

Simulação Computacional do Escoamento do Ar no Interior de um Auditório

Francisco David Fernandes Pereira de Freitas

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Manuel Laginha Mestre da Palma



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2011

Resumo

Qualquer edifício tem de responder aos parâmetros de conforto térmico para efeitos de produtividade, ligados ao bem-estar dos seus utilizadores e cada vez mais importantes no mercado exigente dos dias que correm. Uma forma de estudar e melhorar esses parâmetros de conforto térmico é baseada no uso dos métodos computacionais de simulação de escoamentos de ar em interiores de edifícios através de ferramentas *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*).

O caso de estudo em questão é o escoamento de ar no interior dos anfiteatros da Faculdade de Engenharia. Pretende analisar-se a distribuição espacial de velocidade e temperatura na sala para avaliar o conforto térmico dos seus ocupantes.

Atendendo às diferenças entre os parâmetros de conforto relativos a uma situação de Verão e outra de Inverno, calculou-se os valores dos mesmos para cada uma dessas situações com a sala lotada. Seguidamente, efectuou-se outro estudo - tendo ainda em conta situações de Verão e Inverno - para aferir os mesmos parâmetros, mas numa situação de ocupação de utilizadores de metade da lotação.

Utilizando gráficos e figuras ilustrativas, mostrou-se que os gradientes de temperaturas são baixos, estando os máximos na ordem dos $1,5^{\circ}\text{C}$ à altura média da cabeça de um ocupante. Em termos de velocidades, também foram registados baixos valores – da ordem dos $0,1\text{m/s}$ ao nível médio da cabeça de um ocupante - denotando-se igualmente pequenos gradientes. No entanto, em qualquer um dos casos, as temperaturas ao nível da cabeça dos ocupantes são ligeiramente mais baixas que a desejável. Nota-se algumas diferenças entre o comportamento do ar na sala para uma situação de lotação e de semi-lotação, principalmente na zona intermédia da sala. Em todos os casos foram notados gradientes de temperaturas consideráveis perto das paredes.

Abstract

Nowadays, the thermal comfort of a person working inside a building is essential for productivity, which is connected to their well-being, on the demanding market. There is a way of studying the concepts regarding thermal comfort, and that is a way in which one uses Computational Fluid Dynamics tools to simulate the air flow inside buildings.

This particular case of study involves the calculation of the air flow inside an auditorium. One aims to analyze the spatial distribution of temperature and velocity to evaluate the thermal comfort of its users.

Bearing in mind the differences between the comfort parameters on summer and winter, one calculated the values of those parameters for each of both the situations with the room full of people. Another case was studied – still considering the situations of summer and winter – also to evaluate the same parameters, but regarding a situation of only half the room full of people.

Making use of illustrations, one showed that the temperature gradients are low, as the highest ones that are located on a plane at an average height of the users' heads are $1,5^{\circ}\text{C}$. The values for velocity can also be considered low – about $0,1\text{m/s}$ – small gradients were noted as well. However, in any cases, temperatures at head levels are lower than expected. There are a few differences between the cases of full and half-full room, mainly in the middle of the room. In all the cases there were considerable temperature gradients near the walls.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao Professor José Laginha Palma, pelas indicações tecidas durante o decorrer deste trabalho;

Ao pessoal dos Serviços Técnicos de Manutenção, especialmente o Eng. Pedro Casal, pelo material disponibilizado;

Aos meus pais e às minhas irmãs, com quem aprendi e conquistei o que sei de melhor, pilares do meu sucesso ao longo de todo o caminho que percorri;

À Sofia, por todos os momentos de felicidade e conquistas de inestimável valor que partilhamos;

Ao Miguel, o meu melhor dos amigos, exemplo sem par de talento e virtude;

À Dora, pela sua inesgotável e contagiante alegria e energia;

À Maria, por me ter dado a honra de conhecer uma pessoa de um coração de bondade sem limites.

Índice de Conteúdos

1.	Introdução	13
2.	Fundamentação teórica	15
2.1.	<i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	15
2.2.	Conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento.....	17
2.3.	Técnicas de discretização numérica.....	17
2.4.	Modelos de turbulência.....	21
2.4.1.	O modelo de equações <i>Standard k-ϵ</i>	21
2.4.2.	O modelo de equações <i>SST (Shear-Stress Transport) k-ω</i>	22
2.5.	O conforto térmico em ambiente climatizado.....	22
3.	Métodos e Técnicas	25
3.1.	Caracterização das técnicas envolvidas no trabalho	25
3.2.	Introdução às ferramentas de <i>CFD</i>	25
4.	Modelação numérica da sala de aula	29
4.1.	Descrição do sistema de AVAC da sala de aula	29
4.2.	Pré-Processamento.....	29
4.2.1.	Desenho da geometria	30
4.2.2.	Malha	30
4.2.3.	Modelos de equações.....	32
4.2.4.	Materiais a utilizar	32
4.2.5.	Condições de fronteira.....	32
4.2.6.	Técnicas de cálculo para simulação.....	35
4.2.7.	Qualidade da malha gerada.....	36
4.2.8.	Critérios de paragem.....	37
5.	Apresentação e Análise de Resultados	43

Simulação Computacional do Escoamento do Ar no Interior de um Auditório

5.1.	Sala Lotada	43
5.1.1.	Situação de Verão	43
5.1.2.	Situação de Inverno	50
5.2.	Sala com metade da lotação	57
5.2.1.	Situação de Verão	57
5.2.2.	Situação de Inverno	63
5.3.	Comparação dos dois modelos de turbulência utilizados	70
6.	Conclusões e Considerações Finais	75
7.	Bibliografia	79
8.	Anexos	81

