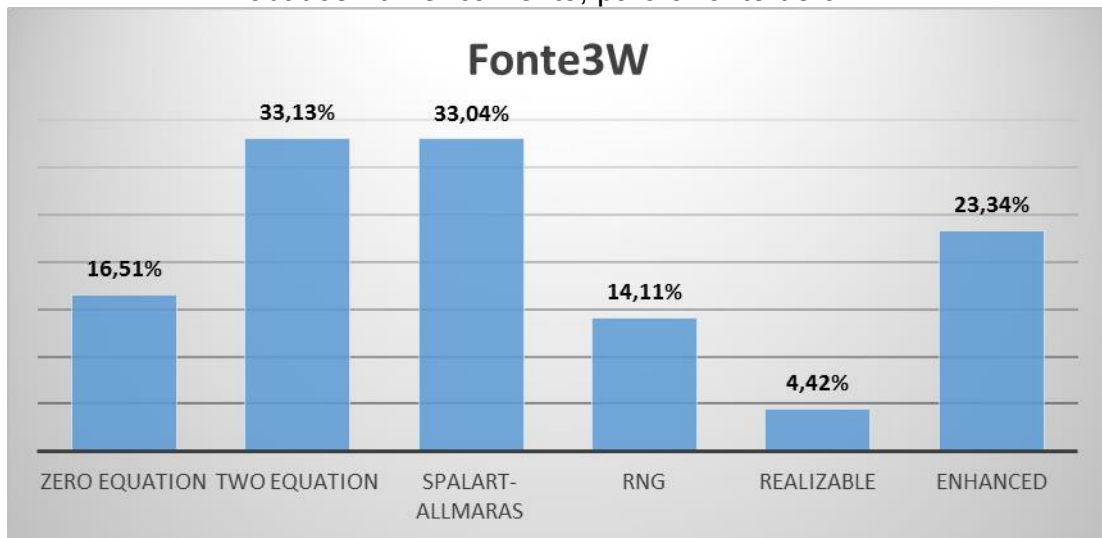
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 53 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para a fonte de 5W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

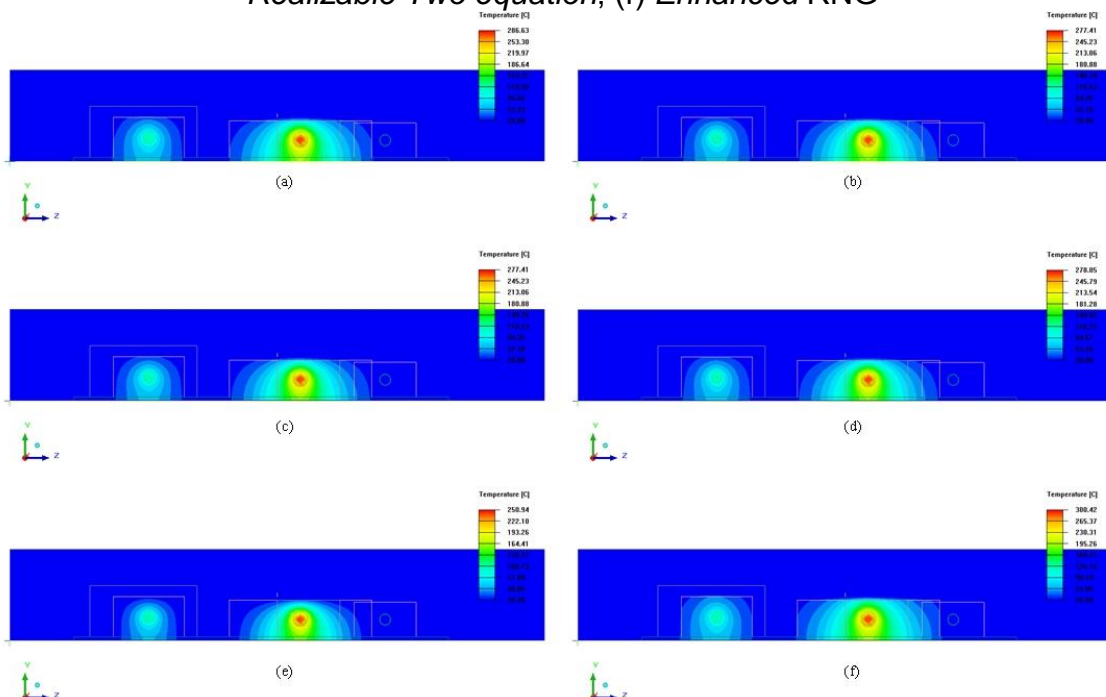
Figura 54 - Comparativo da diferença entre os resultados experimentais e os valores obtidos numericamente, para a fonte de 3W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

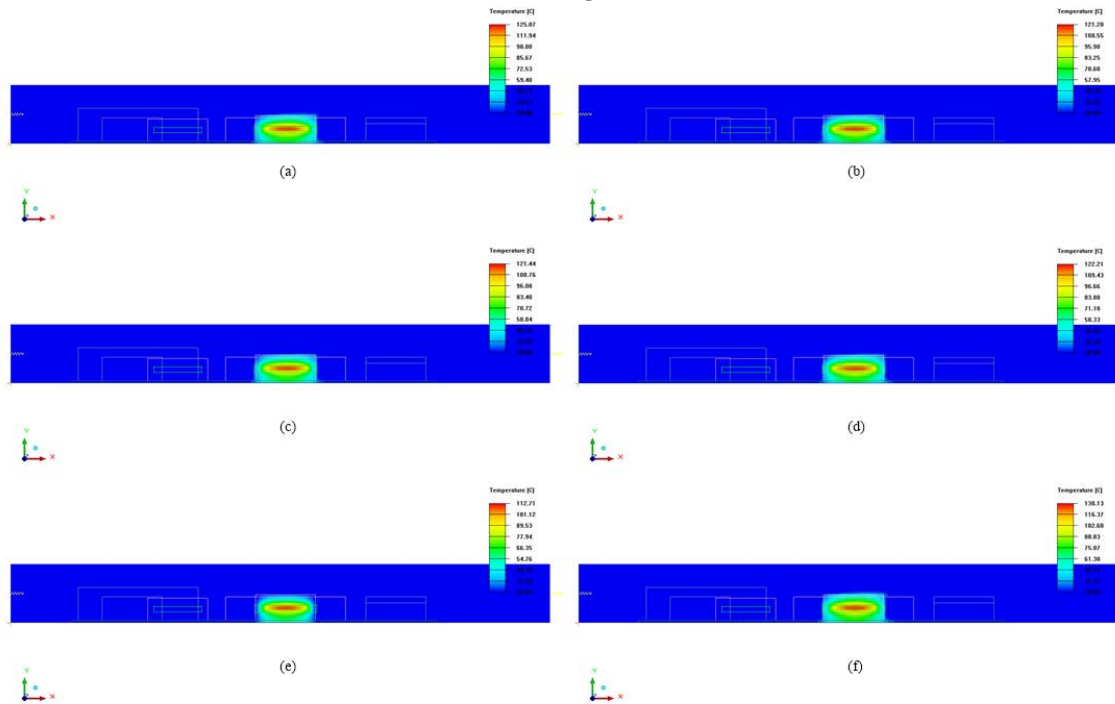
Além dos resultados quantitativos apresentados anteriormente, as Figuras 55 a 65 mostram o comportamento da placa quando submetida a uma velocidade de 3m/s e os resultados qualitativos obtidos para os 6 modelos de turbulência analisados nesse trabalho.

Figura 55 - Distribuição de temperatura, contornos no plano x, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



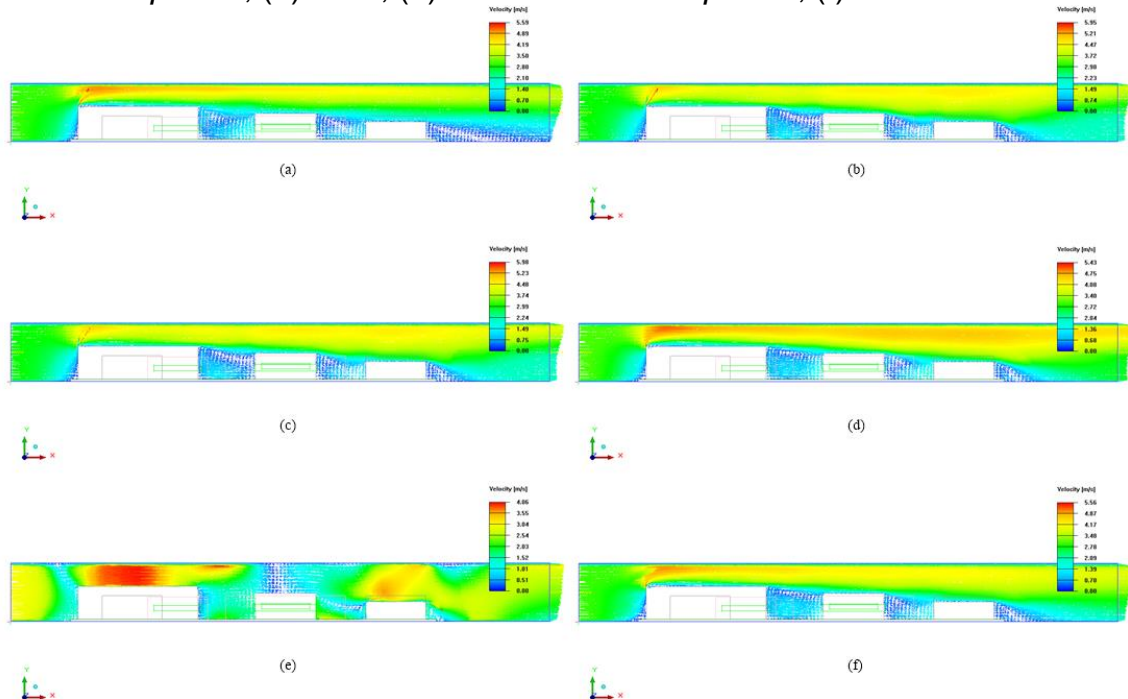
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 56 - Distribuição de temperatura, contornos no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



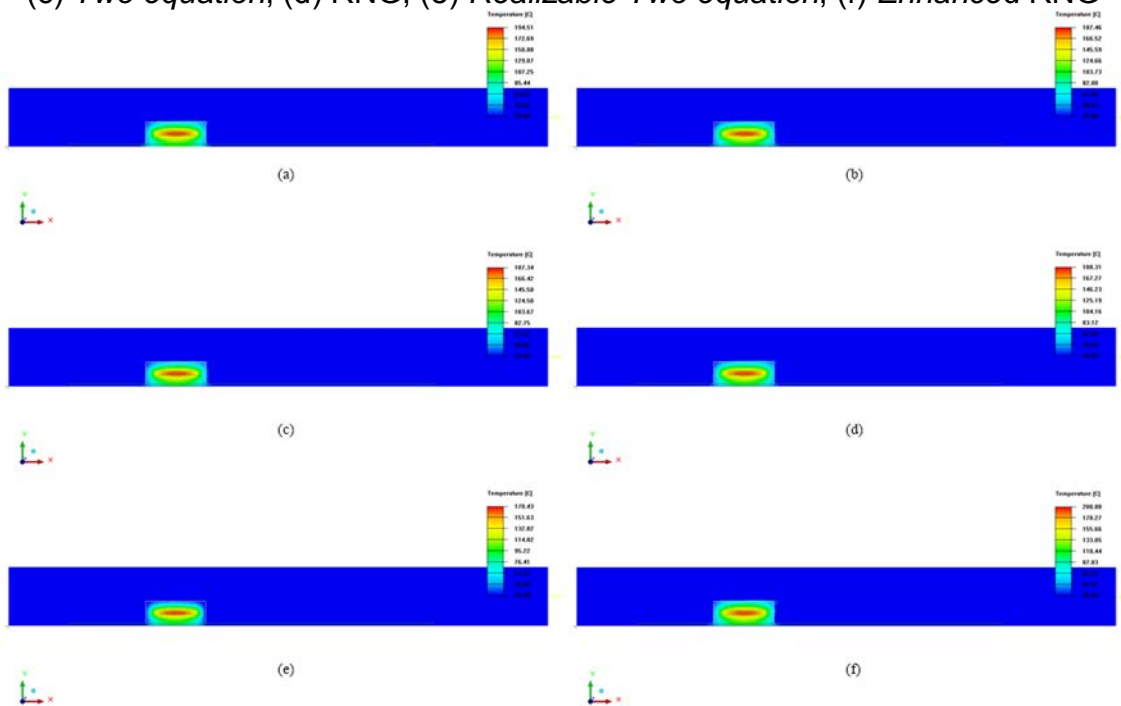
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 57 - Distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



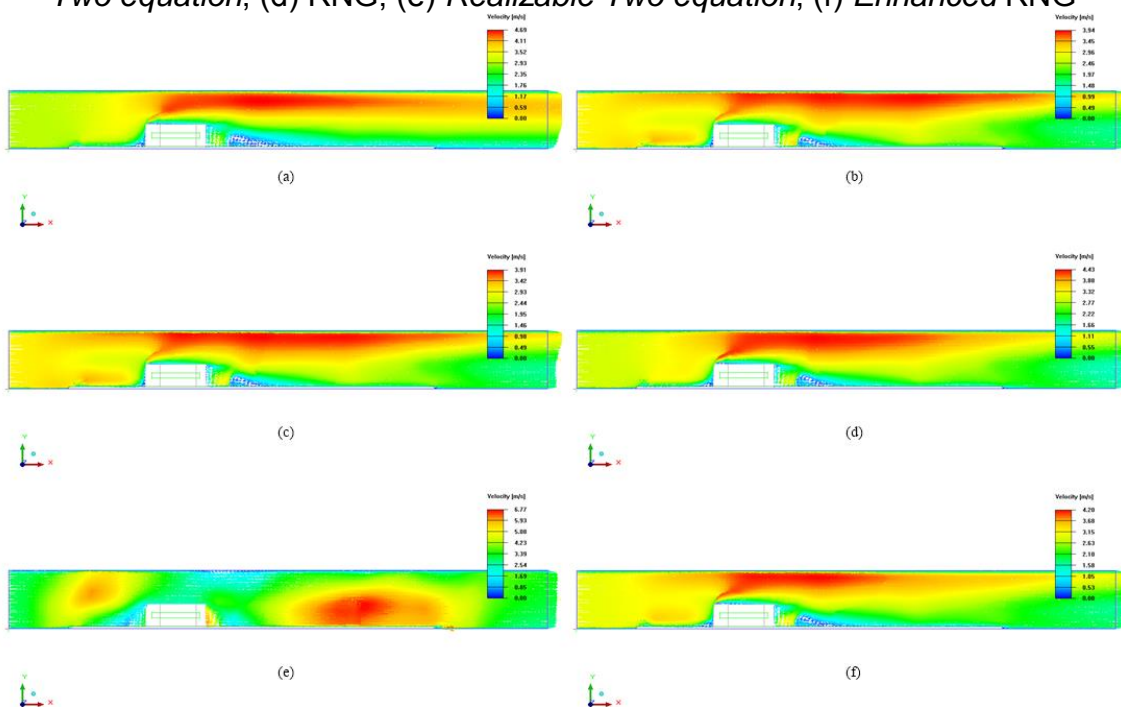
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 58 - Distribuição de temperatura, contornos no plano z, com referência o bloco 5W, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



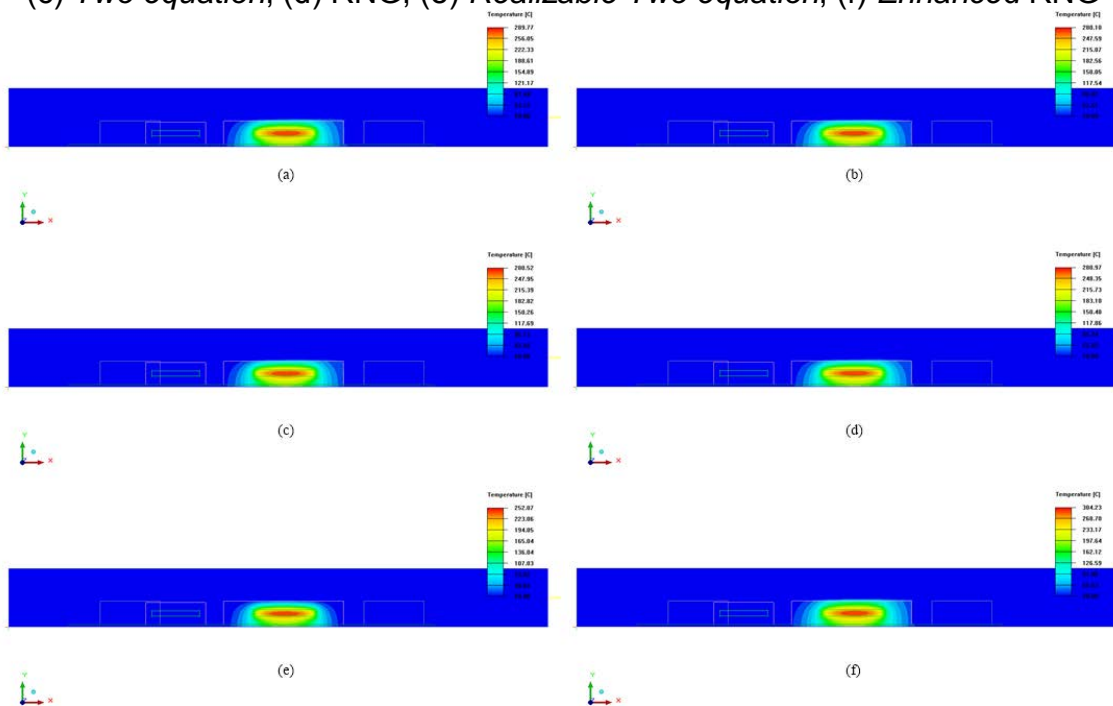
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 59 - Distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



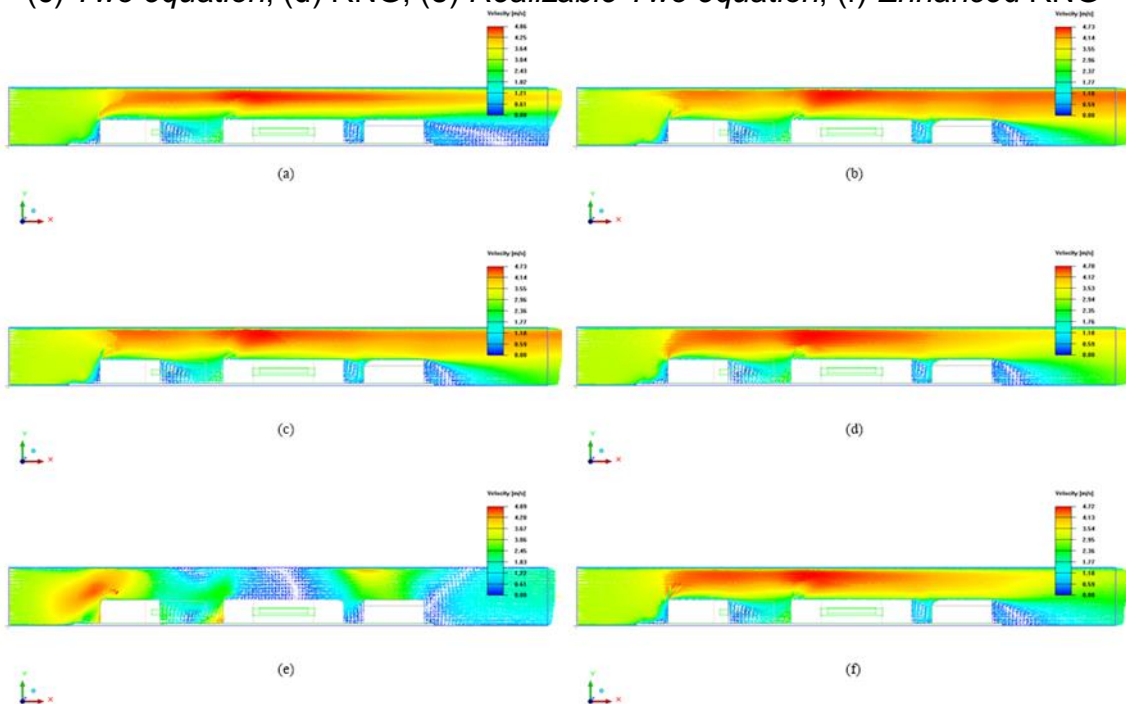
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 60 - Distribuição de temperatura, contornos no plano z com referência o bloco 10W, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



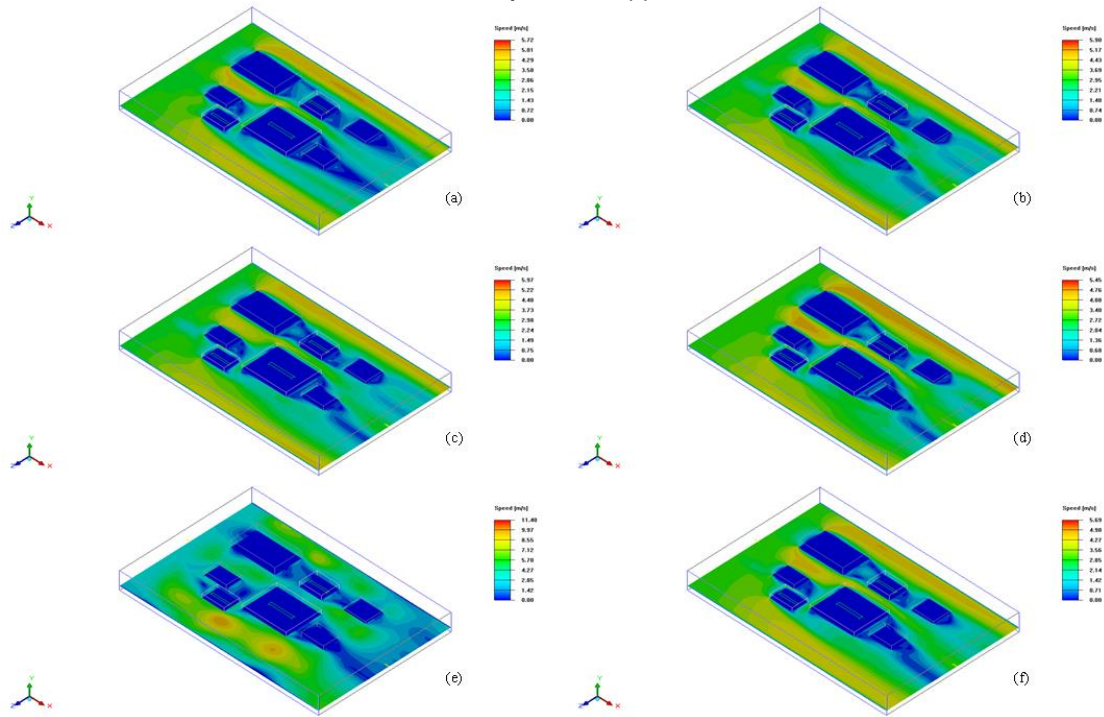
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 61 - Distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



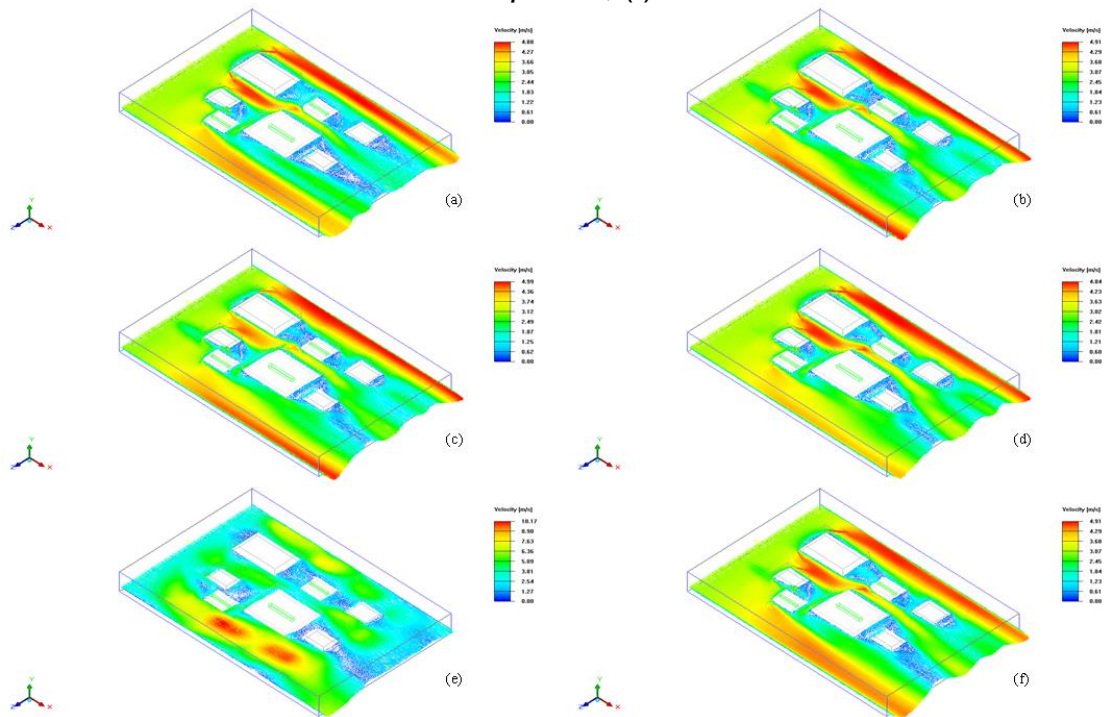
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 62 - Distribuição de velocidade, contornos no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



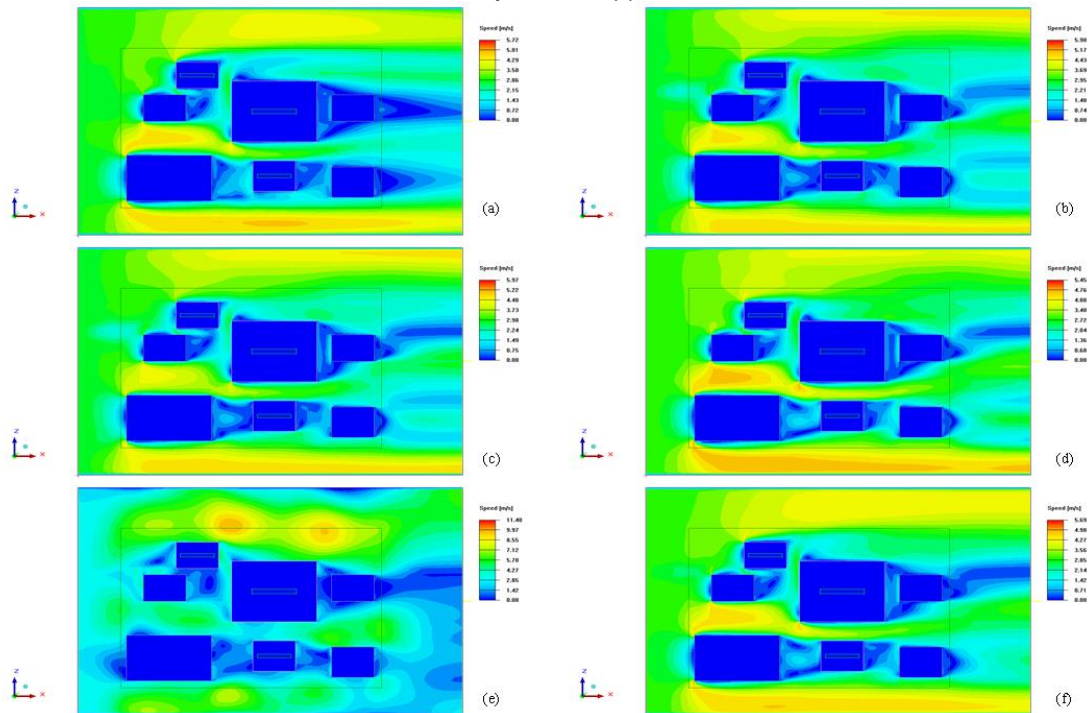
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 63 - Distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



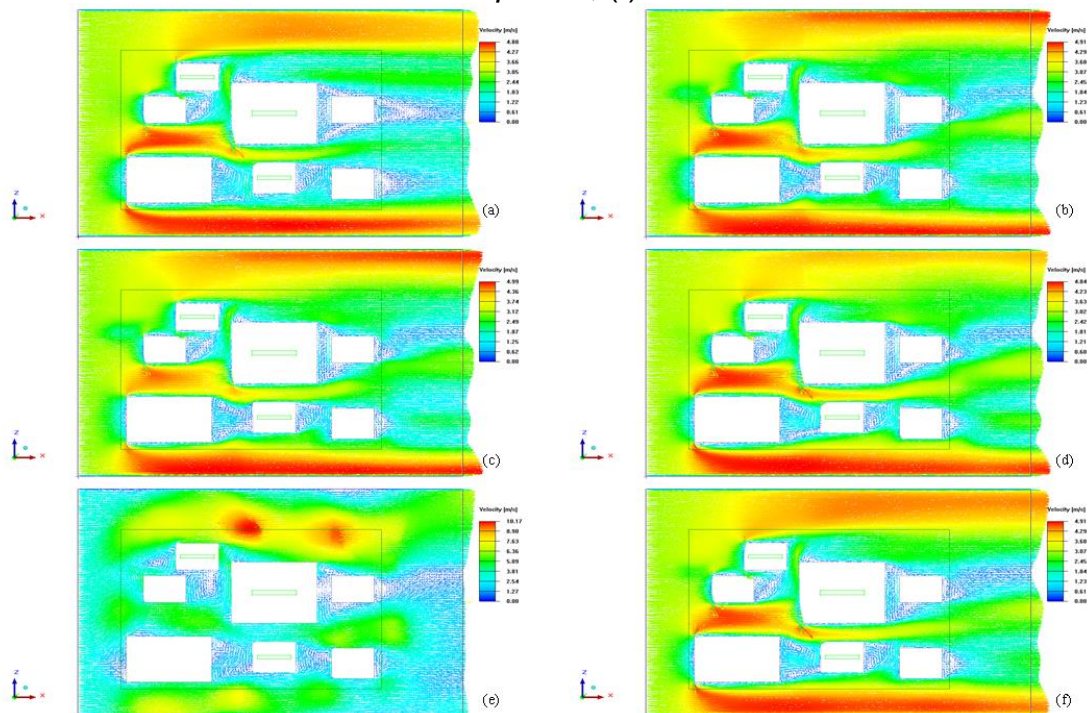
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 64 - Distribuição de velocidade, contornos no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 65 - Distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2 Comparativo dos modelos de turbulência à diferentes velocidades

As velocidades utilizadas variaram de 1,0 m/s a 4,0 m/s com um passo de 0,5 m/s entre cada caso, totalizando 7 velocidades de estudo (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 m/s), por serem as mais utilizadas na indústria para essa situação estudada;

A seguir as tabelas mostram os resultados quantitativos entre a diferença dos resultados experimentais e numéricos para as 7 velocidades de estudo adotadas e os 6 modelos de turbulência escolhidos. Além do tempo gasto nas simulações para cada modelo de turbulência. E por fim as figuras mostram um comparativo qualitativos entre as diferenças entre os modelos turbulência e para as velocidades adotadas.

5.3.2.1 Velocidade de 1,0m/s

A Tabela 12 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 1m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 12 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 1m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 1 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	6,02%	5,34%	5,47%	4,98%	3,67%	7,41%	
5W	13,43%	9,46%	8,91%	11,62%	10,53%	11,86%	
3W	8,85%	8,01%	7,84%	8,47%	7,95%	5,86%	
Fonte 10W	2,73%	2,07%	2,16%	1,69%	0,31%	2,13%	
Fonte 5W	20,82%	16,47%	16,19%	17,98%	17,66%	16,37%	
Fonte 3W	9,13%	8,01%	7,84%	8,92%	7,62%	9,51%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 13 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 1m/s

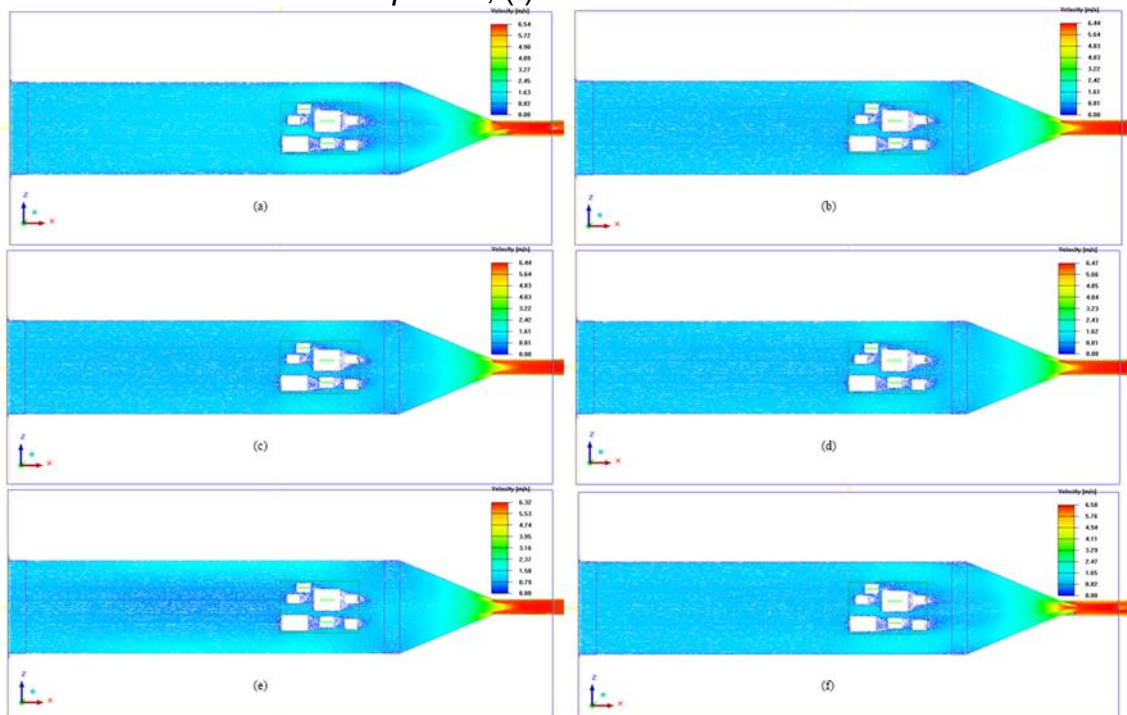
Tabela 13 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 1m/s

<i>Tempo de processamento com velocidade de 1m/s</i>	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	1:52:09
Spalart-Allmaras	14:50:02
Two Equation Padrão	6:39:01
RNG	8:13:13
Realizable two equation	8:48:54
Enhanced RNG	5:01:08
TOTAL	45:24:27

Fonte: Elaboração do próprio autor.

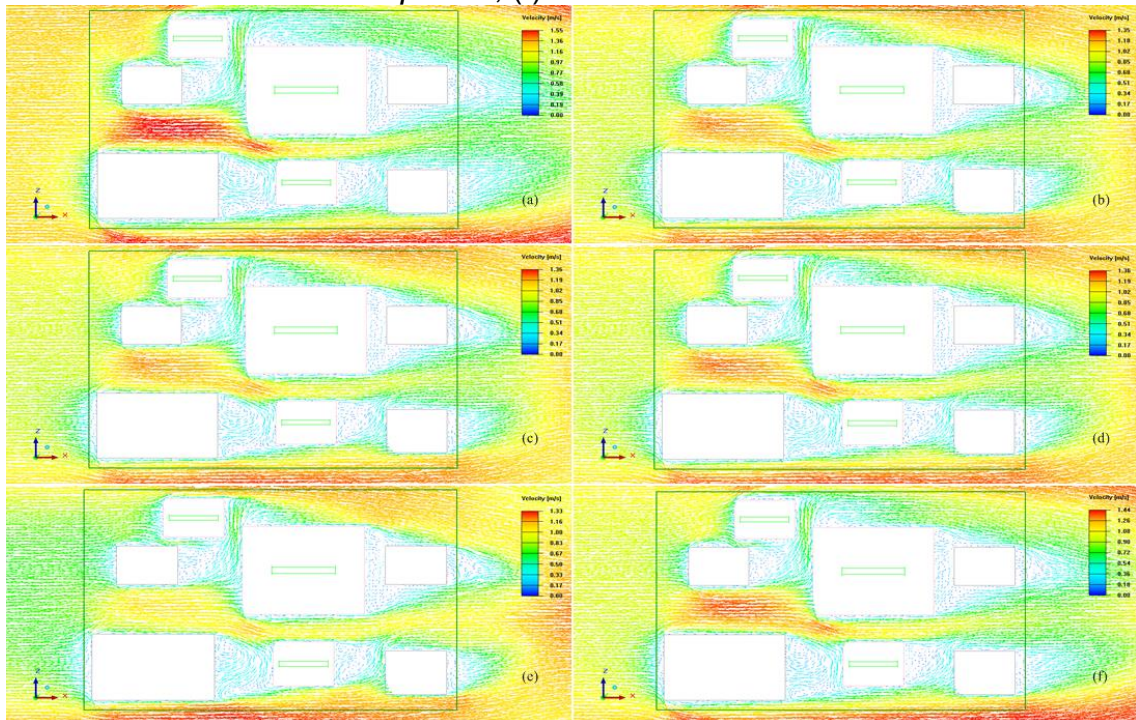
As Figuras de 66 a 72 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 1m/s

Figura 66 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



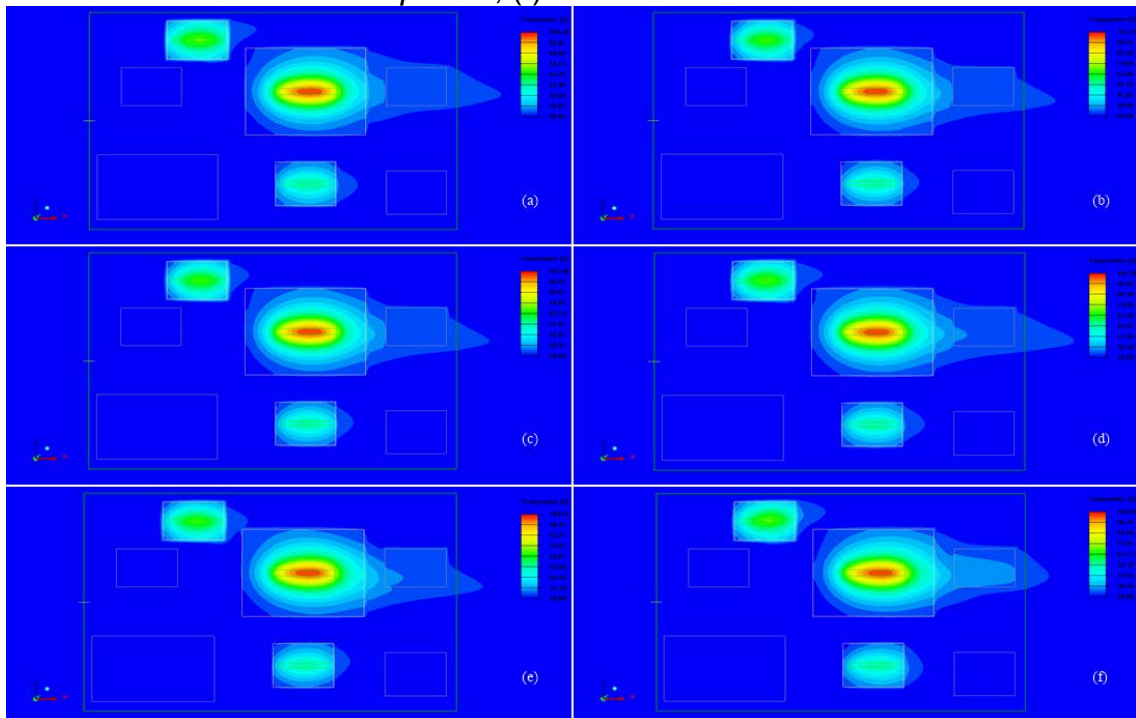
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 67 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



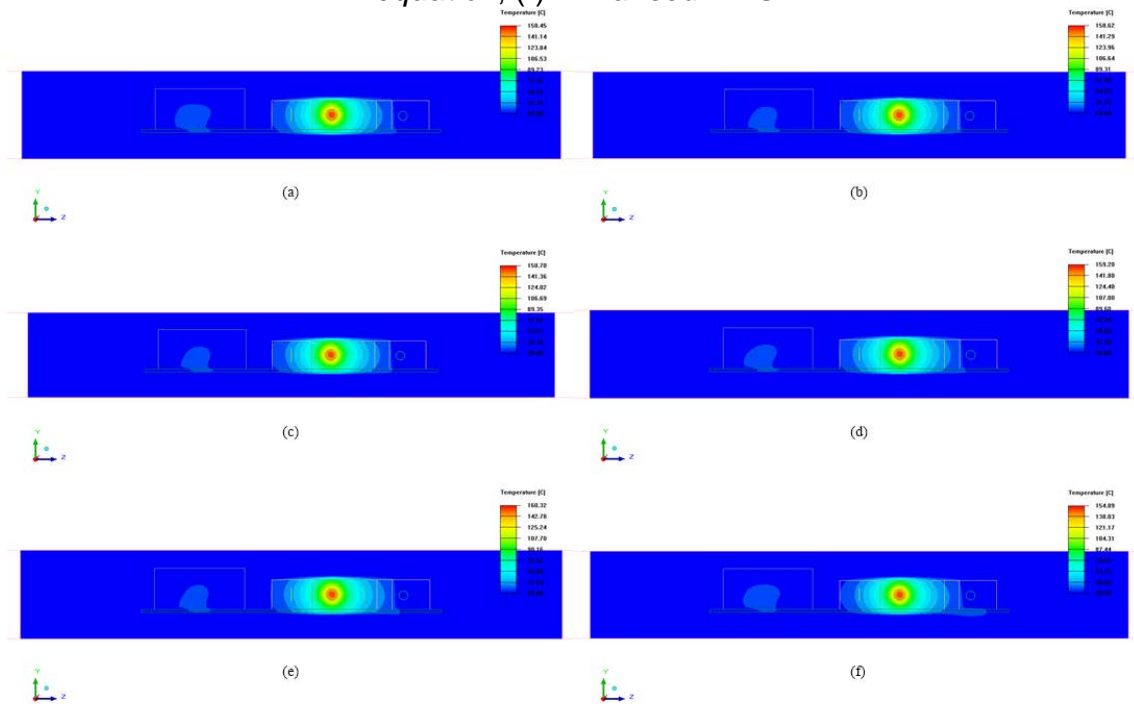
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 68 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



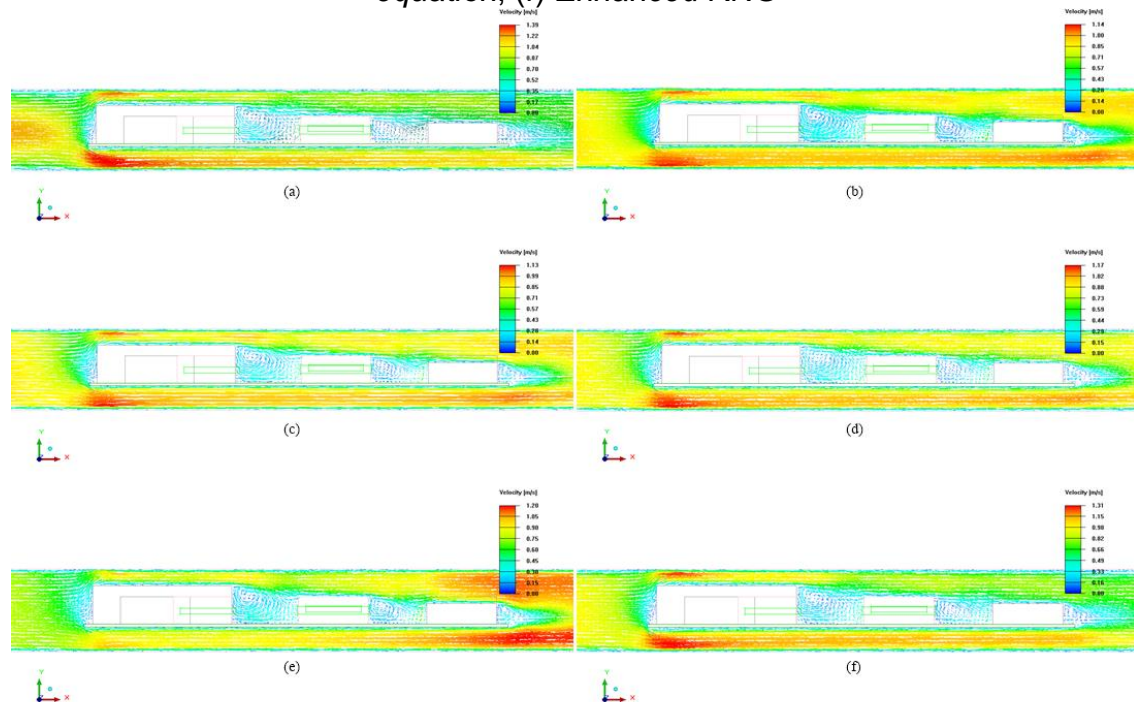
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 69 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



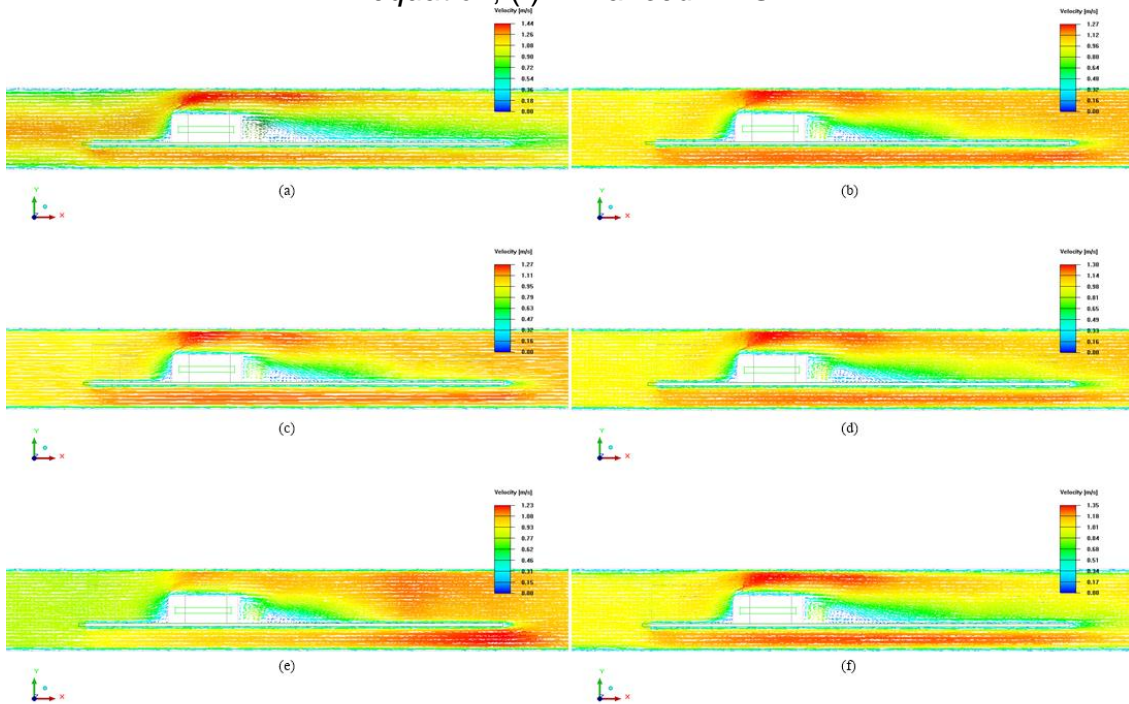
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 70 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



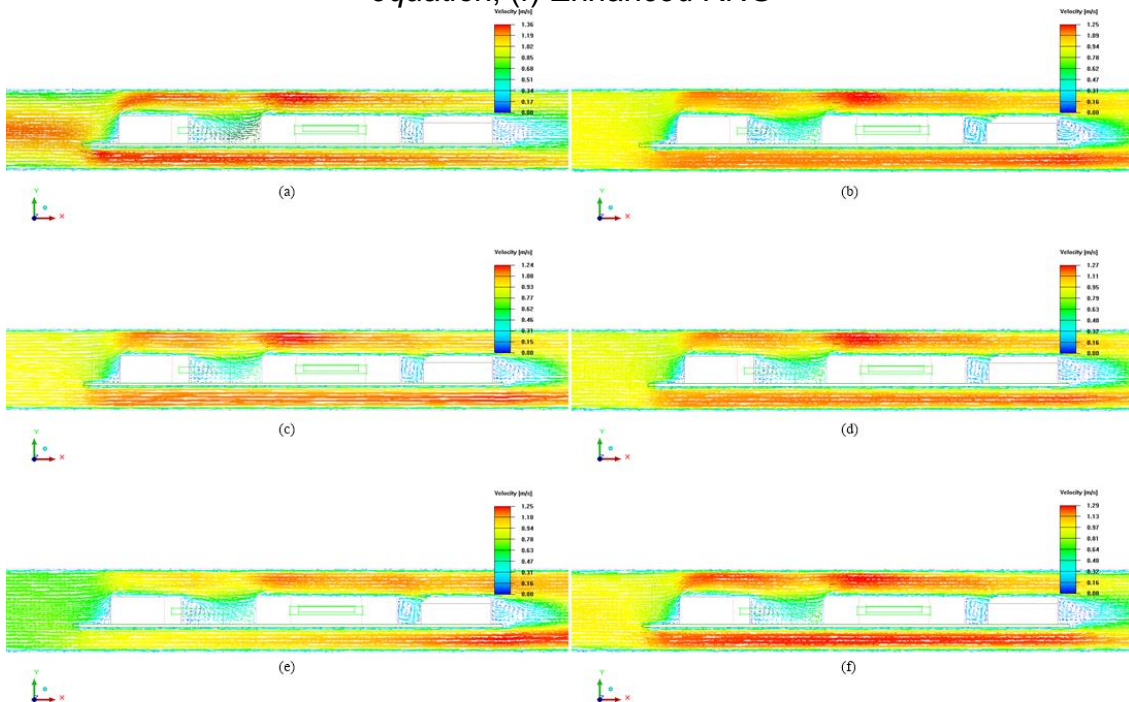
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 71 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 72 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 1m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2.2 Velocidade de 1,5m/s

A Tabela 14 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 1,5m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 14 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 1,5 m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 1,5 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	1,59%	1,33%	0,96%	0,62%	0,42%	9,69%	
5W	22,86%	13,43%	14,15%	16,40%	10,75%	14,98%	
3W	10,97%	10,62%	10,77%	10,90%	8,82%	2,94%	
Fonte 10W	1,25%	1,29%	1,13%	0,63%	0,32%	3,74%	
Fonte 5W	24,91%	17,83%	18,20%	19,92%	17,15%	16,82%	
Fonte 3W	7,93%	7,60%	7,77%	8,43%	5,45%	5,61%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 15 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 1,5m/s

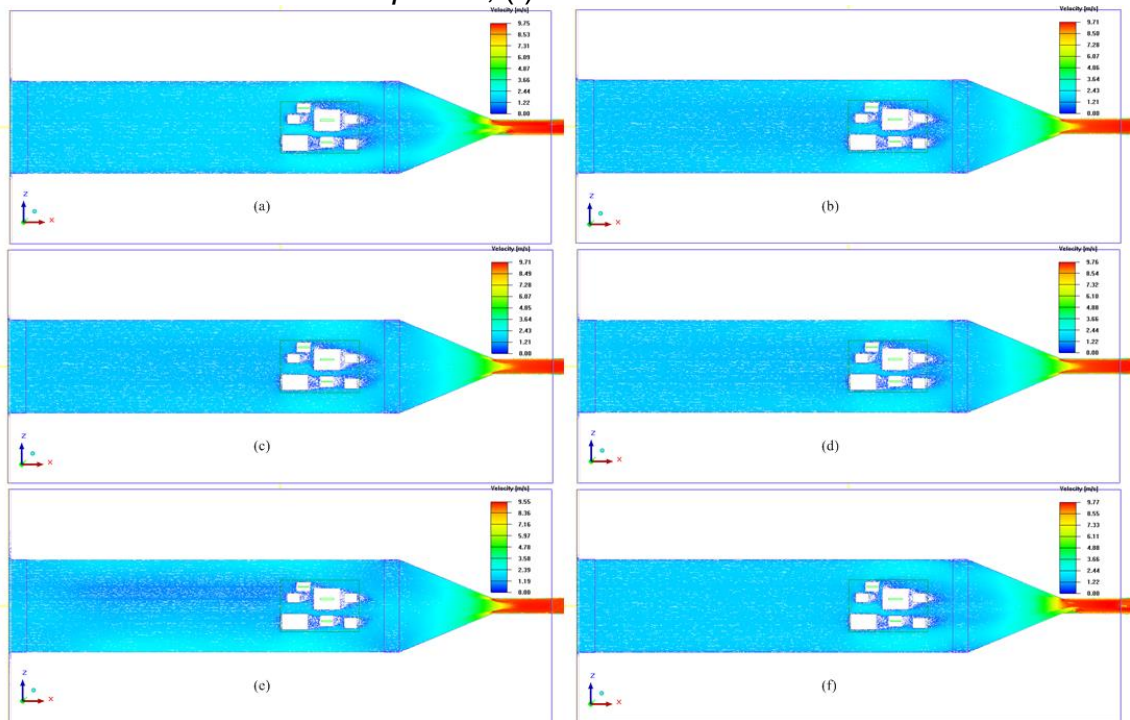
Tabela 15 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 1,5m/s

Tempo de processamento com velocidade de 1,5m/s	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	3:03:37
Spalart-Allmaras	13:27:08
Two Equation Padrão	7:20:20
RNG	6:03:00
Realizable two equation	5:55:02
Enhanced RNG	4:41:42
TOTAL	40:30:49

Fonte: Elaboração do próprio autor.

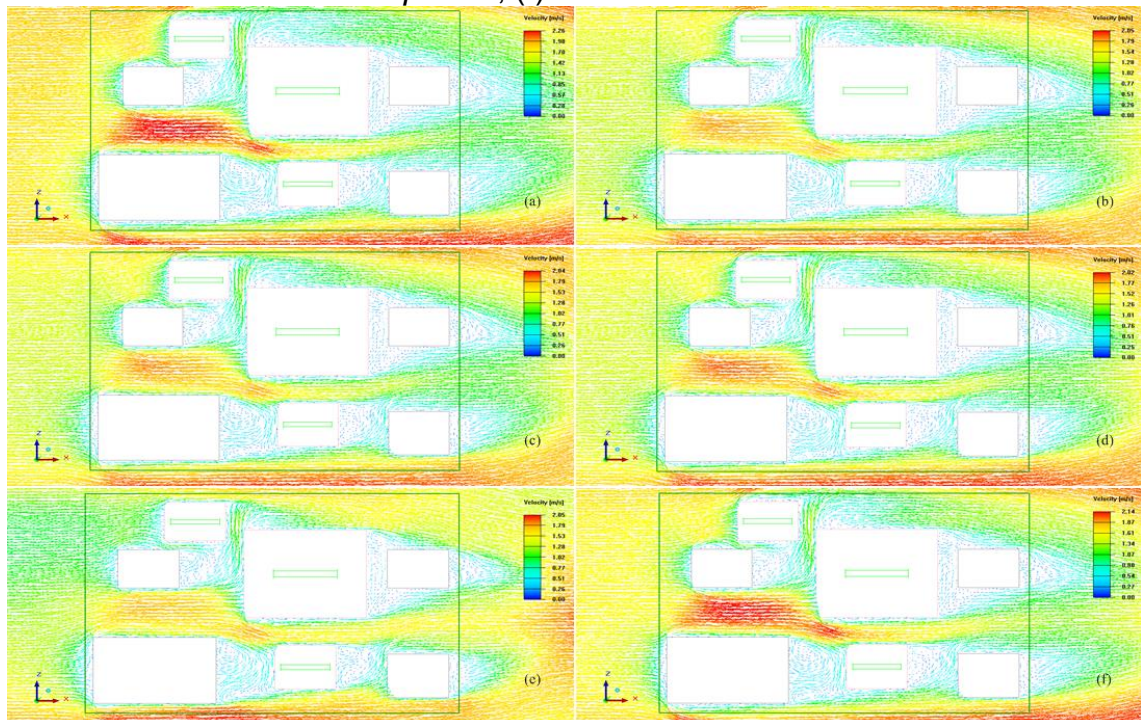
As Figuras de 73 a 79 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 1,5m/s

Figura 73 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



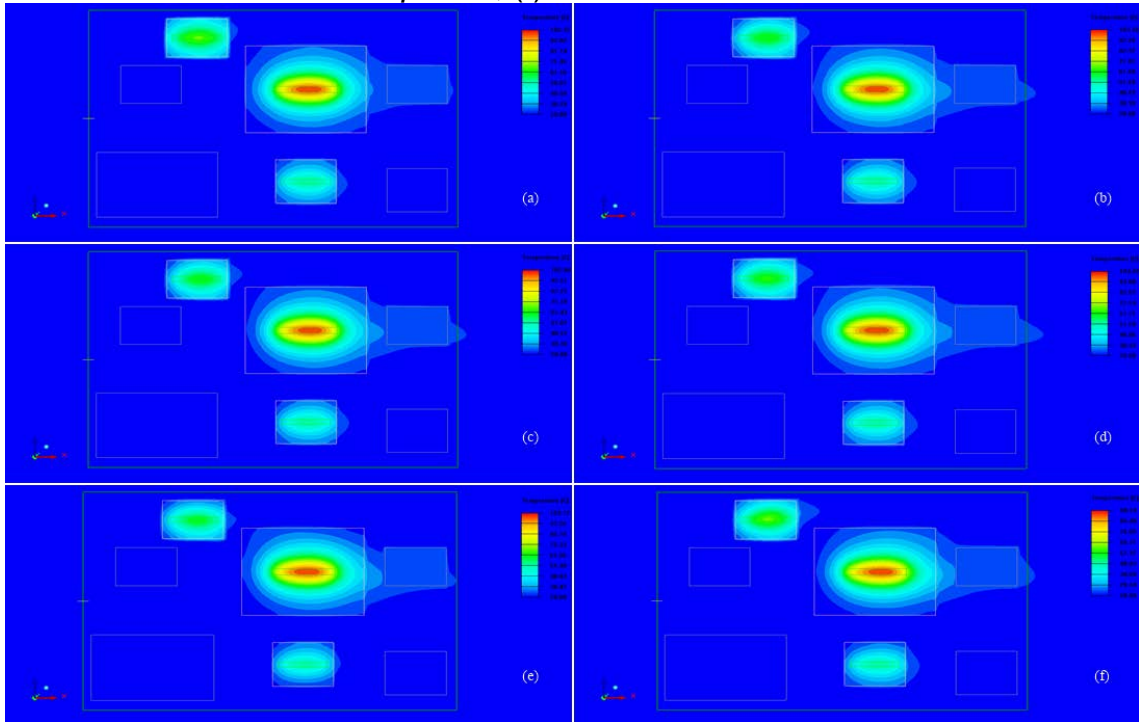
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 74 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



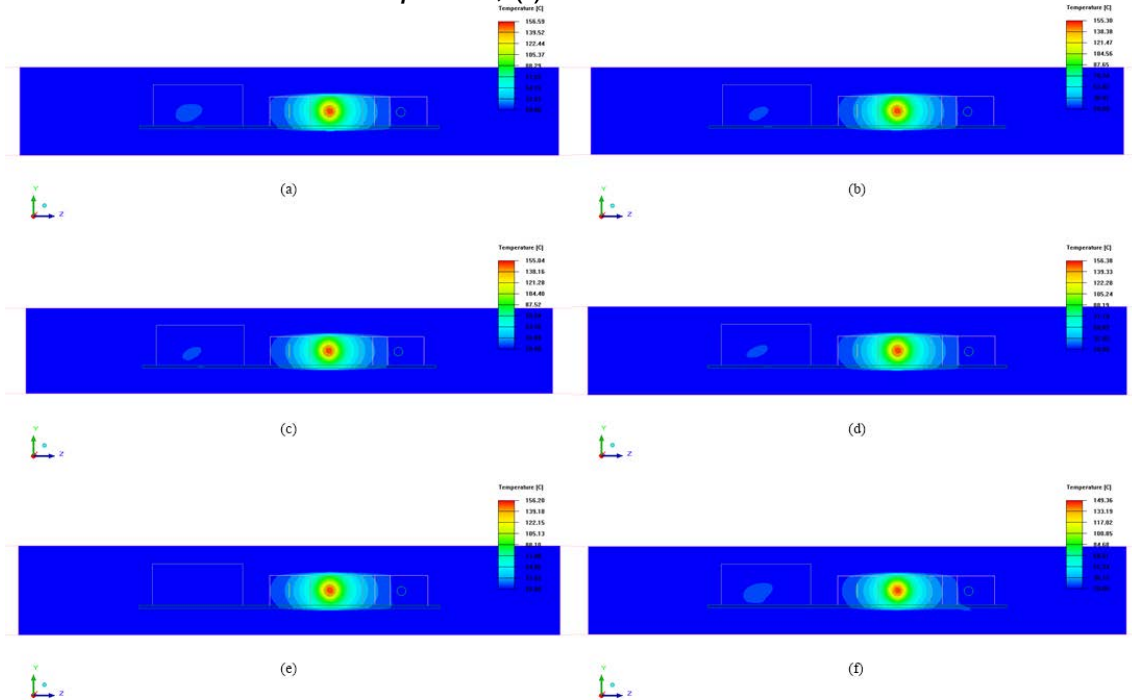
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 75 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y e da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



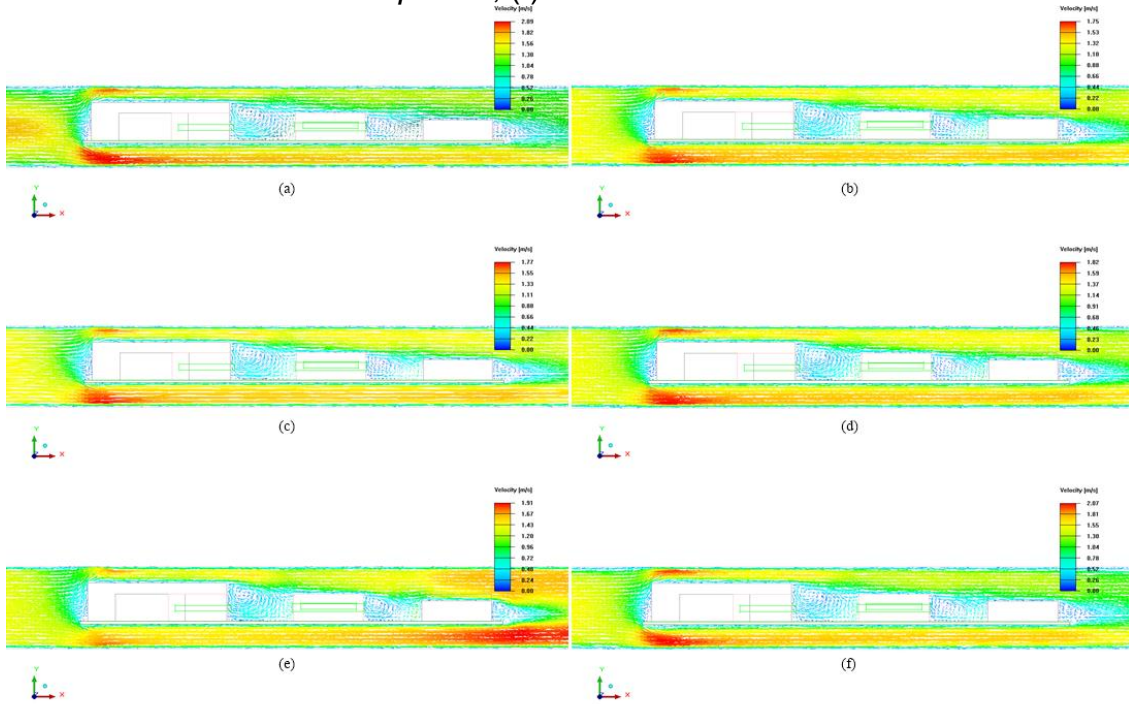
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 76 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



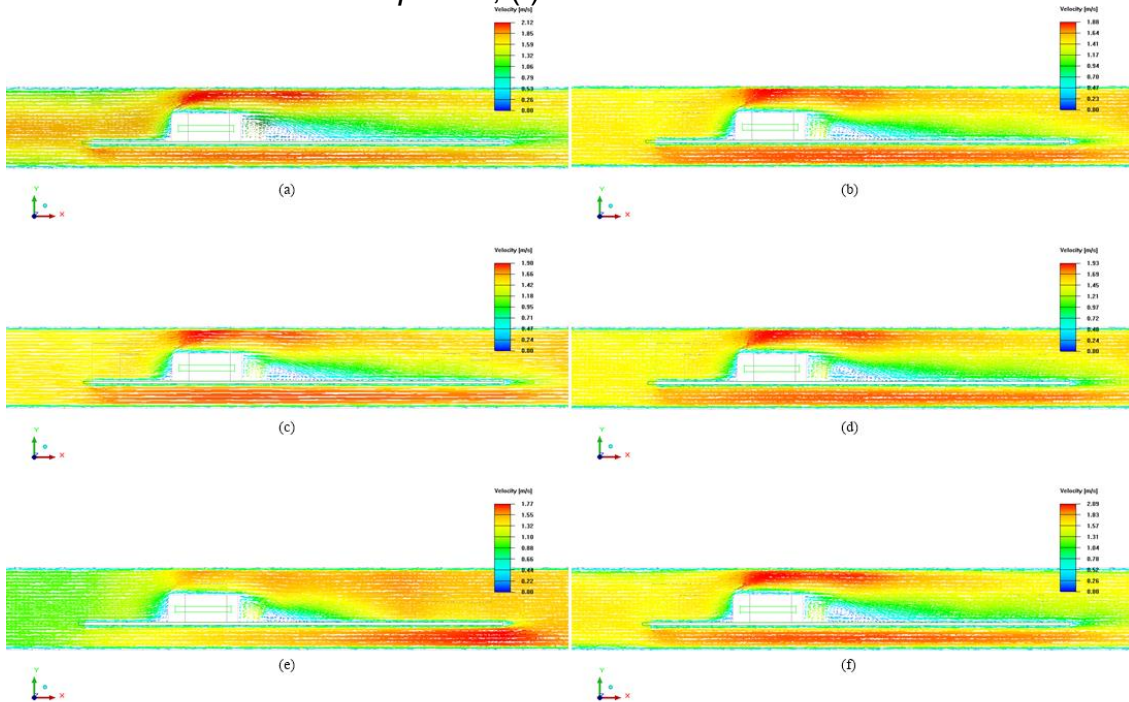
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 77 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



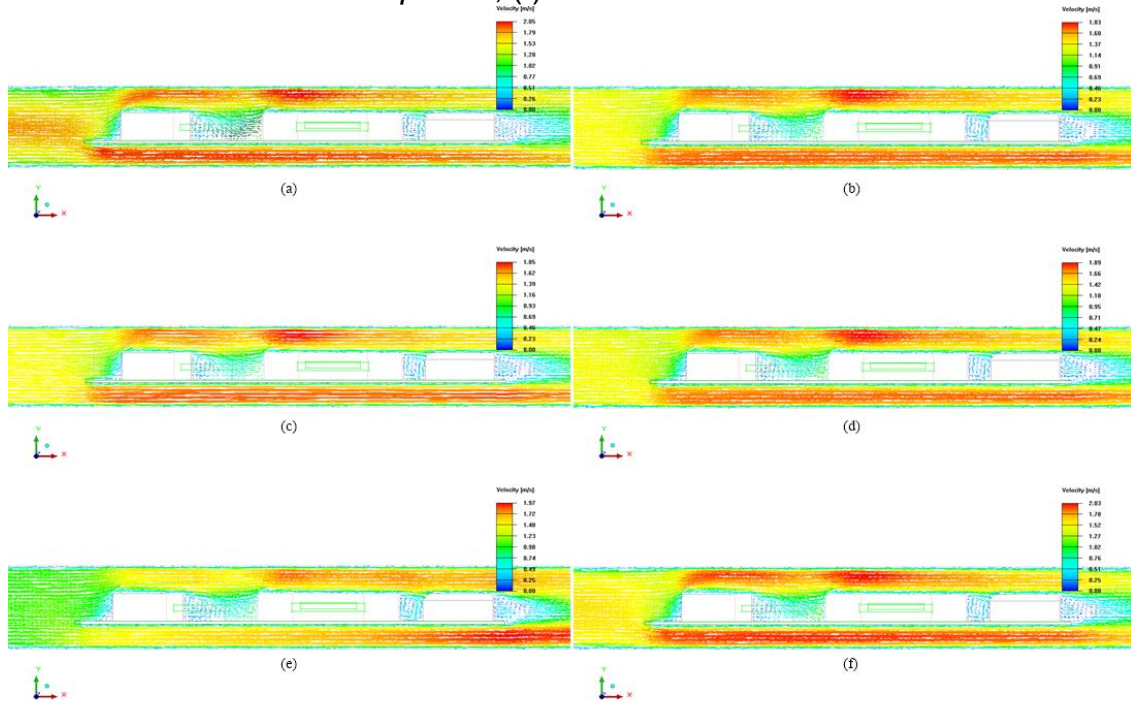
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 78 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 79 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 1,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2.3 Velocidade de 2,0m/s

A Tabela 16 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 2m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 16 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 2 m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 2 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	5,04%	1,81%	0,84%	0,93%	2,51%	8,25%	
5W	29,88%	13,77%	14,98%	17,39%	11,11%	15,88%	
3W	13,83%	9,51%	11,51%	13,04%	11,28%	2,58%	
Fonte10W	1,18%	1,12%	0,82%	0,09%	0,60%	3,72%	
Fonte5W	27,64%	17,08%	17,82%	19,66%	16,90%	16,63%	
Fonte3W	8,83%	6,42%	7,85%	8,71%	6,45%	4,89%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 17 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 2m/s

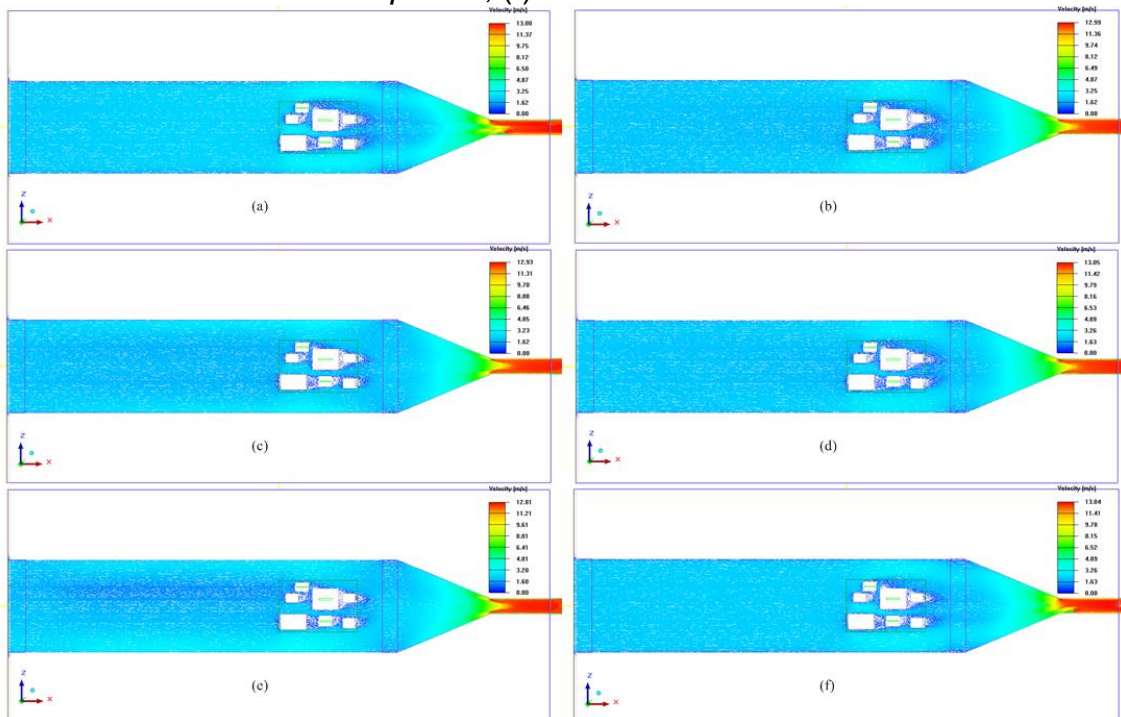
Tabela 17 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 2m/s

<i>Tempo de processamento com velocidade de 2m/s</i>	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	3:04:31
Spalart-Allmaras	13:43:31
Two Equation Padrão	5:30:33
RNG	5:09:09
Realizable two equation	6:37:48
Enhanced RNG	4:56:26
TOTAL	39:01:58

Fonte: Elaboração do próprio autor.

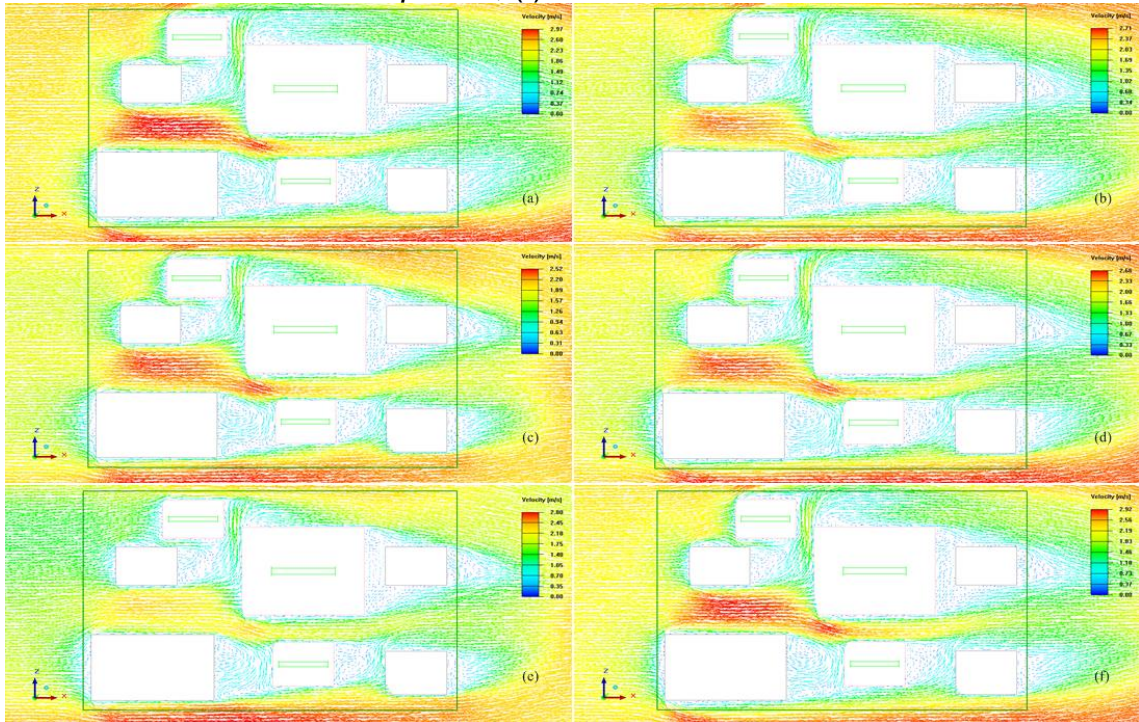
As Figuras de 80 a 86 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 2m/s

Figura 80 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



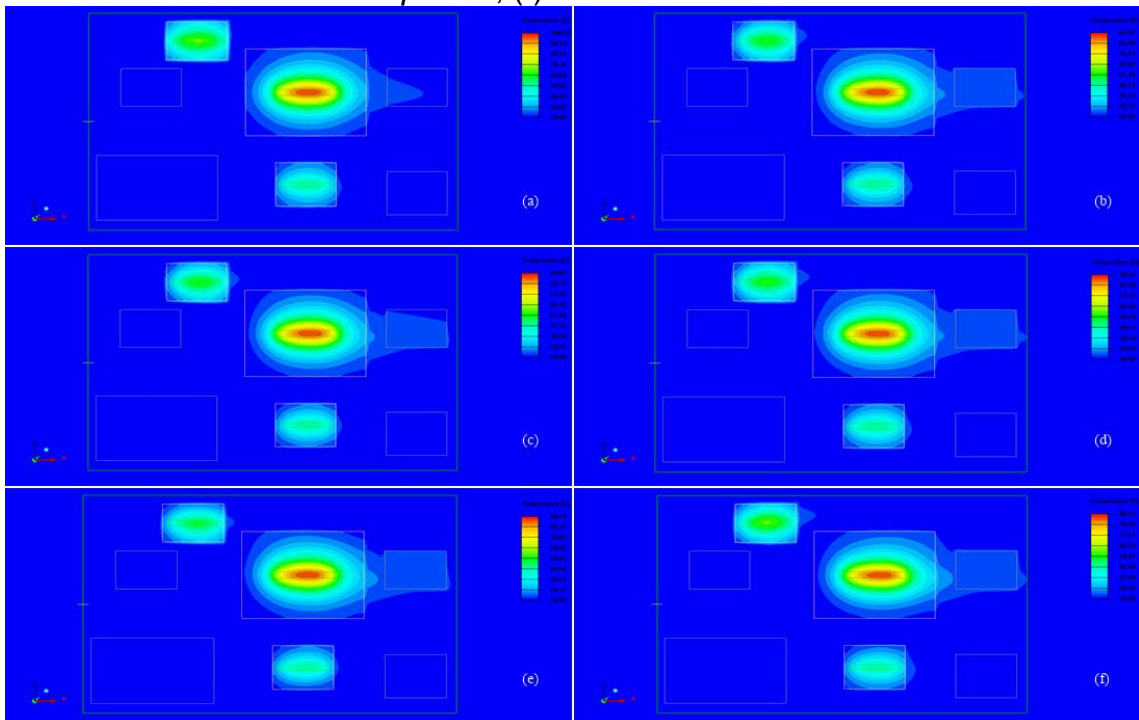
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 81 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



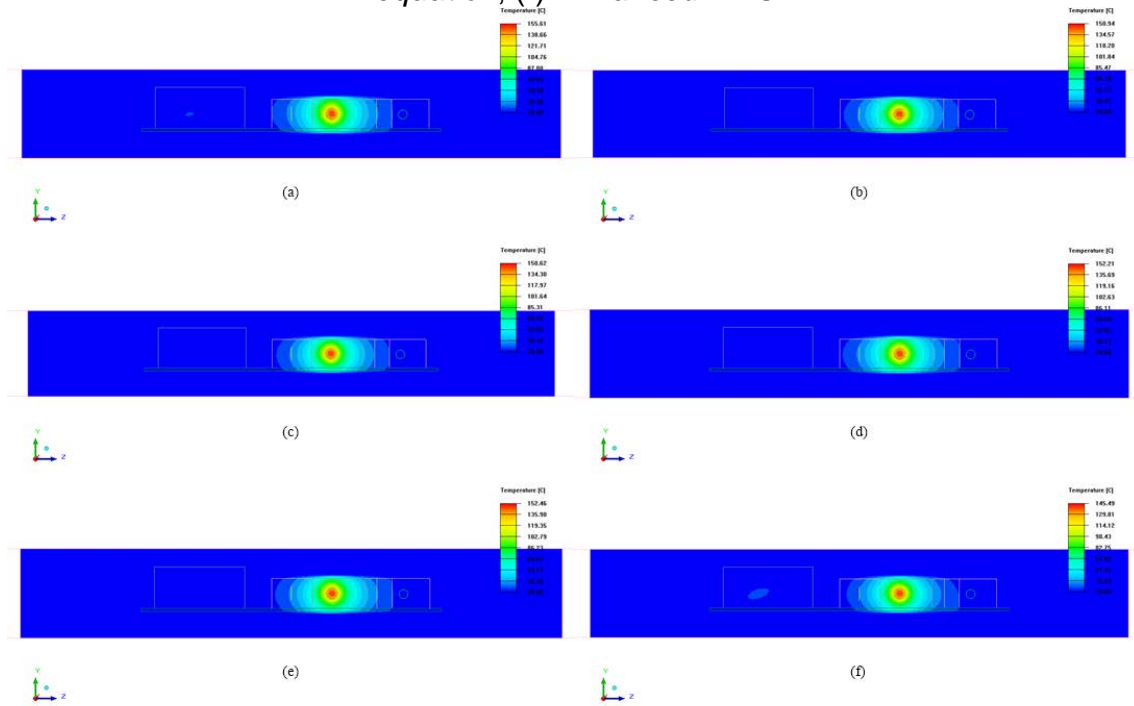
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 82 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



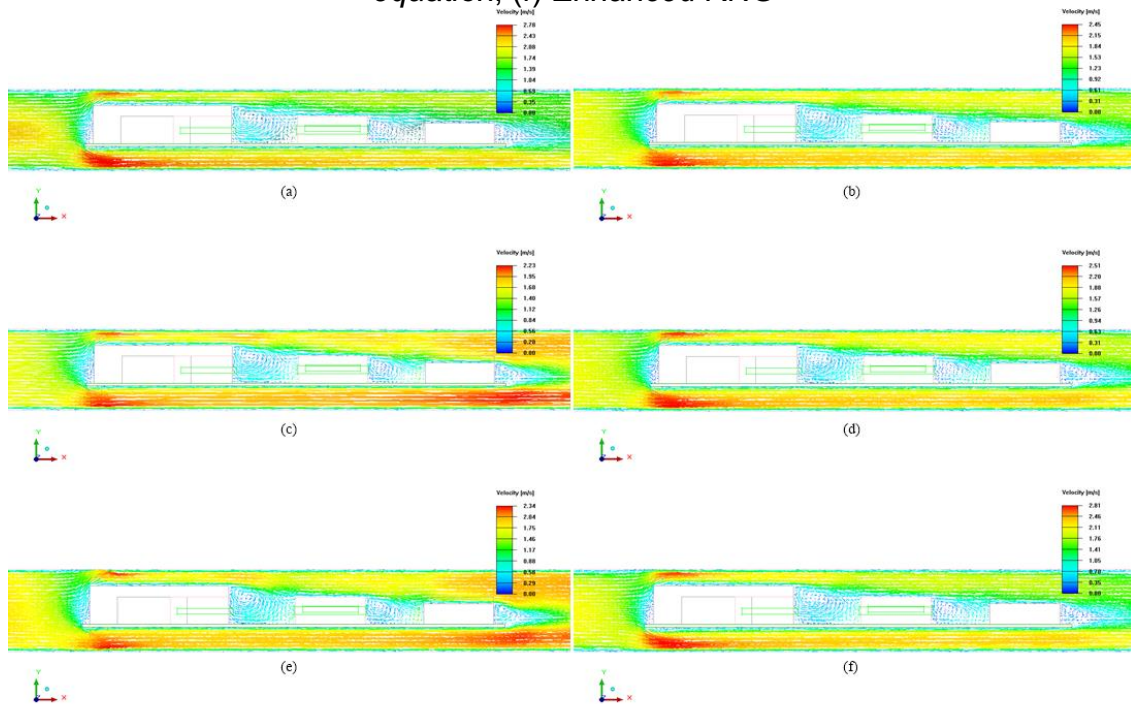
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 83 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



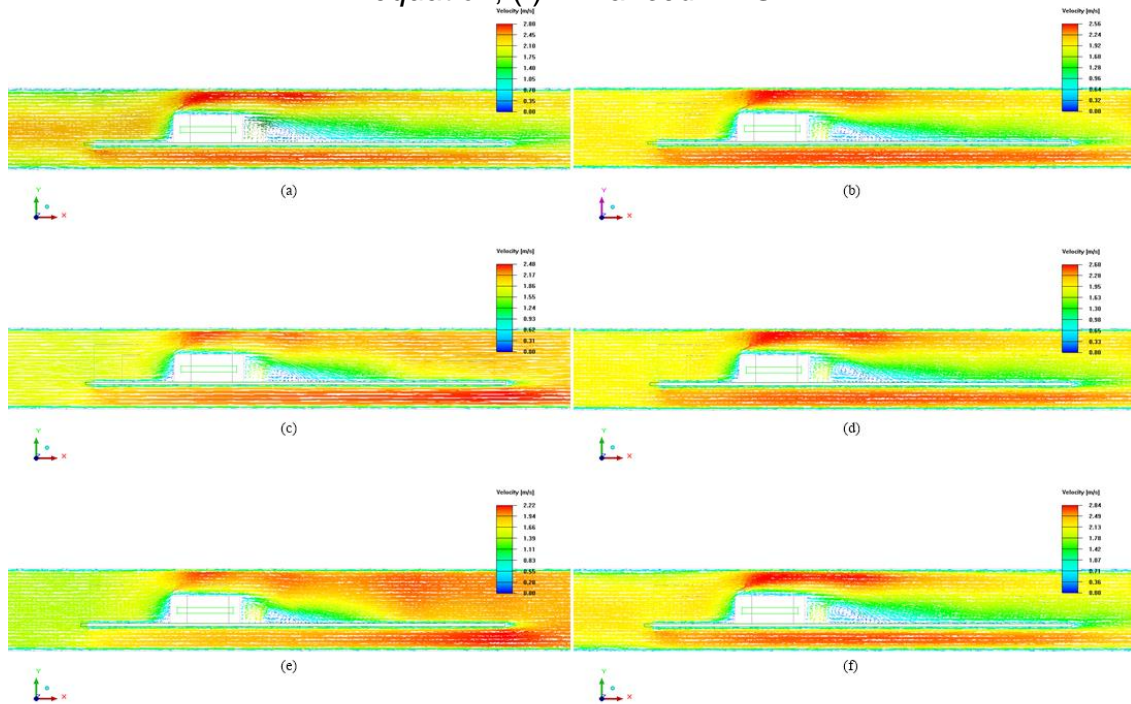
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 84 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



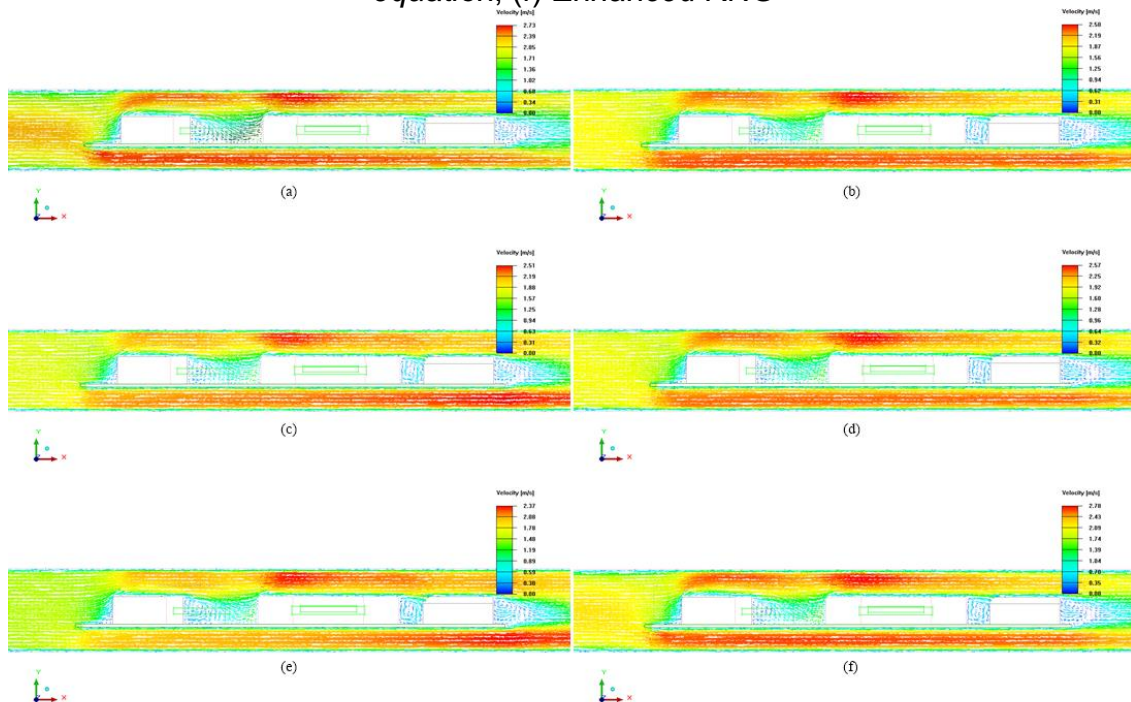
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 85 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 86 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 2m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2.4 Velocidade de 2,5m/s

A Tabela 18 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 2,5m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 18 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 2,5m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 2,5 m/s							
<i>Points</i>	<i>Zero Equation</i>	<i>Two Equation</i>	<i>Spalart-Allmaras</i>	<i>RNG</i>	<i>Realizable</i>	<i>Enhanced</i>	<i>Gráfico</i>
10 W	9,12%	1,80%	1,86%	0,09%	7,22%	8,16%	
5W	35,95%	16,56%	16,27%	19,12%	1,12%	18,17%	
3W	16,44%	9,91%	9,86%	11,91%	3,41%	2,76%	
Fonte 10W	3,09%	0,48%	0,50%	0,18%	2,89%	3,53%	
Fonte 5W	29,45%	17,81%	17,68%	19,65%	10,50%	16,91%	
Fonte 3W	9,32%	7,25%	7,22%	8,11%	27,57%	4,35%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 19 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 2,5m/s

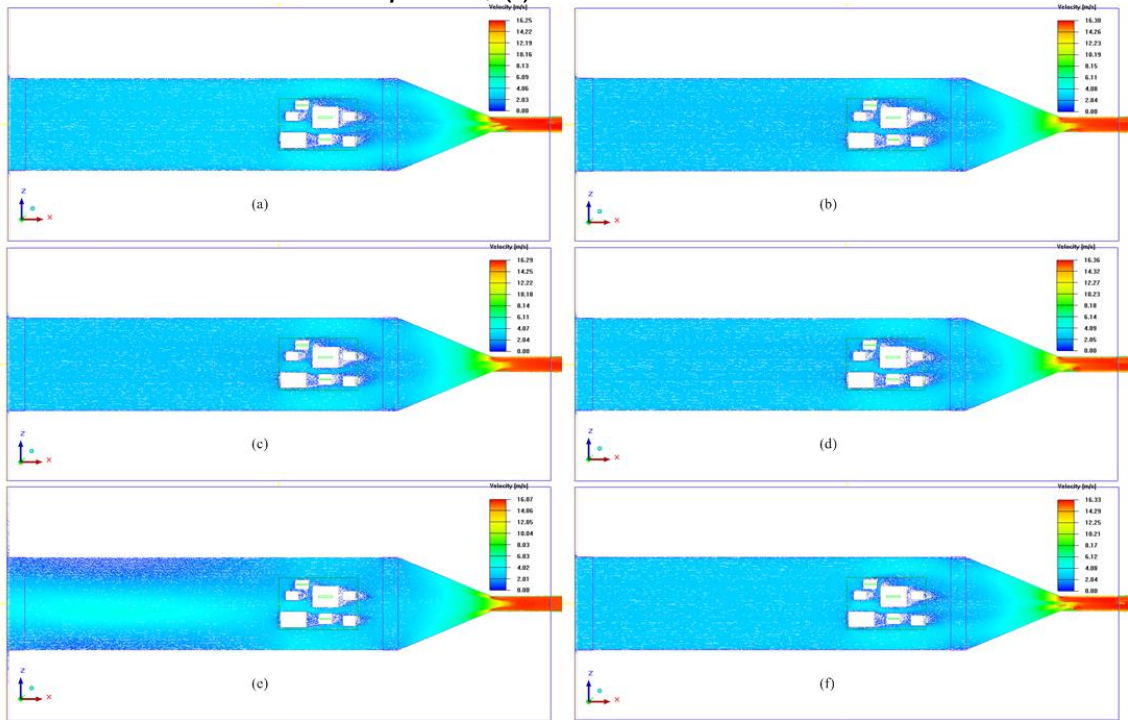
Tabela 19 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 2,5m/s

Tempo de processamento com velocidade de 2,5m/s	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	3:03:49
Spalart-Allmaras	9:05:22
Two Equation Padrão	7:11:31
RNG	4:52:02
Realizable two equation	5:18:16
Enhanced RNG	4:25:00
TOTAL	33:56:00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

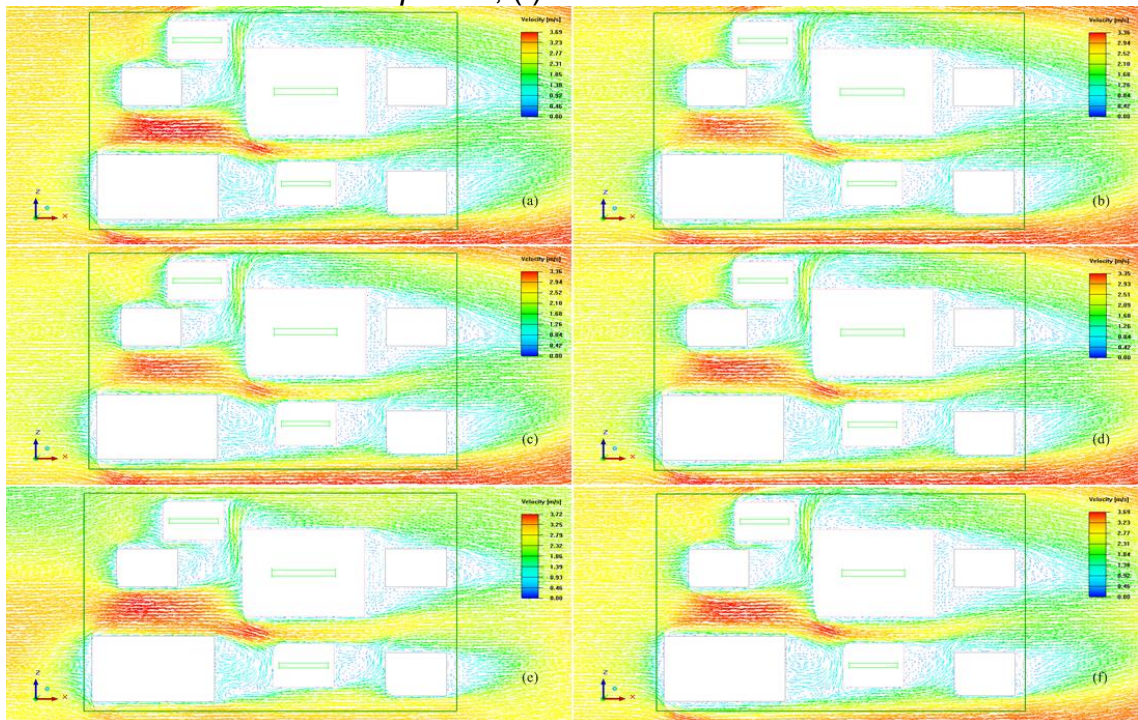
As Figuras de 87 a 93 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 2,5m/s

Figura 87 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



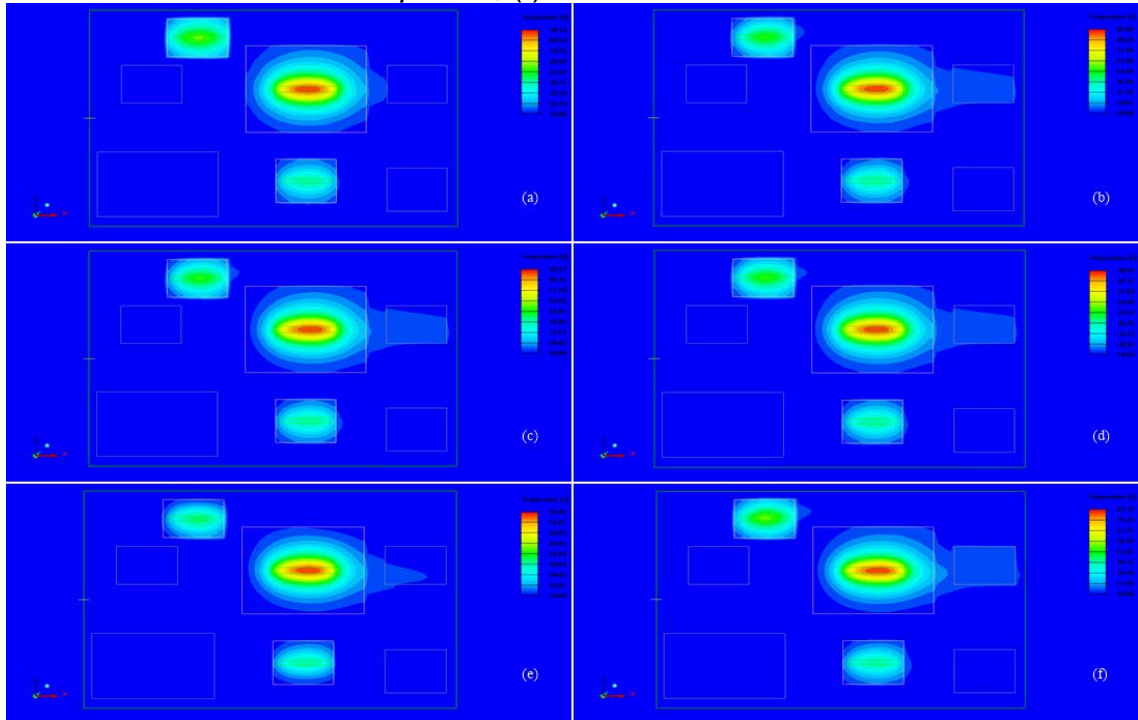
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 88 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



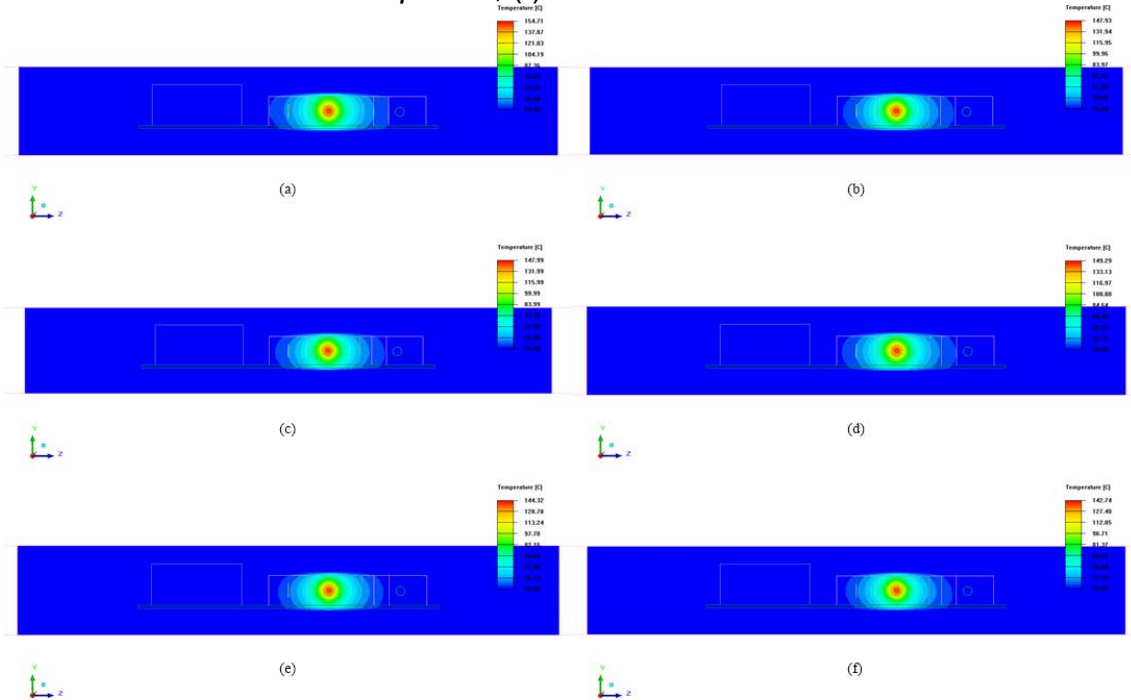
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 89 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



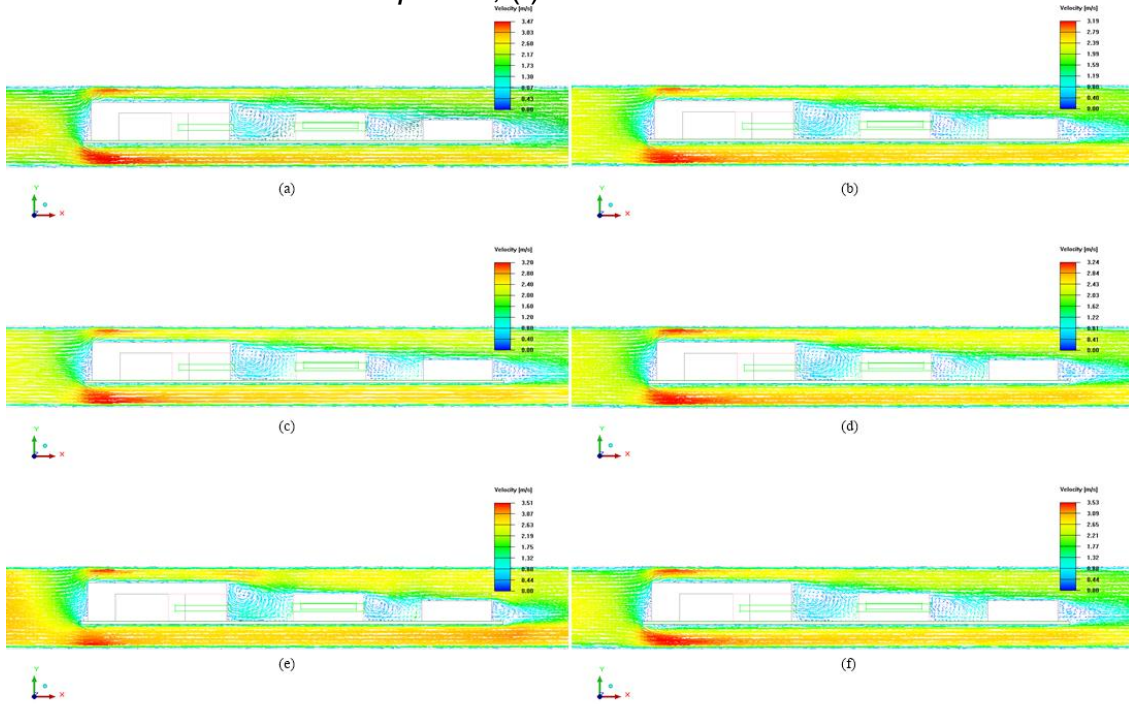
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 90 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



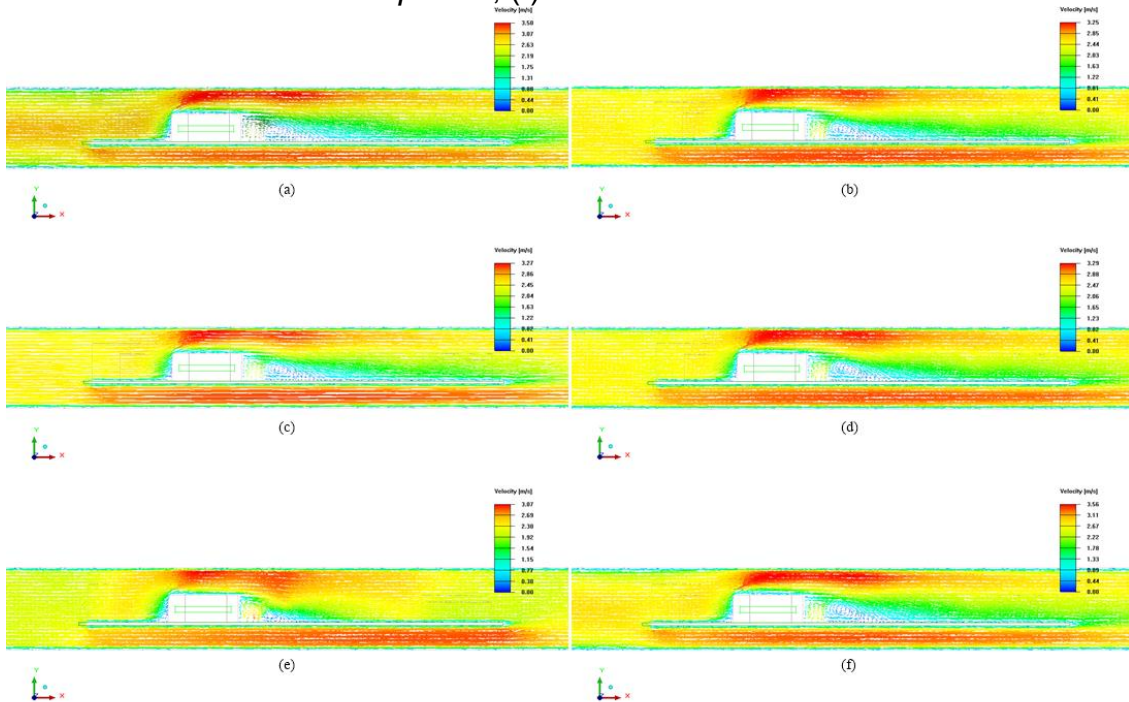
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 91 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



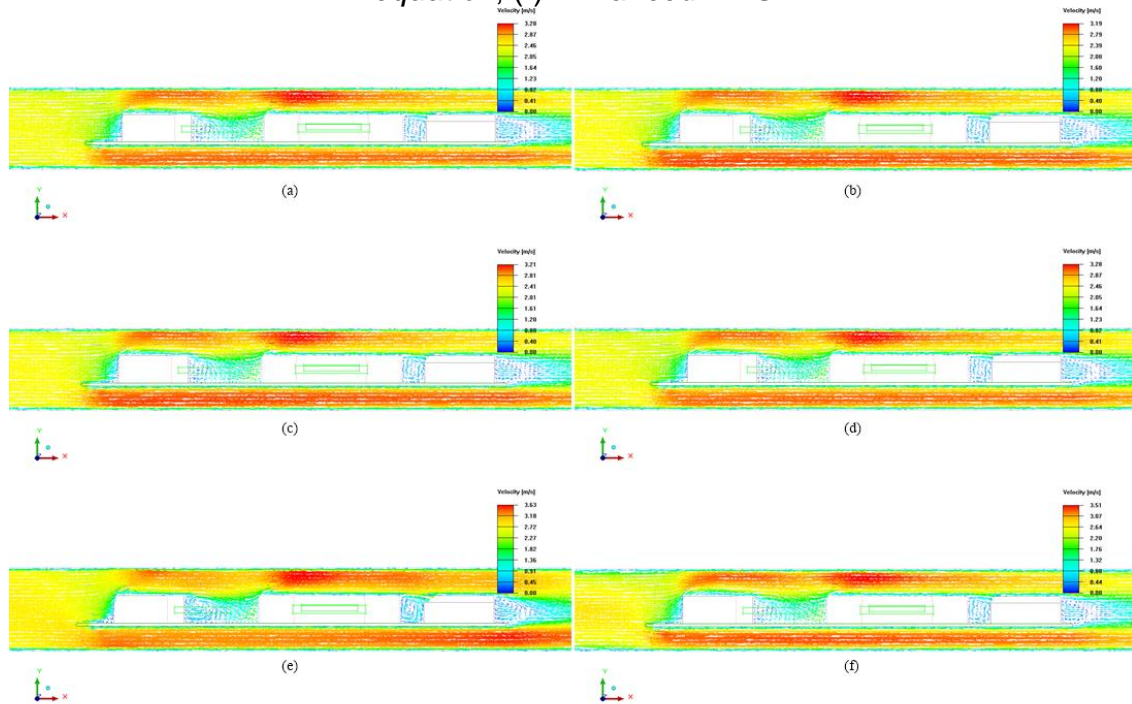
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 92 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 93 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z, com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2.5 Velocidade de 3,0m/s

A Tabela 20 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 3m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 20 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 3m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 3 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	6,99%	5,19%	5,04%	2,67%	10,67%	9,66%	
5W	39,47%	15,70%	15,53%	19,81%	6,04%	19,66%	
3W	18,71%	7,94%	8,16%	10,19%	0,17%	2,56%	
Fonte 10W	2,12%	1,68%	1,60%	0,77%	3,90%	3,91%	
Fonte 5W	29,59%	17,13%	17,06%	19,40%	8,46%	17,05%	
Fonte 3W	9,79%	6,54%	6,61%	7,47%	2,29%	3,94%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 21 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 3m/s

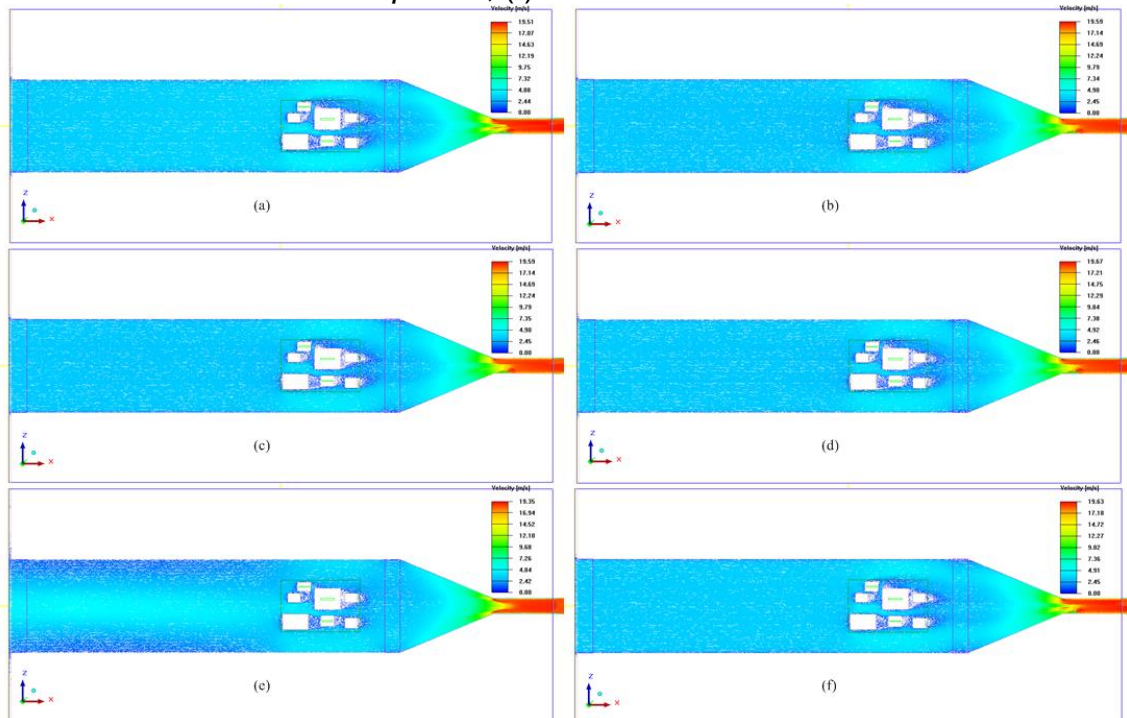
Tabela 21 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 3m/s

<i>Tempo de processamento com velocidade de 3m/s</i>	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	3:04:22
Spalart-Allmaras	7:59:48
Two Equation Padrão	6:39:01
RNG	4:46:09
Realizable two equation	5:24:14
Enhanced RNG	4:05:55
TOTAL	31:59:29

Fonte: Elaboração do próprio autor.

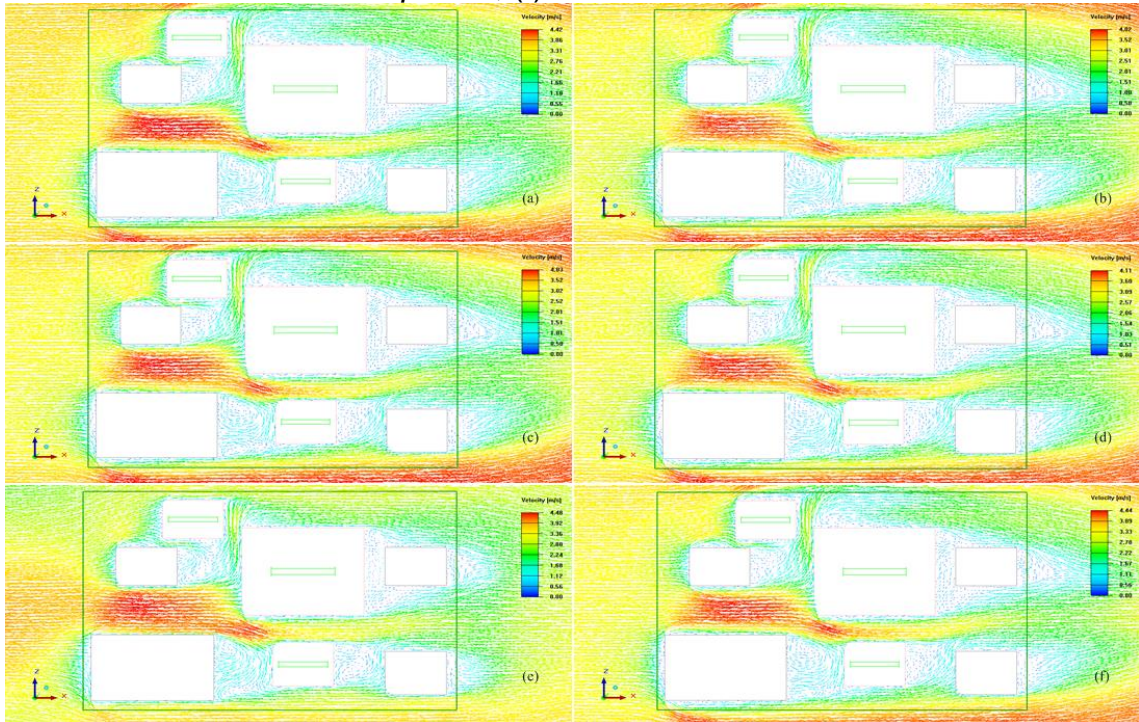
As Figuras de 94 a 100 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 3m/s

Figura 94 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) Zero equation, (b) Spalart-Allmaras, (c) Two equation, (d) RNG, (e) Realizable Two equation, (f) Enhanced RNG



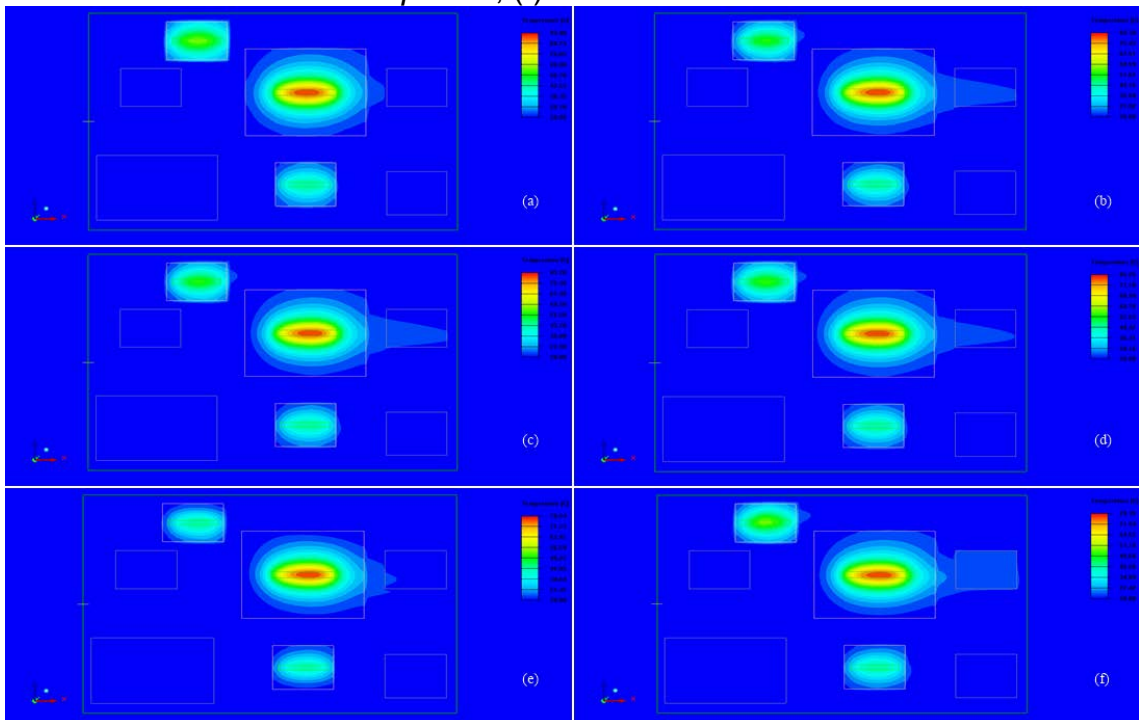
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 95 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



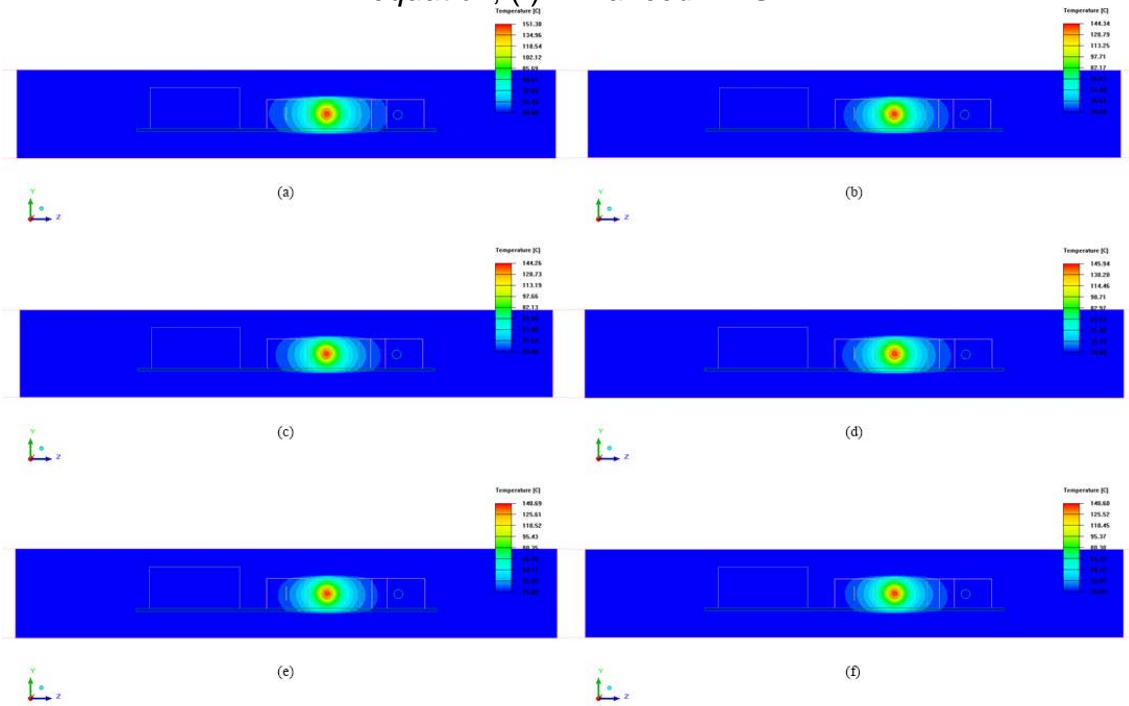
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 96 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



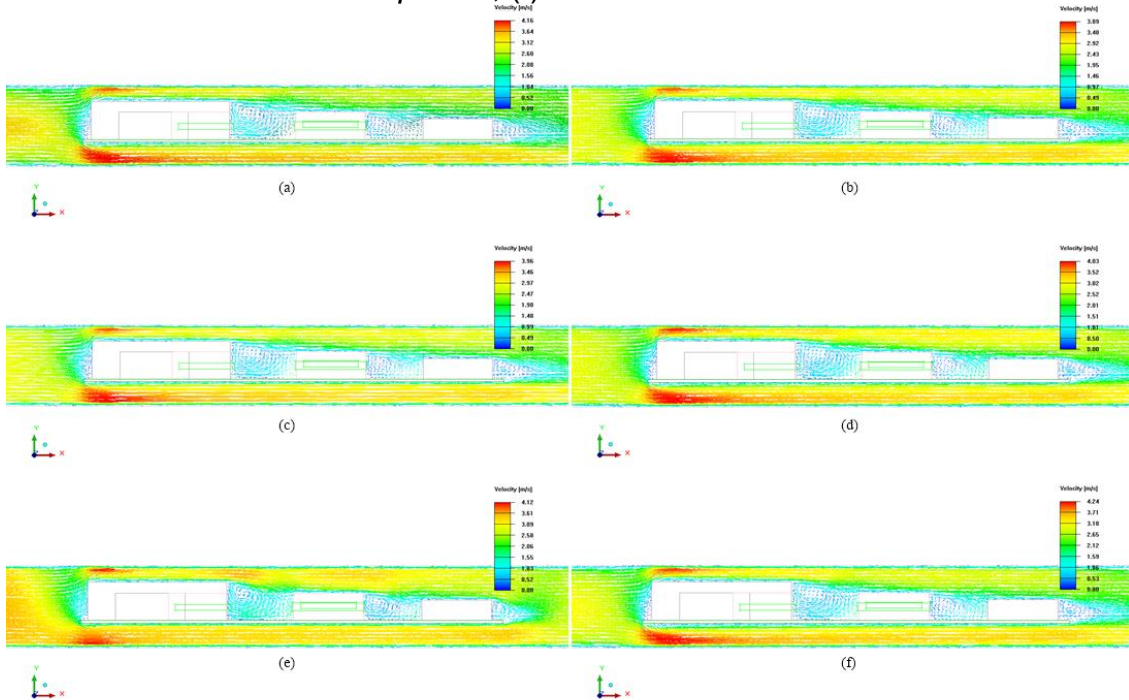
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 97 - Detalhes do comparativo da distribuição de temperatura, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



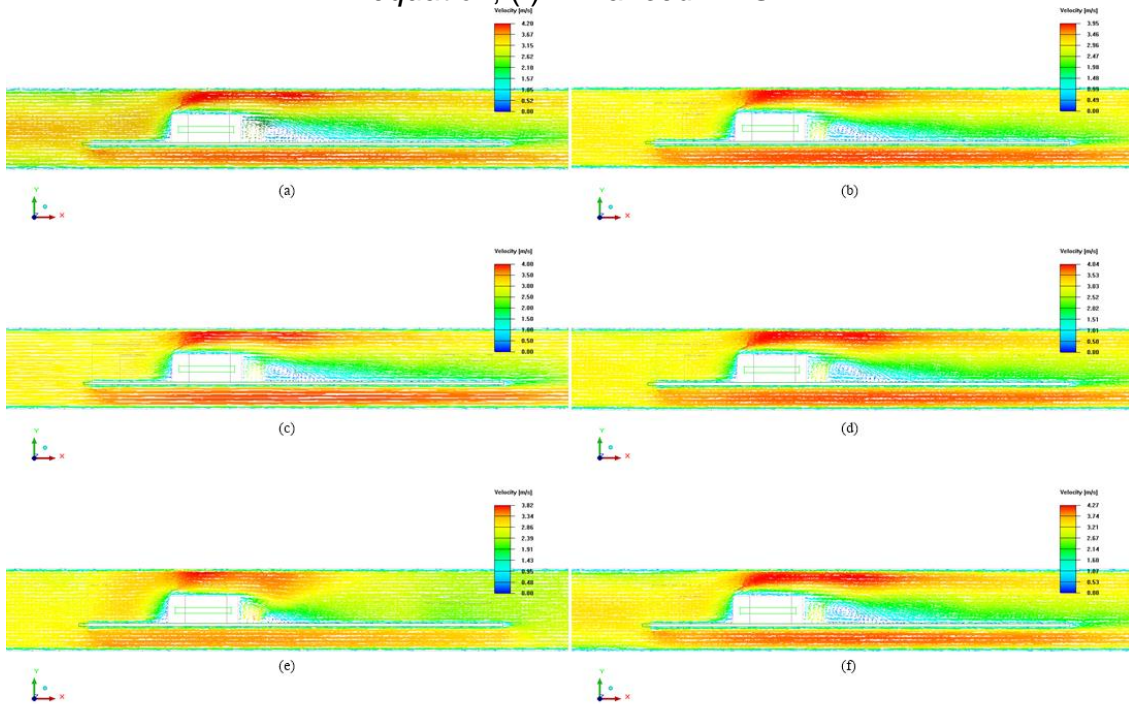
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 98 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



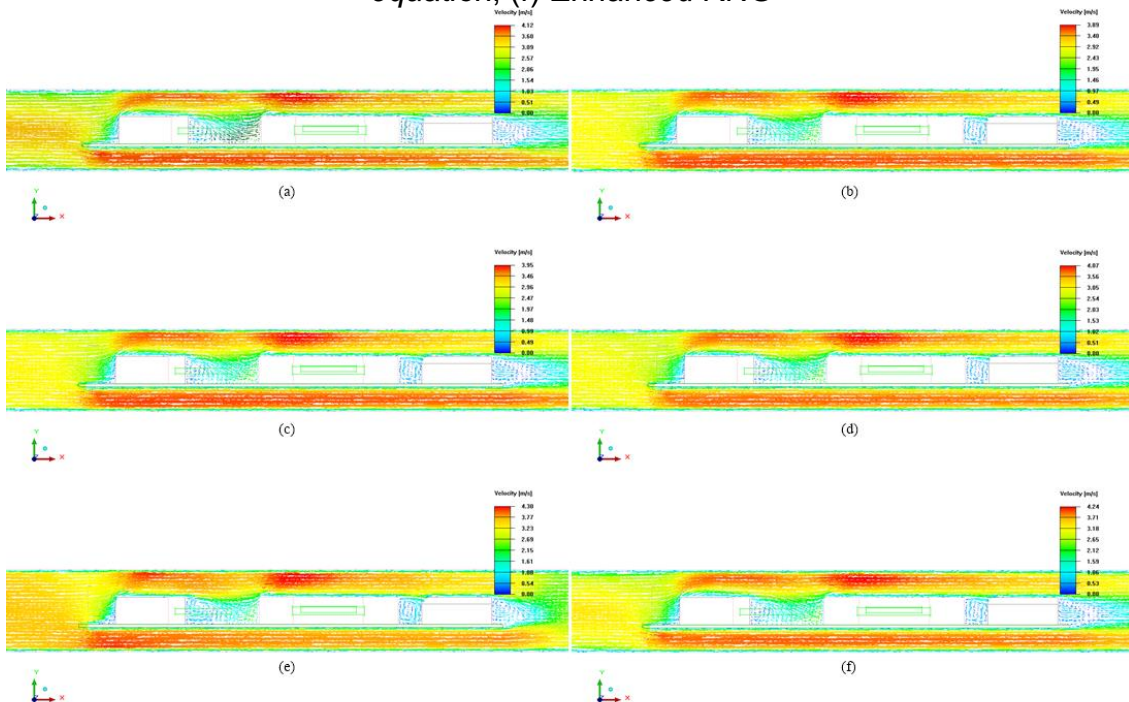
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 99 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 3m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 100 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 2,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2.6 Velocidade de 3,5m/s

A Tabela 22 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 3,5m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 22 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 3,5m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 3,5 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	5,64%	6,70%	6,76%	4,10%	8,26%	9,92%	
5W	42,32%	16,34%	15,94%	21,26%	2,35%	21,00%	
3W	18,64%	6,49%	6,51%	8,83%	5,89%	2,47%	
Fonte 10W	1,47%	2,13%	2,15%	1,35%	2,72%	3,93%	
Fonte 5W	29,24%	17,20%	17,00%	19,36%	12,29%	16,95%	
Fonte 3W	9,64%	6,05%	6,06%	6,85%	4,52%	3,74%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 23 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 3,5m/s

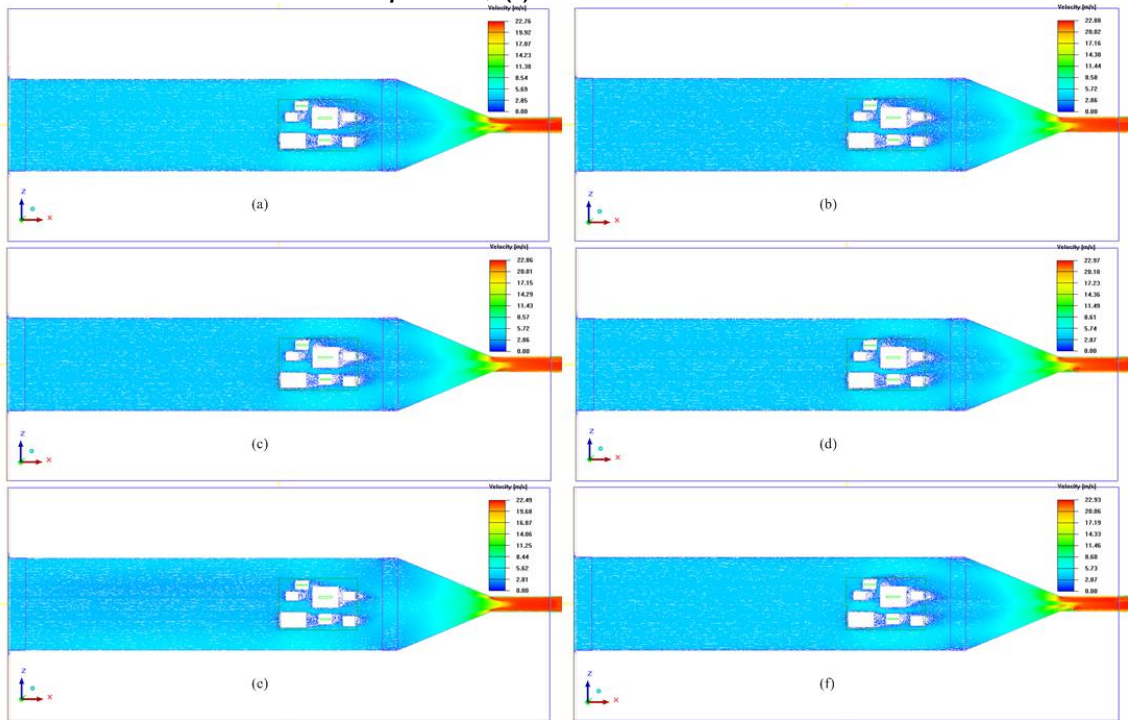
Tabela 23 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 3,5m/s

Tempo de processamento com velocidade de 3,5m/s	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	3:04:32
Spalart-Allmaras	9:12:22
Two Equation Padrão	7:20:20
RNG	4:40:16
Realizable two equation	5:25:37
Enhanced RNG	3:55:10
TOTAL	33:38:17

Fonte: Elaboração do próprio autor.

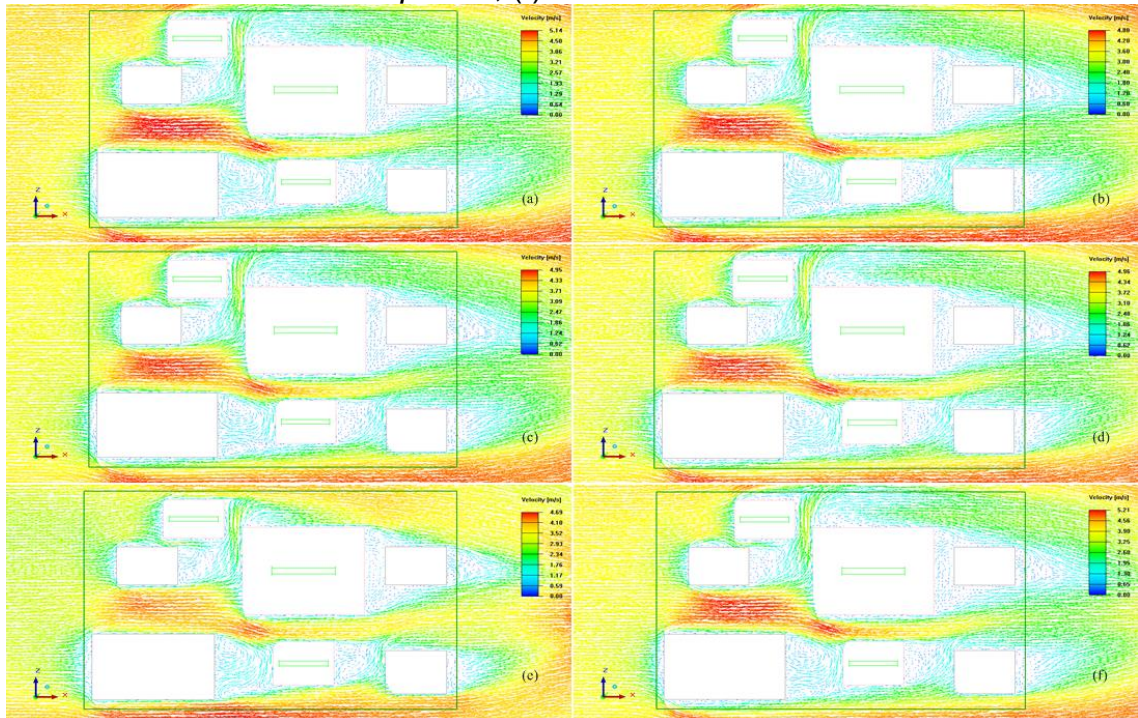
As Figuras de 101 a 107 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 3,5m/s

Figura 101 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



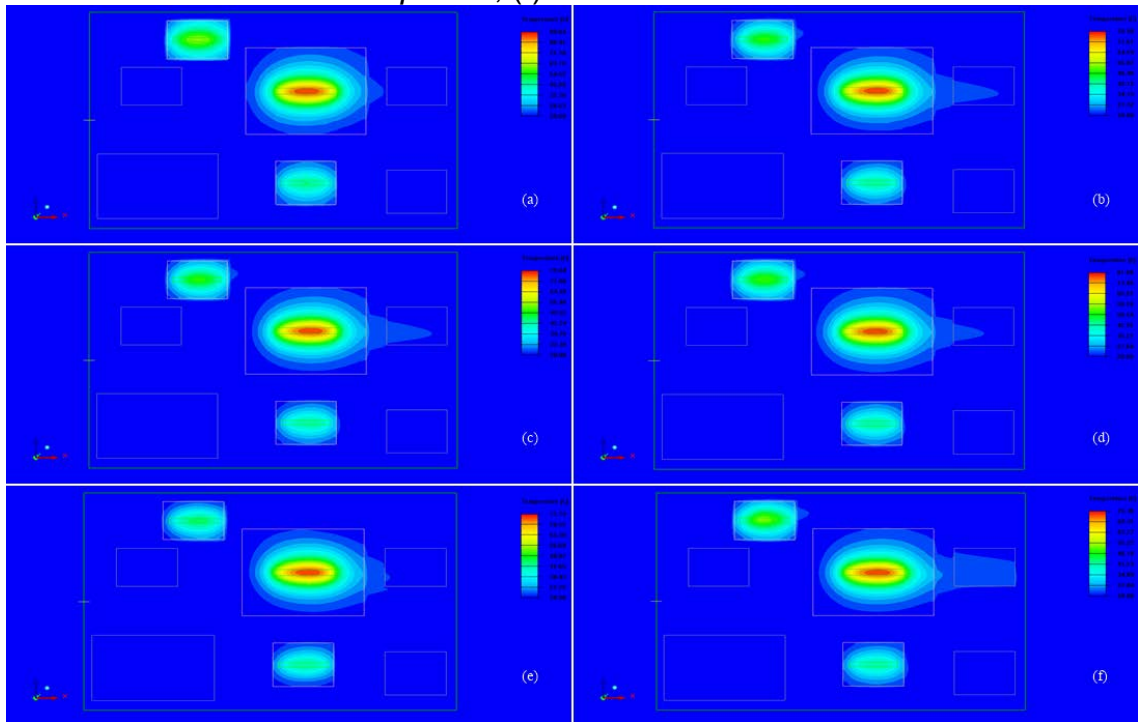
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 102 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



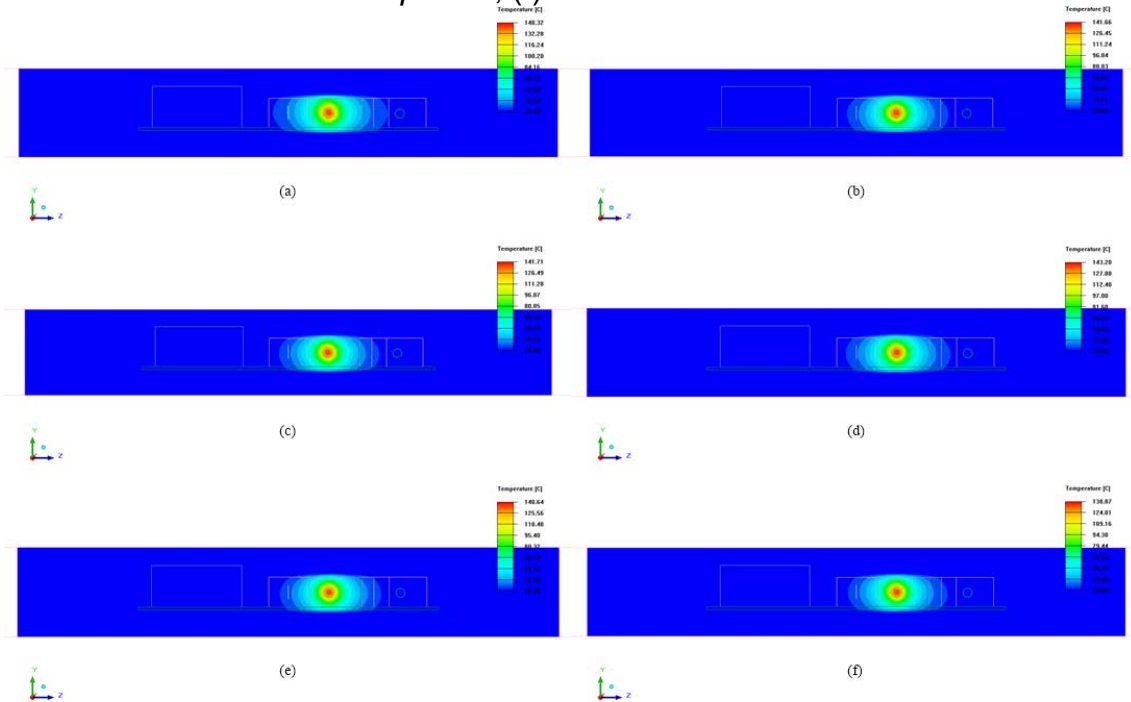
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 103 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



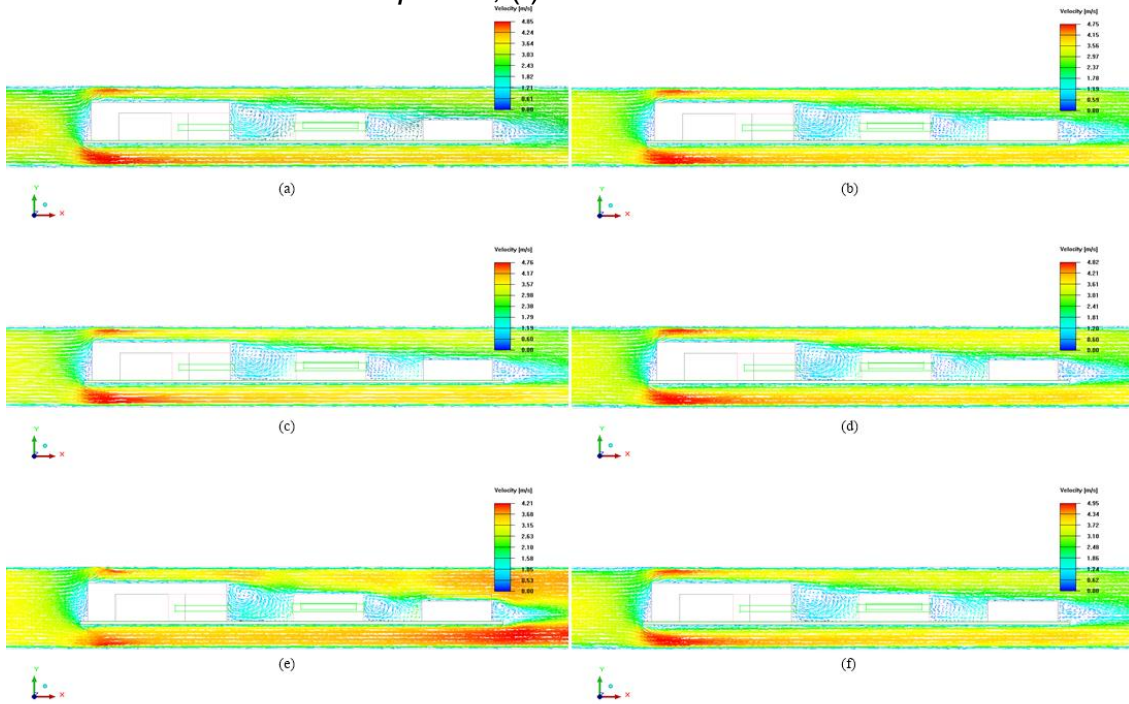
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 104 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano x da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



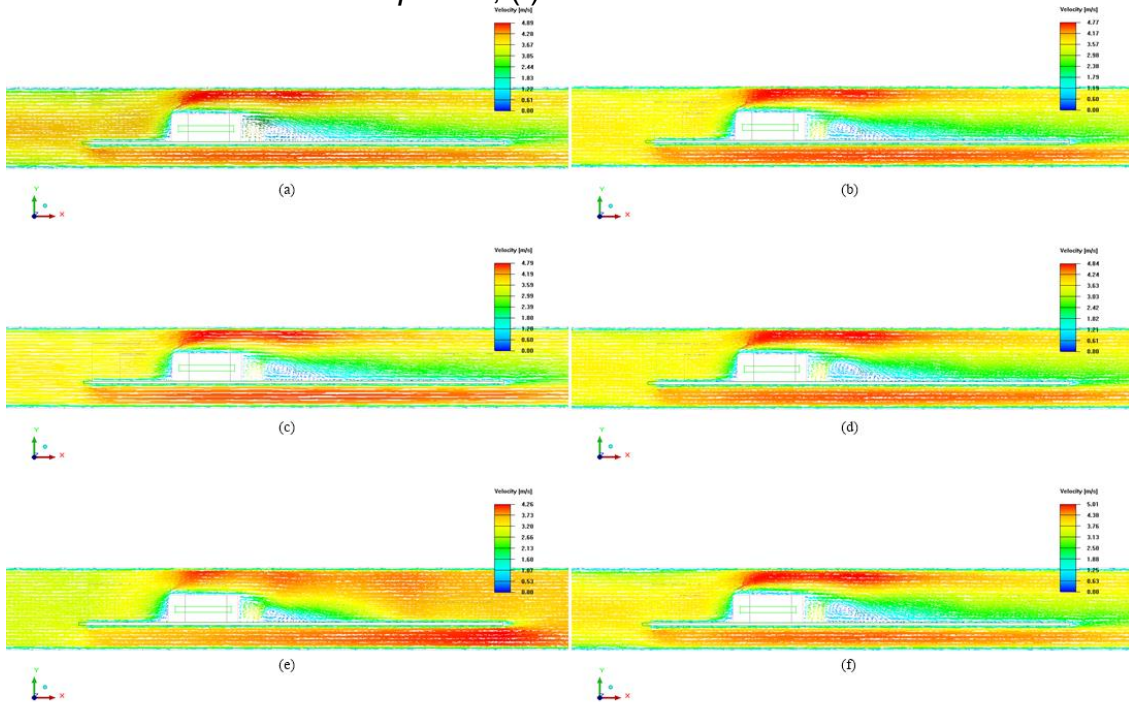
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 105 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



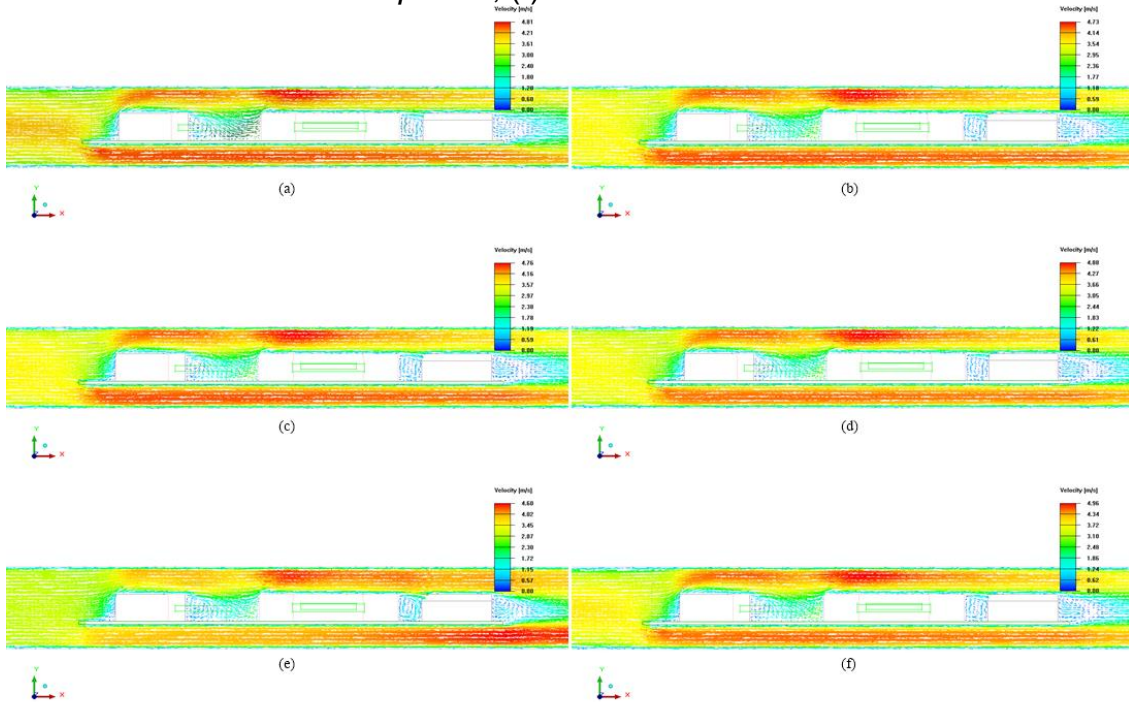
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 106 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 107 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 3,5m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3.2.7 Velocidade de 4,0m/s

A Tabela 24 mostra a diferença obtida entre os resultados experimentais e numéricos com o intuito de comparar resultados, para cada modelo de turbulência, a velocidade de 4m/s. Para tal foram monitorados os blocos de 10W, 5W e 3W e as fontes de 10W, 5W e 3W.

Tabela 24 - Diferença de temperatura, em porcentagem, entre os valores numéricos e experimentais para placa submetida a velocidade de 4m/s, com diferentes modelos de turbulência

Túnel Inteiro - Velocidade 4 m/s							
Points	Zero Equation	Two Equation	Spalart-Allmaras	RNG	Realizable	Enhanced	Gráfico
10W	4,92%	8,10%	8,28%	5,21%	11,31%	9,37%	
5W	44,18%	14,85%	14,44%	20,36%	1,00%	21,86%	
3W	17,94%	5,11%	5,05%	7,70%	3,74%	2,19%	
Fonte10W	1,15%	2,46%	2,52%	1,64%	3,67%	3,69%	
Fonte5W	28,57%	16,28%	16,09%	18,48%	10,73%	16,70%	
Fonte3W	9,20%	5,48%	5,46%	6,30%	3,75%	3,48%	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 25 exibe o tempo de simulação para que cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 4m/s

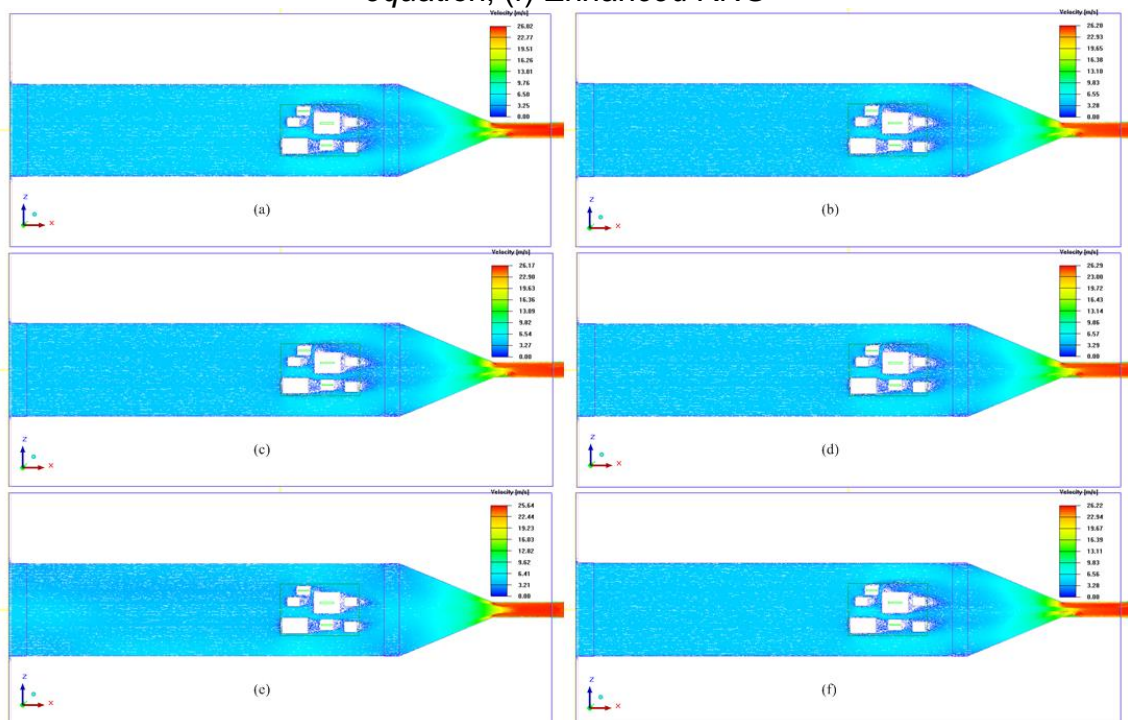
Tabela 25 - Tempo de simulação do túnel submetido a velocidade de 4m/s

<i>Tempo de processamento com velocidade de 4m/s</i>	
Modelos de Turbulência	Tempo de execução (h:min:s)
Zero Equation	3:04:26
Spalart-Allmaras	12:17:32
Two Equation Padrão	5:30:33
RNG	4:40:03
Realizable two equation	5:17:05
Enhanced RNG	4:03:42
TOTAL	34:53:21

Fonte: Elaboração do próprio autor.

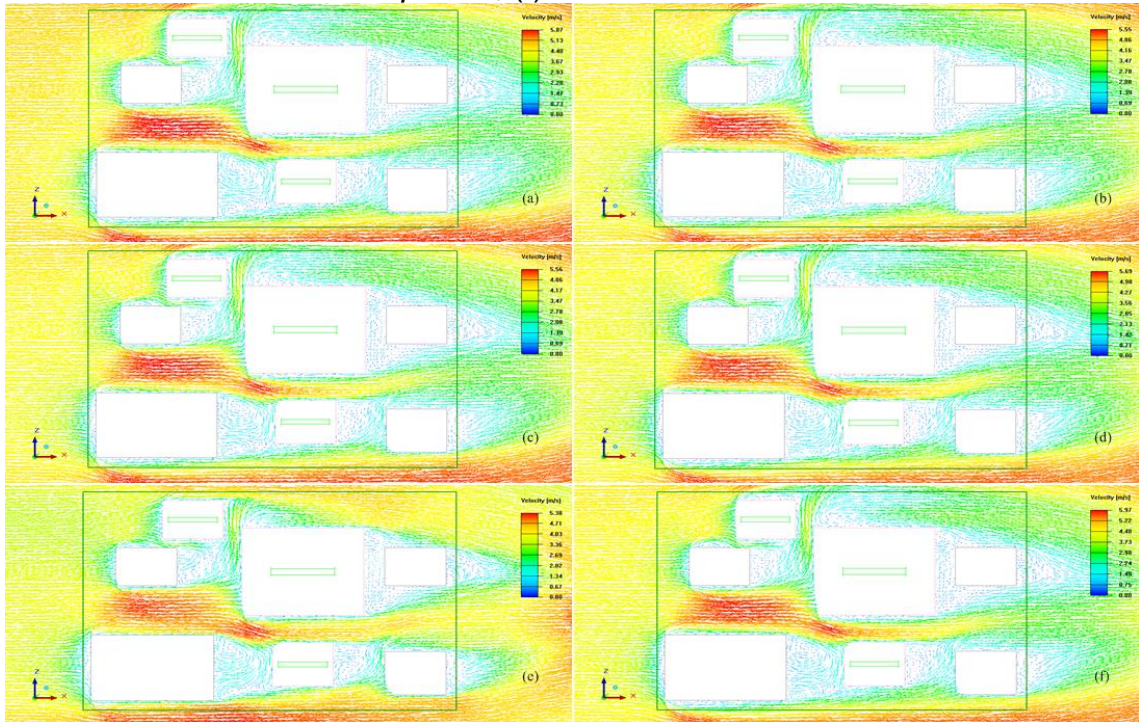
As Figuras de 108 a 114 exibe o comportamento qualitativo do escoamento (velocidades e temperaturas) em diversos planos para cada modelo de turbulência submetido a velocidade de 4m/s

Figura 108 - Comparativo no túnel de vento inteiro da distribuição de velocidade, vetores no plano y , entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



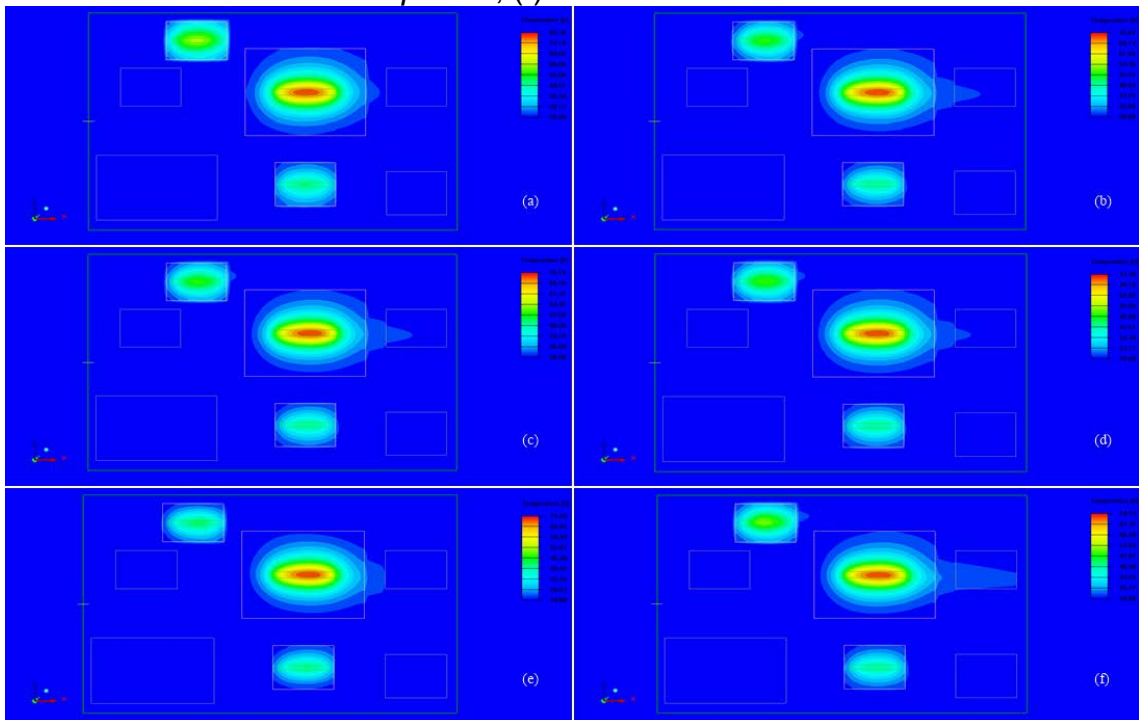
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 109 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



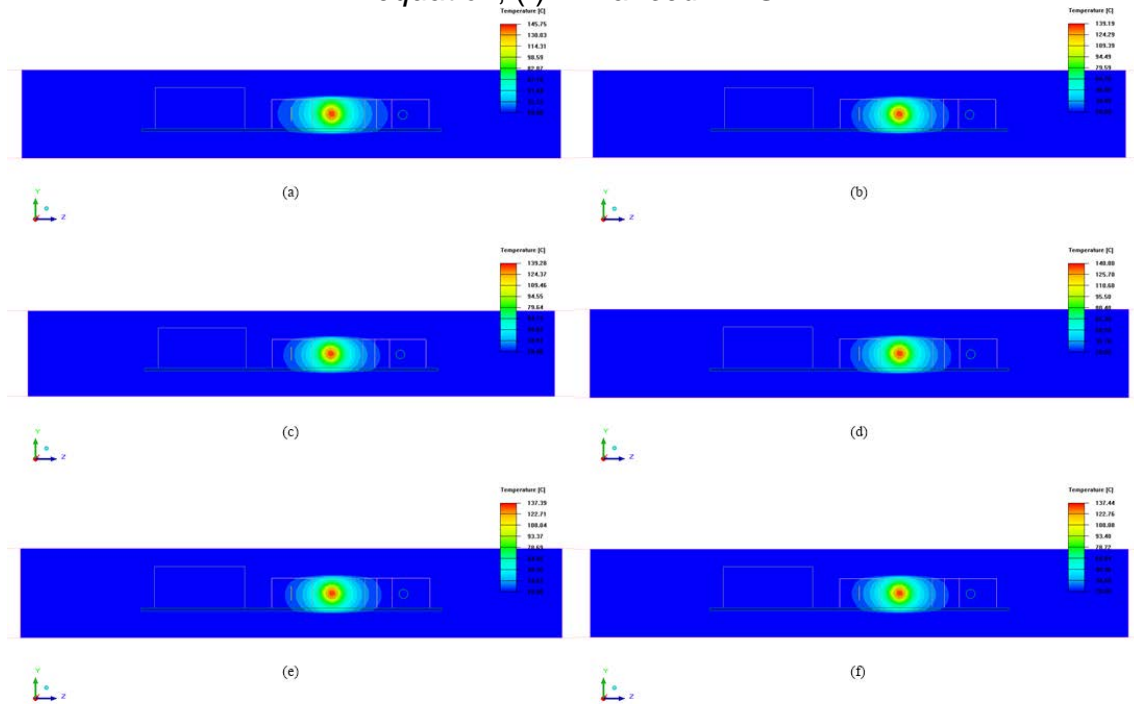
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 110 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



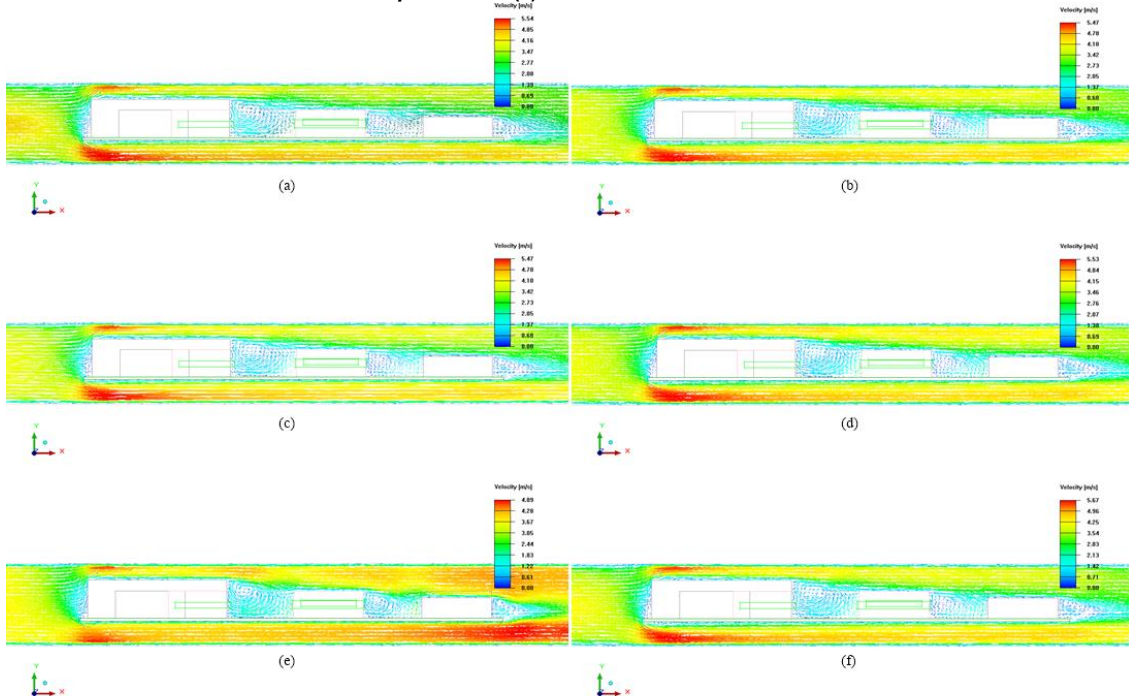
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 111 - Detalhes do comparativo da distribuição de velocidade, contornos no plano y da placa, entre os modelos de turbulência com velocidade de 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



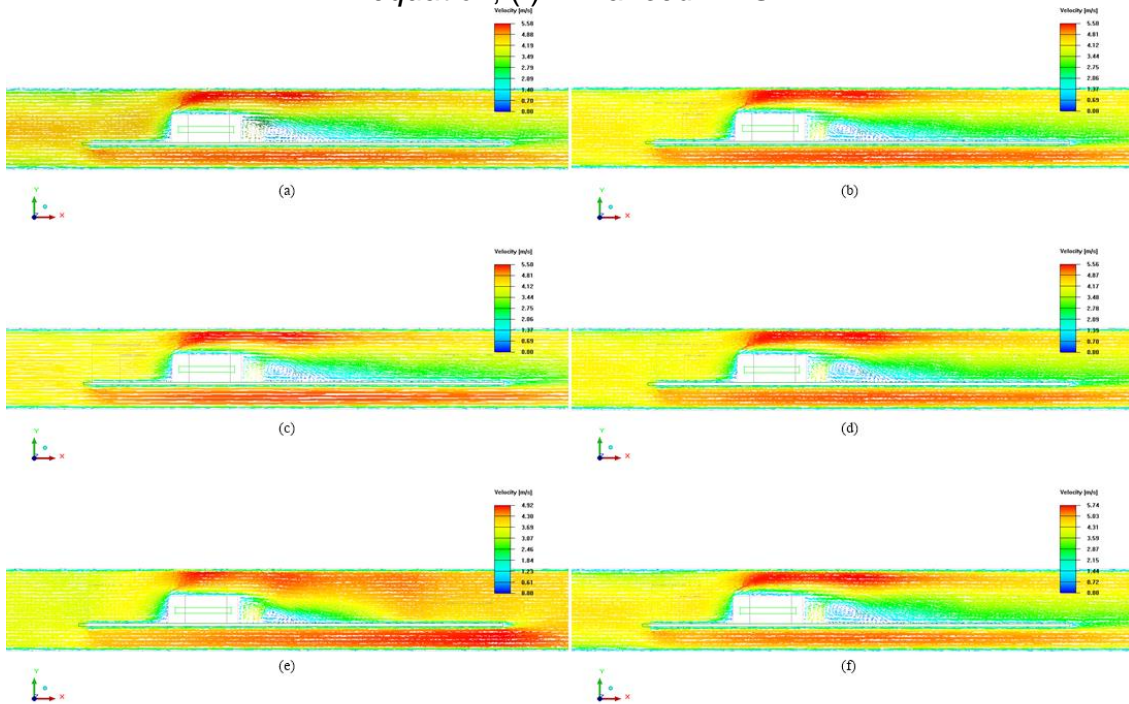
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 112 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 3W, entre os modelos de turbulência a 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



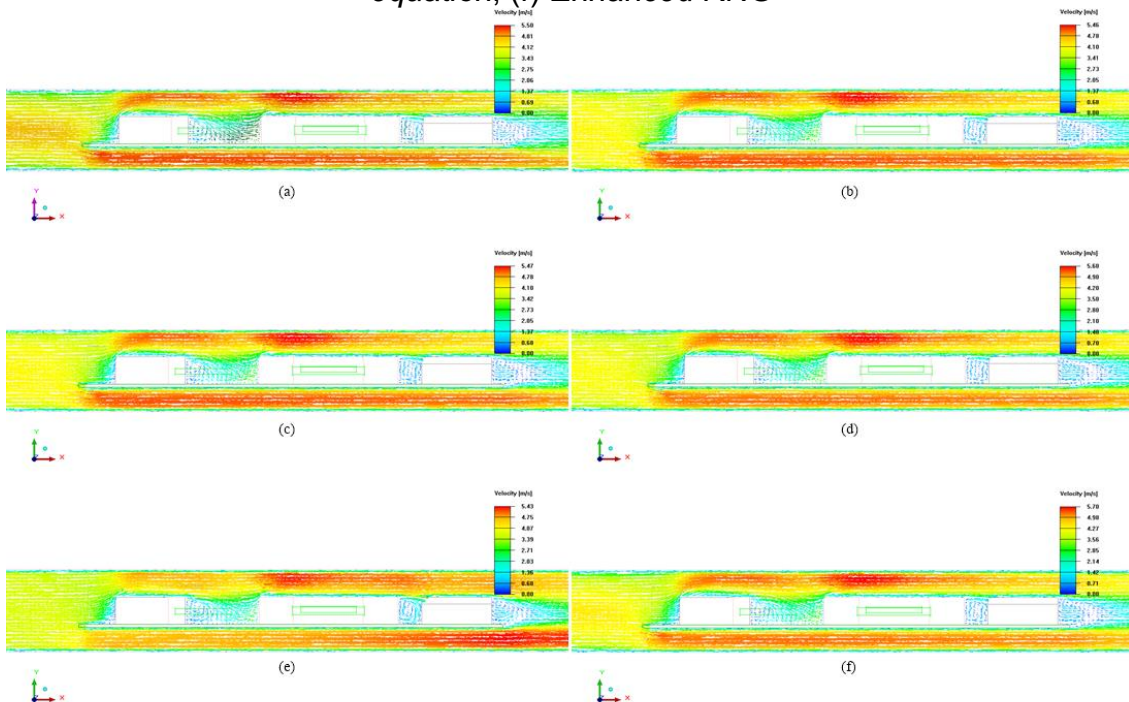
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 113 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 5W, entre os modelos de turbulência a 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 114 - Comparativo da distribuição de velocidade, vetores no plano z com referência o bloco de 10W, entre os modelos de turbulência a 4m/s - (a) *Zero equation*, (b) *Spalart-Allmaras*, (c) *Two equation*, (d) *RNG*, (e) *Realizable Two equation*, (f) *Enhanced RNG*

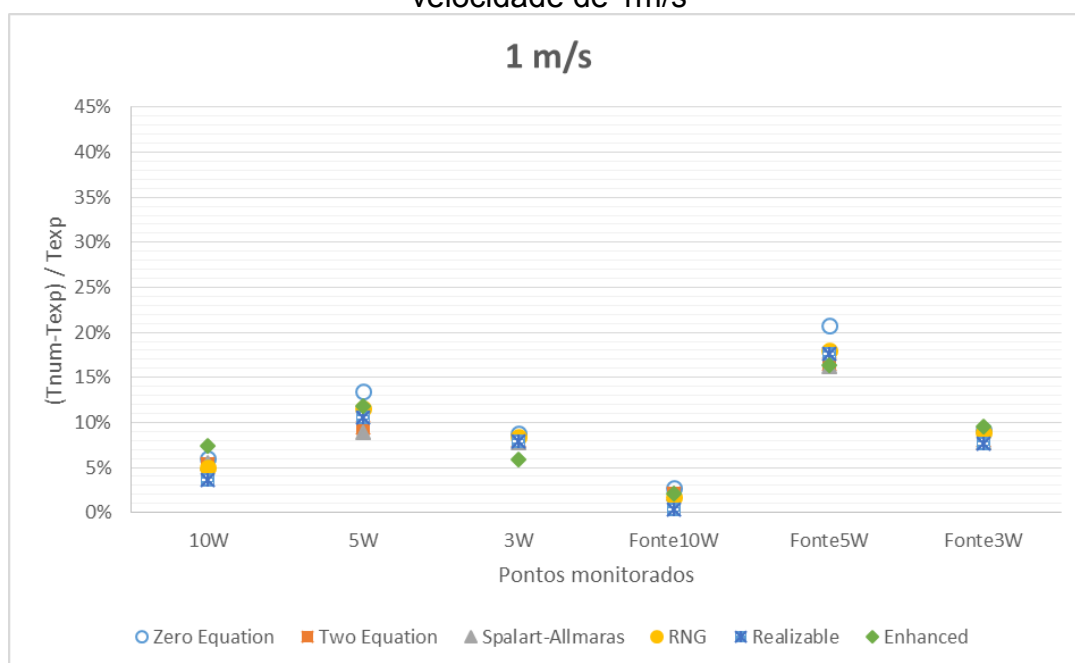


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

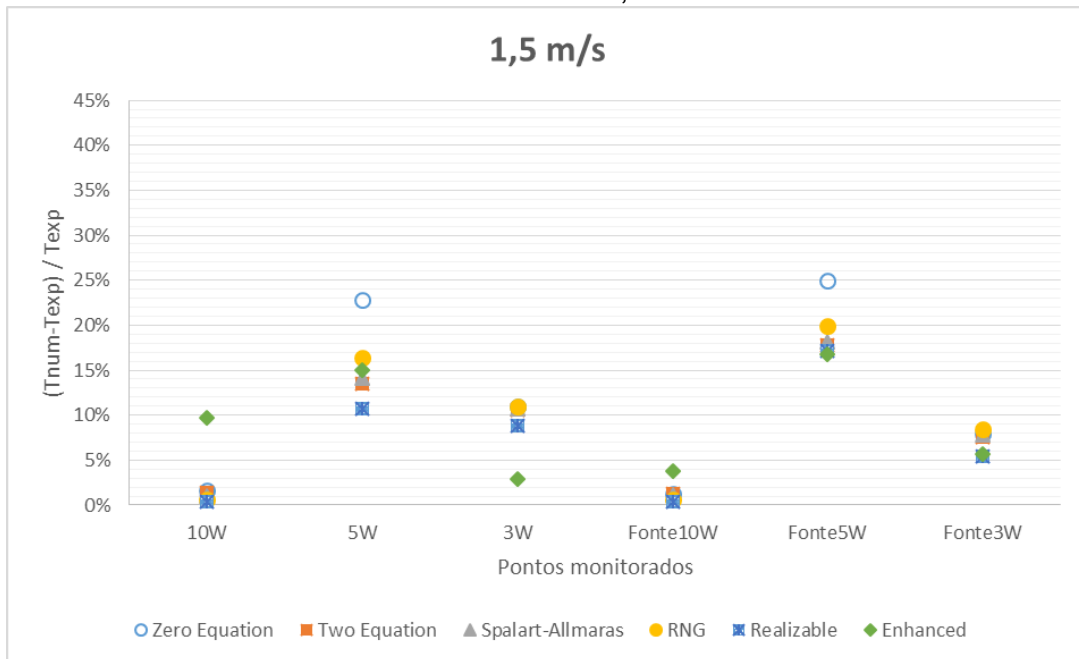
Para melhor avaliar os resultados, são apresentados os gráficos comparativos das Figuras 115 a 121 que mostram a diferença entre os resultados experimentais e numéricos para os blocos e fontes de 3, 5 e 10W.

Figura 115 - Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 1m/s



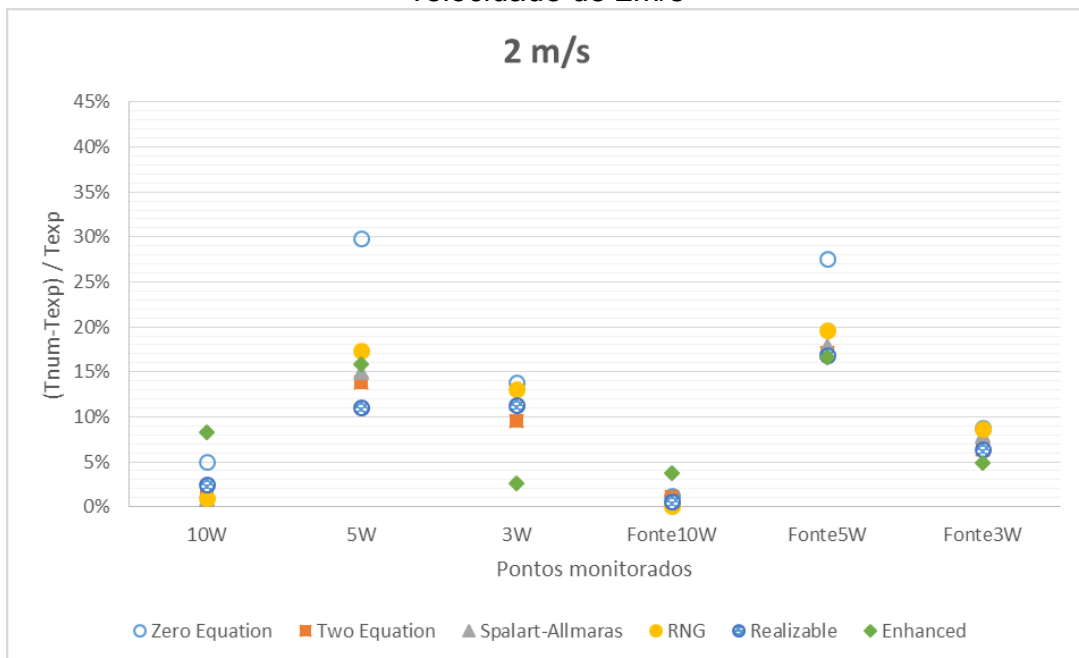
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 116 - Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 1,5m/s



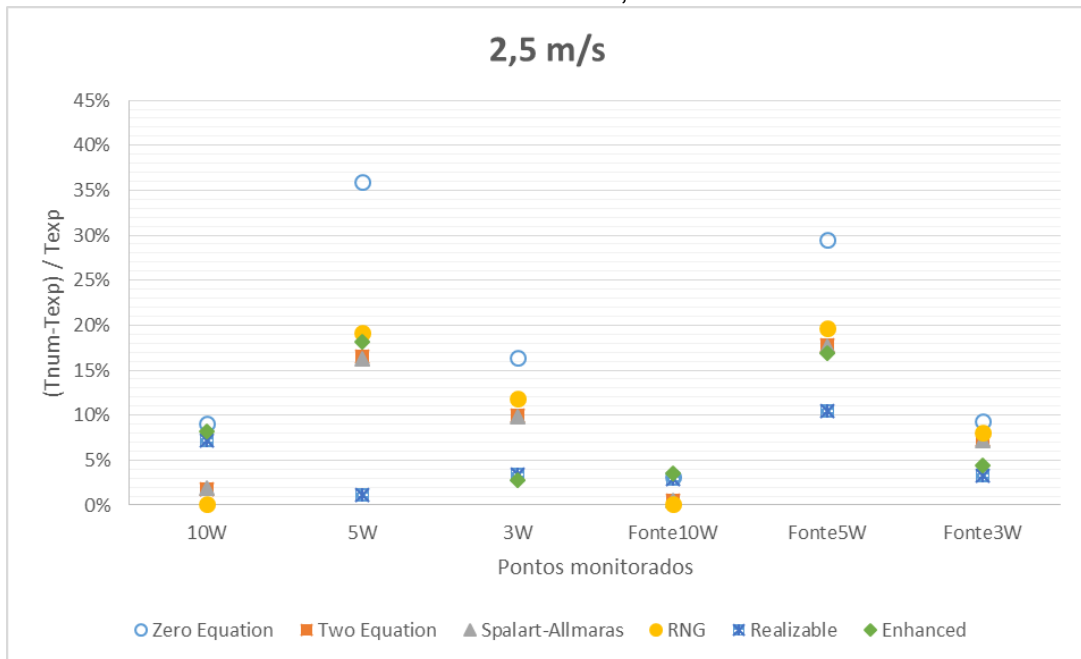
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 117 – Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 2m/s



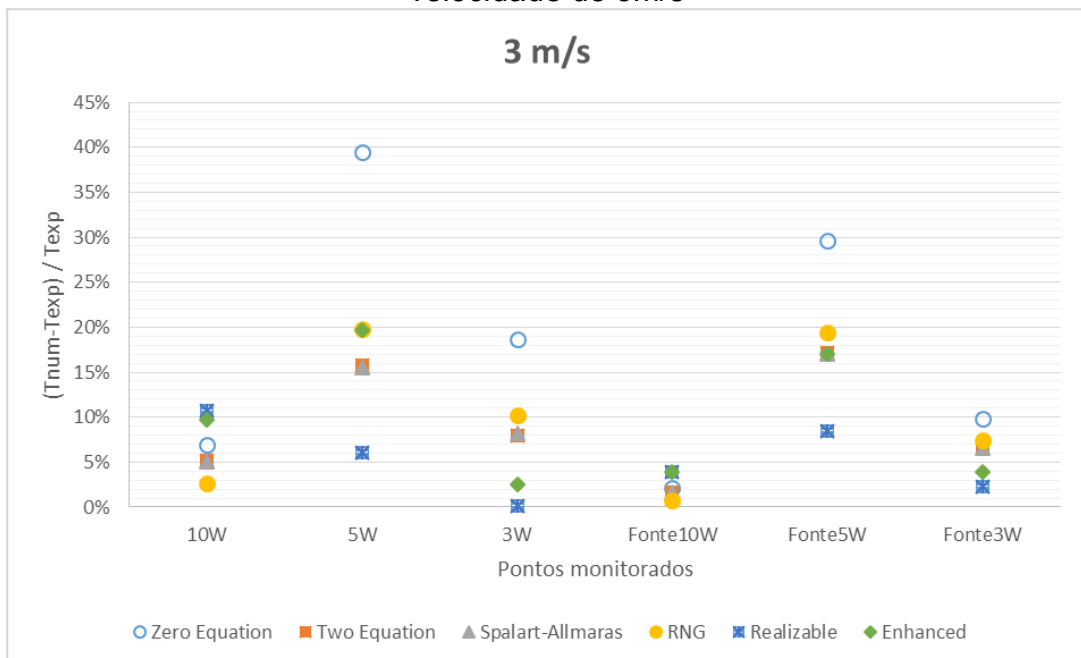
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 118 - Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 2,5m/s



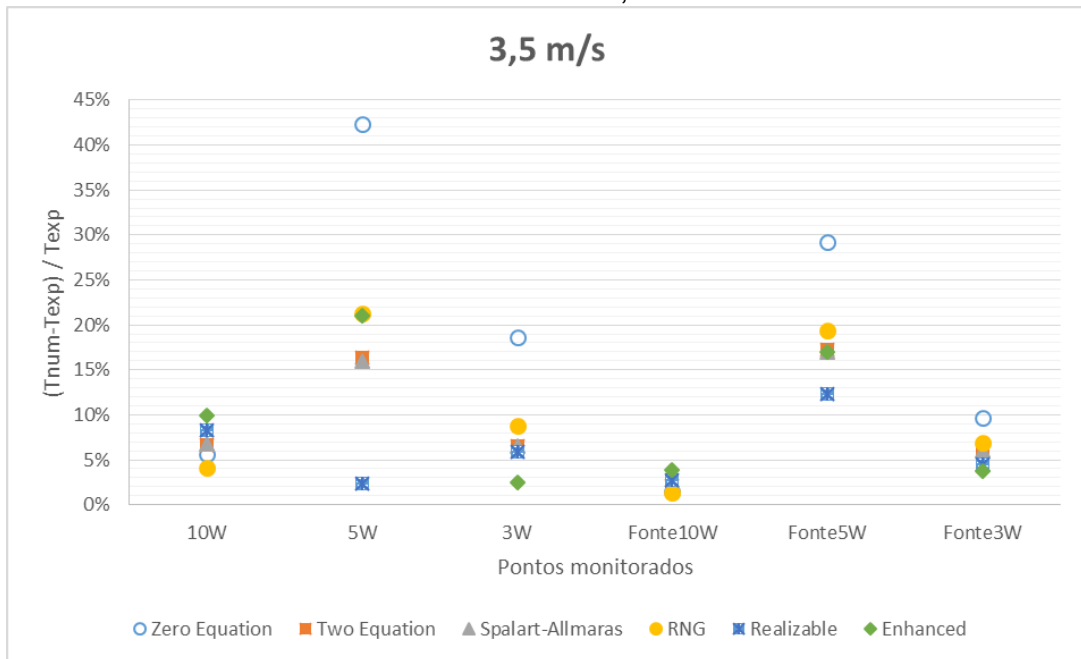
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 119 - Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 3m/s



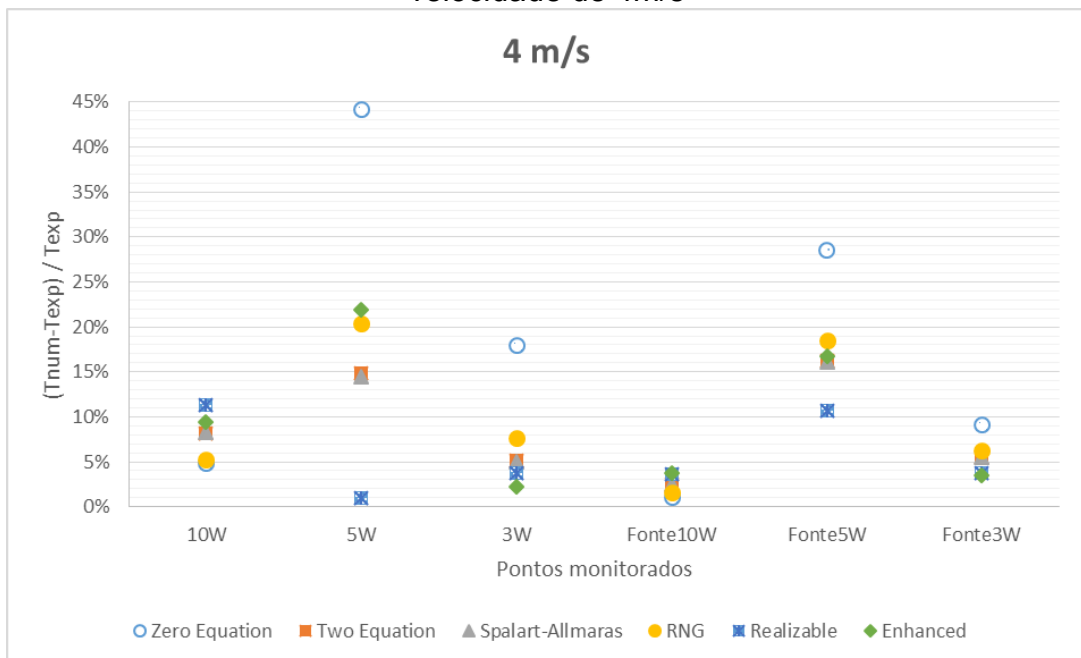
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 120 - Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 3,5m/s



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 121 - Diferença em porcentagem entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e as obtidas experimentalmente (T_{exp}), do túnel submetido a uma velocidade de 4m/s



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os modelos de duas equações RNG, *Realizable*, *Enhanced* e *k*-épsilon padrão obtiveram os melhores resultados dentre os modelos de turbulência e a partir

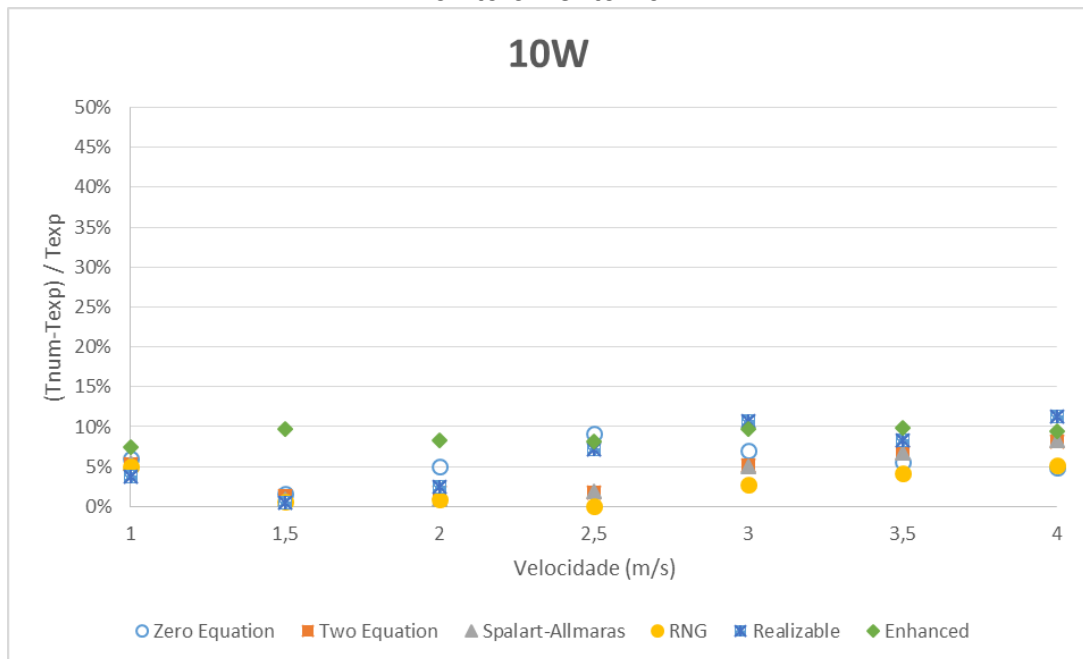
dos erros obtidos, pode-se considerar que tais modelos representaram com fidelidade o caso proposto, no entanto, vale ressaltar onde cada um deles obteve melhores resultados.

O modelo *k*- ϵ padrão acompanha a média dos resultados para baixas velocidades, porém, a partir de 2,5 m/s, Figura 118, seus resultados pioram e ficam mais distantes dos dados experimentais, levando em conta principalmente os resultados referentes ao bloco e à fonte de 5W.

Por outro lado, o modelo *Enhanced* RNG apresenta os melhores resultados para os blocos e fontes de 3W apesar de não manter essa mesma média para toda a réplica térmica.

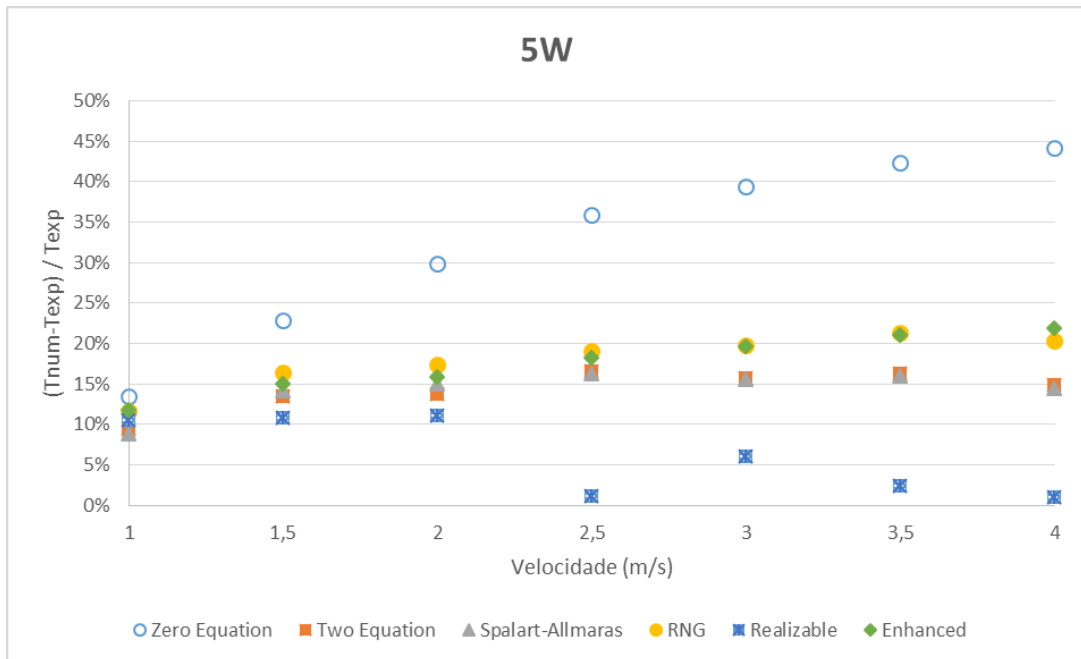
A fim de melhor avaliar a influência da velocidade para cada modelo de turbulência as Figuras 122 a 127 mostram os gráficos que relacionam a temperatura e a velocidade analisada para vários pontos de monitoramento separadamente.

Figura 122 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento 10W



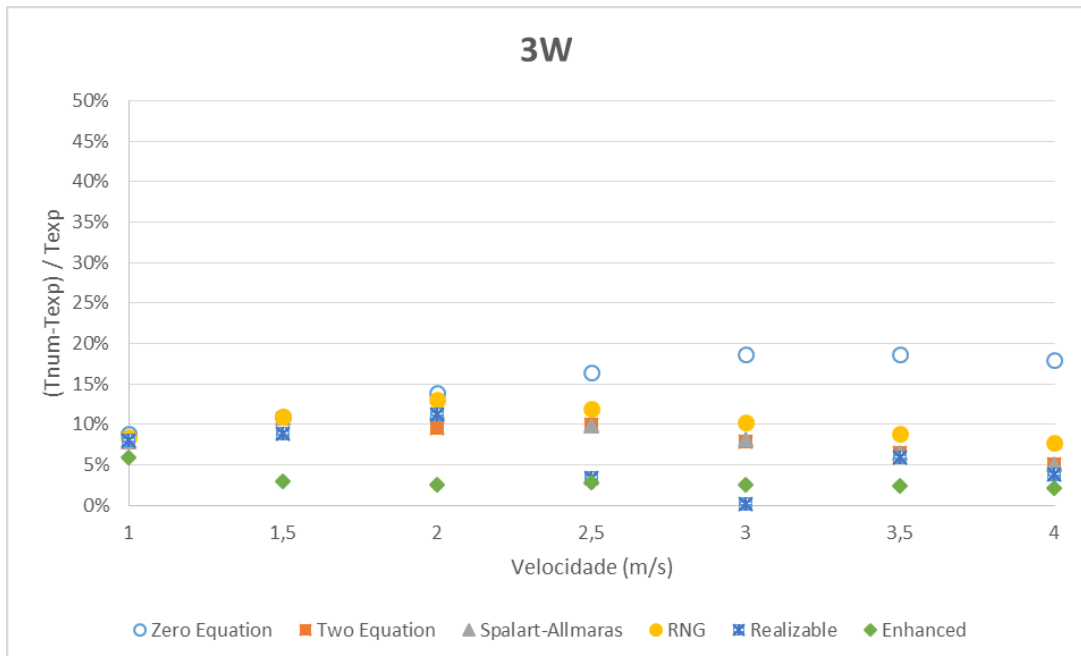
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 123 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento 5W



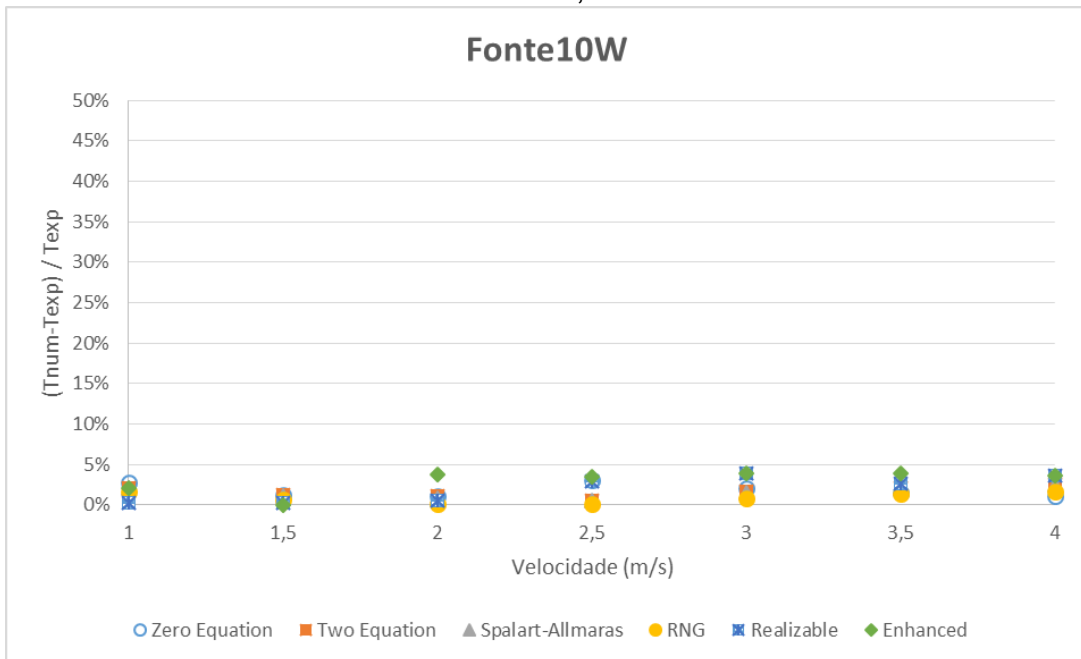
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 124 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento 3W



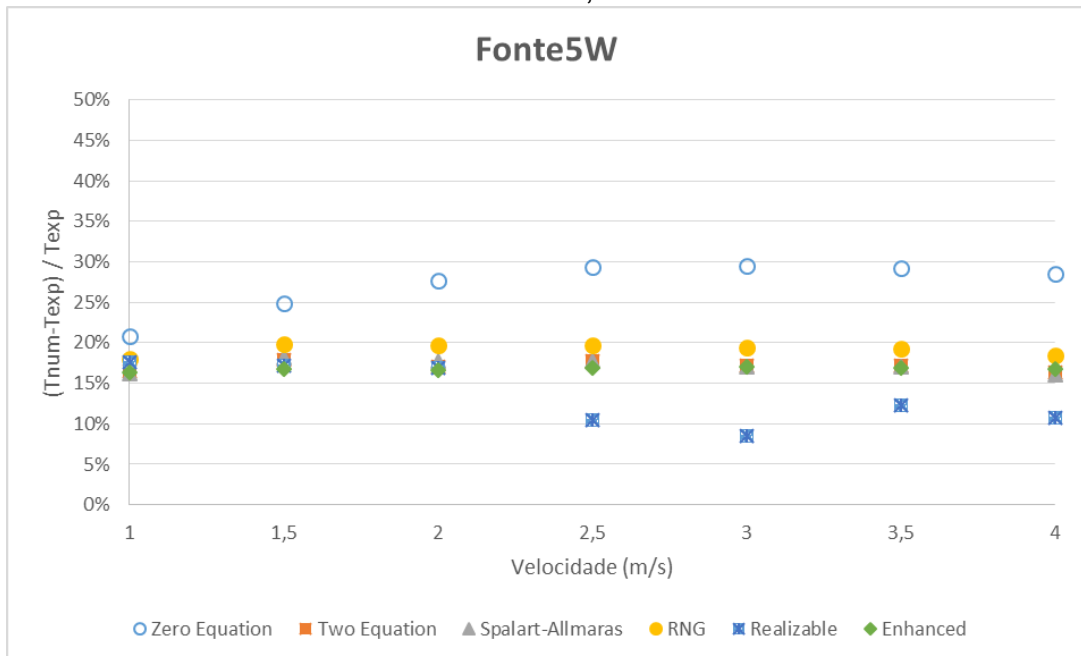
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 125 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento, fonte10W



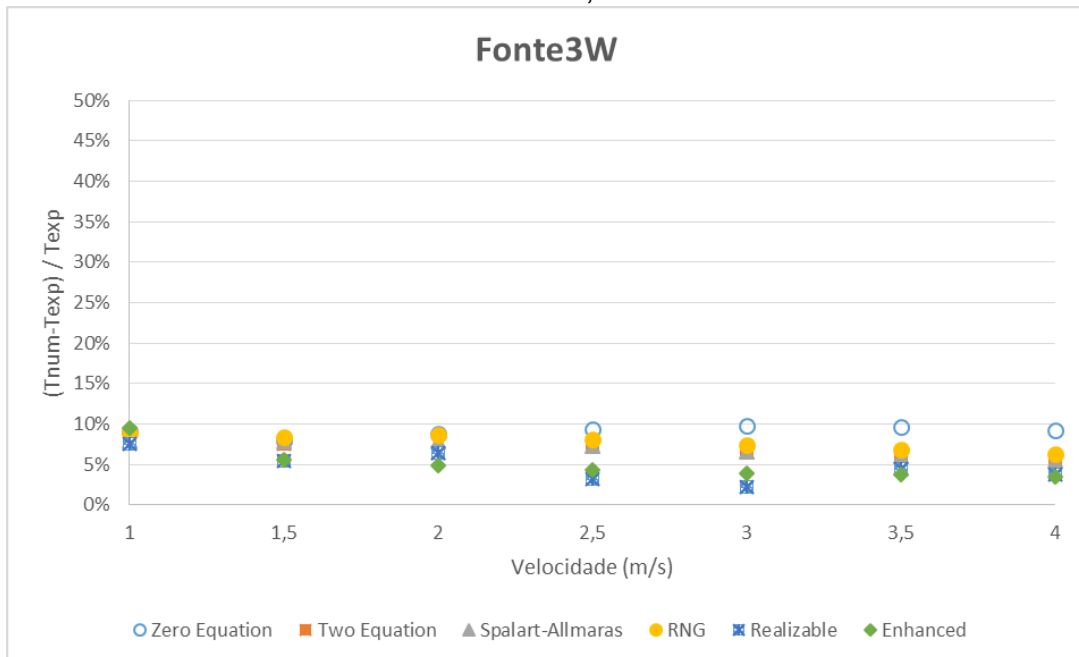
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 126 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento, fonte5W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 127 - Relação entre as temperaturas dos resultados numéricos (T_{num}) e experimentais (T_{exp}) com a faixa de velocidades utilizada para o ponto de monitoramento, fonte3W



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Sobre os resultados de comparação, Figuras 122 a 127, entre os modelos propriamente ditos é nítido o aumento da porcentagem de erro com o aumento da velocidade e principalmente para o modelo *Zero equation*. Logo, pode-se chegar à conclusão de que esse modelo se torna indicado para os casos gerais e de grande valia quando se necessita de uma estimativa inicial para convergência, porém não é indicado para obter resultados finais.

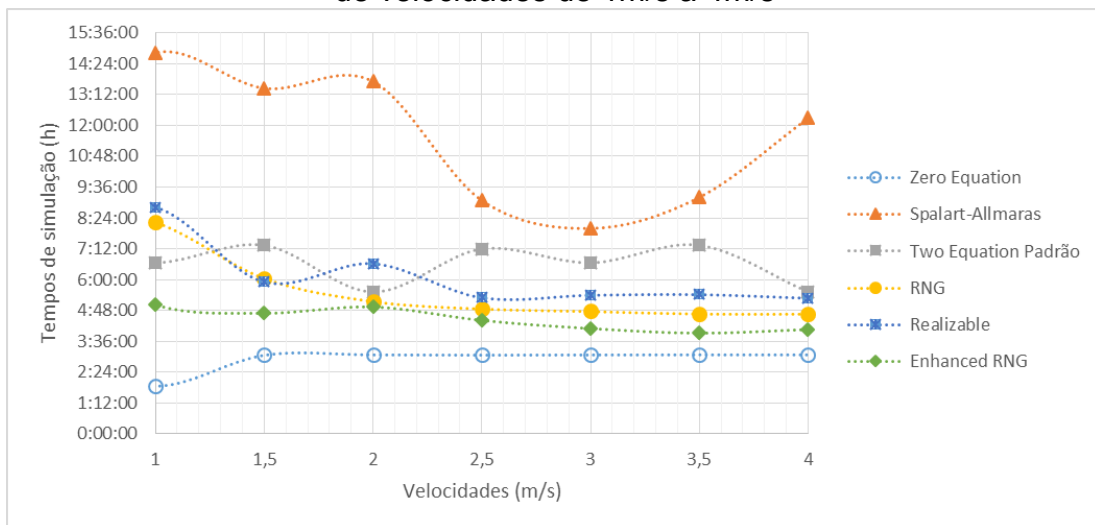
Começando pelo modelo RNG, pode-se observar uma melhor aproximação dos resultados experimentais quando utilizado em simulações com dissipação de calor em regiões mais amplas e que permitem melhores distribuições de temperatura, confirmados assim pelos resultados apresentados nas Figuras 122 e 125 para o bloco e a fonte de 10W.

Nos outros modelos há um aumento sutil e gradativo do erro à medida que se aumenta a velocidade. Com exceção do modelo *Zero equation*, os outros modelos, de um modo geral, se mantêm com erros abaixo de 25, em porcentagem, em velocidades mais altas e menores que 15, em porcentagem, em velocidades mais baixas, que são resultados relativamente bons devido à quantidade de erros acumulados tanto nos experimentos quanto nas análises numéricas. Contudo, pode-se observar que em alguns casos atingiram-se resultados bem próximos à zero.

Portanto, levando em consideração erros instrumentais, de medição e as aproximações feitas pelos próprios modelos de turbulência, os resultados alcançados chegam bem próximos dos obtidos experimentalmente.

A Figura 128 mostra diferença dos tempos de simulação para cada modelo de turbulência.

Figura 128 - Comparativo dos tempos de simulação do túnel submetido a uma faixa de velocidades de 1m/s a 4m/s



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação aos tempos de simulação (Figura 128) percebe-se nitidamente o pior desempenho do modelo de uma equação Spalart-Allmaras principalmente para velocidades menores (baixo número de Reynolds). No outro extremo temos o modelo algébrico (*Zero equation*) com o menor tempo de simulação. O que reforça a ideia de este ser um modelo de turbulência apropriado para as fases iniciais de projeto, quando ainda não se tem a ideia da convergência do caso proposto e quando se necessita de resultados mais rápidos, generalistas e que tragam uma ideia do comportamento do caso estudado.

Com relação aos modelos de duas equações, os tempos de simulação são bem parecidos destoando apenas o modelo *k-épsilon* padrão com tempos maiores do que a média dos tempos para outros modelos de duas equações. No geral, a média dos tempos entre os modelos RNG, *Realizable* e *Enhanced* é bem próxima, principalmente a partir de velocidades maiores (2,5 m/s). Tendo como melhor média dentre os tempo o modelo *Enhanced* RNG.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

As conclusões aqui obtidas partem dos resultados alcançados e dos conhecimentos absorvidos da literatura e propõem melhor elucidar o caso estudado de um escoamento, realizado a diferentes velocidades, ao redor de blocos aquecidos sobre uma réplica térmica. A fim de apontar um melhor modelo de turbulência para esse caso específico.

Em relação aos tempos de simulação percebe-se nitidamente o pior desempenho do modelo de uma equação Spalart-Allmaras principalmente para velocidades menores e um melhor desempenho para o modelo algébrico (*Zero equation*) com o menor tempo de simulação. O que reforça a ideia de este ser um modelo de turbulência apropriado para as fases iniciais de projeto. No geral, a média dos tempos entre os modelos RNG, *Realizable* e *Enhanced* é bem próxima, principalmente a partir de velocidades maiores (2,5 m/s). Tendo como melhor média dentre os tempo o modelo *Enhanced* RNG.

Analisando os resultados tendo como foco os blocos e as fontes de 3, 5 e 10W pode-se perceber que o comportamento dos blocos e fontes de 3 e 10W é mais estável, possui menor variação e se aproximam mais dos resultados experimentais. Enquanto, o bloco e fonte de 5W possuem um comportamento mais sensível às variações do escoamento sendo um pouco mais instável que os outros blocos. No entanto, muitas são as variáveis que podem influenciar esse comportamento dos blocos e fontes: dimensões, posicionamento na placa, regiões com mais vorticidade, melhor ou pior dissipação de calor, erros construtivos e entre outros. Assim, a partir dessa análise não chega-se a uma conclusão consistente para o bloco de 5W.

Tendo agora como foco as velocidades e os modelos de turbulência pode-se inferir de um modo geral que os RNG, *Realizable* e *Enhanced* possuem os melhores desempenhos para velocidades mais altas, acima de 2,5m/s. No entanto, há uma certa uniformidade no desempenho dos modelos para velocidades mais baixa.

Dentre esses modelos RNG, *Realizable* e *Enhanced* percebe-se que carregam consigo melhorias referentes ao modelo *k-epsilon* padrão com o intuito de maximizar seu desempenho. Assim, diante dessa melhora percebe-se que o modelo *Realizable* alcança uma média geral de resultados mais estáveis que os demais e

fica bem próximo dos resultados alcançados experimentalmente, o que mostra sua melhor adaptação para escoamentos que possuem recirculações (vórtices) e rotações, como é o caso do estudo abordado nesse texto.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Modificar o posicionamento dos componentes eletrônicos, *layout* e direção do escoamento.
- Simular componentes que tenham dimensões e características mais próximas dos componentes reais.
- Utilizar modelos de turbulência que seguem outras abordagens, LES e DNS, e comparar os resultados obtidos.
- Realizar as mesmas simulações feitas neste trabalho com outros softwares comerciais ou até mesmo com um software próprio, desenvolvido pelo grupo de pesquisa (generalizado ou para aplicações específicas).

REFERÊNCIAS

ABRUNHOSA, J. D. M. **Simulação de escoamento turbulento complexo com modelagem clássica e de grandes escalas**. 2003. 409 f. Tese (Doutorado) – Faculdade Pontifícia Universidade Católica-PUC, Rio de Janeiro, 2003.

ANSYS fluent. Canonsburg: [s.n.], 2013.

ARAÚJO, F. N. **Modelagem da turbulência aplicada ao escoamento sobre uma placa plana inclinada**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

CUNHA, A. P. **Desenvolvimento experimental e simulação numérica de uma réplica térmica de placa de circuito impresso**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, 2014.

DECK, S. et al. Development and application of Spalart-Allmaras one equation turbulence model to three-dimensional supersonic complex configurations. **Aerospace Science and Technology**, Issy les Moulineaux, v. 6, n. 3, p. 171-183, 2002.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC, 2006. 285 p.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC, 2008. 643 p.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **Lectures in mathematical models of turbulence**. London: Academic, 1972. 13-17 p.

LIM, C. H; AIROLDI, G; DOMINY, R. G; MAHKAMOV, K. Experimental validation of CFD modelling for heat transfer coefficient predictions in axial flux permanent magnet generators. **International Journal of Thermal Sciences**, Durham, v. 50, n. 12, p. 2451-2463, 2011.

NIECKELE, A.O. **Mecânica dos fluidos II: turbulência**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica-PUC, 2014. p. 24. Disponível em: <http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Pos_MecFluII_Mec2345/7-MecanicaFluidosII-Turbulencia_MEC2345.pdf> Acesso em: 20 out. 2015.

OBATA, D. H. S. **Análise experimental de um trocador de calor por mudança de fase e desenvolvimento de um modelo numérico simplificado**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, 2014.

PARK, J.; SHONTZ, S. M. An alternating mesh quality metric scheme for efficient mesh quality improvement. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 4, n. 1, p. 292-301, 2011.

PEREIRA, I. A. B. **Escoamento turbulento em torno de um cilindro a baixo número de Reynolds comparação entre os modelos de turbulência.** Porto: Faculdade de Engenharia de Porto, 2010.

POPE, S. B. **Turbulent flows.** Cambridge: Cambridge University, 2000.

RAMSEY, J.; JONES, K. W.; MITRA, A. K. Thermal management solutions to advanced integrated and discrete bipolar junction (BJT) device structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF ENVIRONMENTAL SYSTEM - ICES, 4., 2004, Sarajevo. **Proceedings...** Sarajevo: SEBD, 2004. p. 1-12.

RATNAM, G. S.; VENGADESAN, S. **Performance of Two equation turbulence models for prediction of flow and heat transfer over a wall mounted cube.** **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 51, n. 11, p. 2834-2846, 2008.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa fina inclinada.** 2009. 58 f. Tese (Doutorado) – Faculdade Pontifícia Universidade Católica - PUC, Rio de Janeiro, 2009.

SHIH, T. H.; LIOU, W. W.; SHABBIR, A. et al. A new k-epsilon viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation. **Computers Fluids**, Great Britain, v. 2, n. 3, p. 7-9, 1995.

SILVEIRA NETO, A. Fundamentos da turbulência nos fluidos. In: ESCOLA DE PRIMAVERA TRANSIÇÃO & TURBULÊNCIA, 3., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2002. v. 1, p. 1-52.

SILVA FREIRE, A.P. Turbulência e seu desenvolvimento histórico. In: ESCOLA DE PRIMAVERA TRANSIÇÃO & TURBULÊNCIA, 3., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2002. v. 1, p. 53-81.

SOUSA, R. R. **Análise numérica e experimental na determinação da potência térmica dissipada em componentes eletrônicos.** 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2008.

SOUZA, E. G. **Análise experimental e numérica de convecção forçada em arranjo de obstáculos dentro de canal.** 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Solteira, 2010.

SOUZA, N. Z. **Proposta de modelagem simplificada para vapor chamber.** 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

VELAYATI, E.; YAGHOUBI, M. Numerical study of convective heat transfer from an array of parallel bluff plates. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Guildford, v. 26, n. 1, p. 80-91, 2005.

WOLFSTEIN, M. The velocity and temperature distribution of one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient. **Jornal Internacional de Transferência de Calor e Massa**, Kidlington, v. 12, p. 301-318, 1969.

YAKHOT, V.; ORSZAG, A. S. Renormalization group analysis of turbulence, part I: basic theory. **Journal of Scientific Computing**, New York, v. 1, n. 1, p. 1-51, 1986.