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização de pontos para uma série de <i>Taylor</i>	18
Figura 2 – Elemento linear de dois nós.	19
Figura 3 – Volume finito monodimensional.	20
Figura 4 – Representação das linhas de correntes relativas à velocidade no interior do paralelepípedo.....	27
Figura 5 – Perspectiva isométrica da geometria da sala.	30
Figura 6 – Perspectiva isométrica da geometria da sala com a malha gerada.....	31
Figura 7 – Localização dos <i>Inlets</i> e dos <i>Outlets</i> na sala.	32
Figura 8 – Plano de simetria em perspectiva isométrica.	38
Figura 9 – Plano de frente ao meio da sala em perspectiva isométrica.	38
Figura 10 – Plano de frente na zona traseira da sala em perspectiva isométrica.....	39
Figura 11 – Perspectiva isométrica do plano útil.	39
Figura 12 – Contornos das linhas criadas numa perspectiva isométrica.	40
Figura 13 – Configuração espacial dos pontos considerados para efeitos de análise de resultados.....	41
Figura 14 - Representação das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada.....	44
Figura 15 - Representação dos contornos das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada.....	44
Figura 16 - Representação dos contornos de temperatura segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada.	45
Figura 17 – Representação dos contornos de velocidade segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada.	45
Figura 18 – Representação dos contornos de temperatura segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada.	46
Figura 19 - Representação dos contornos de velocidade segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada.	46
Figura 20– Representação isométrica dos contornos de temperatura segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala lotada.	47
Figura 21– Representação isométrica dos contornos de velocidade segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala lotada.	47
Figura 22 – Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão.....	48
Figura 23 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão.....	48

Figura 24 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão.....	49
Figura 25 – Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão.....	49
Figura 26 - Representação das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada.	50
Figura 27 - Representação das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada.	50
Figura 28 – Representação das temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala lotada.	51
Figura 29 - Representação das velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala lotada.	51
Figura 30 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada.....	52
Figura 31 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada.....	52
Figura 32 - Representação isométrica dos contornos de temperatura segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala lotada.	53
Figura 33 - Representação isométrica dos contornos de velocidade segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala lotada.	53
Figura 34 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno.	54
Figura 35 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno.	54
Figura 36 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno.	55
Figura 37 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno.	55
Figura 38 - Representação das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada.....	57
Figura 39 - Representação das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada.....	58
Figura 40 - Representação das temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Verão e sala semi-lotada.....	58
Figura 41 - Representação das velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Verão e sala semi-lotada.	59
Figura 42 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.	59
Figura 43 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.	60

Figura 44 - Representação isométrica dos contornos de temperaturas segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.	60
Figura 45 - Representação isométrica dos contornos de velocidades segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.	61
Figura 46 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão.	61
Figura 47 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi--lotada no Verão.	62
Figura 48 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão.	62
Figura 49 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão.	63
Figura 50 - Representação dos contornos das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada.	63
Figura 51 - Representação dos contornos das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada.	64
Figura 52 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala semi-lotada.	64
Figura 53 - Representação dos contornos das velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala semi-lotada.	65
Figura 54 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.	65
Figura 55 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.	66
Figura 56 - Representação isométrica dos contornos de temperaturas segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.	66
Figura 57 - Representação isométrica dos contornos de velocidades segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.	67
Figura 58 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.	67
Figura 59 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.	68
Figura 60 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.	68
Figura 61 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.	69
Figura 62 - Comparação dos modelos em termos de temperaturas para uma situação de sala lotada.	70
Figura 63 – Comparação de modelos em termos de temperaturas para uma situação de sala semi-lotada.	71

Figura 64 – Comparação de modelos em termos de velocidades para uma situação de sala lotada.	71
Figura 65 – Comparação de modelos em termos de velocidades para uma situação de sala semi-lotada.	72
Figura 66 – Planta dos Anfiteatros.	83
Figura 67 – Vistas em corte dos Anfiteatros.	83
Figura 68 – Planta de AVAC dos Anfiteatros.	84
Figura 69 – Conduas de AVAC no telhado da sala.	84
Figura 70 – Resíduos para situação de Verão e sala lotada segundo o modelo <i>Standard k-ϵ</i>	85
Figura 71 - Resíduos para situação de Verão e sala lotada segundo o modelo <i>SST k-ω</i>	85
Figura 72 - Resíduos para situação de Inverno e sala lotada segundo o modelo <i>Standard k-ϵ</i>	86
Figura 73 - Resíduos para situação de Inverno e sala lotada segundo o modelo <i>SST k-ω</i>	86
Figura 74 - Resíduos para situação de Verão e sala semi-lotada segundo o modelo <i>Standard k-ϵ</i>	87
Figura 75 - Resíduos para situação de Verão e sala semi-lotada segundo o modelo <i>SST k-ω</i>	87
Figura 76 - Resíduos para situação de Inverno e sala semi-lotada segundo o modelo <i>Standard k-ϵ</i>	88
Figura 77 - Resíduos para situação de Inverno e sala semi-lotada segundo o modelo <i>SST k-ω</i>	88
Figura 78 – Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	89
Figura 79 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	89
Figura 80 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	90
Figura 81 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	90
Figura 82 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	91
Figura 83 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	91
Figura 84 – Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	92
Figura 85 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	92

Figura 86 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	93
Figura 87 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	93
Figura 88 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	94
Figura 89 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	94
Figura 90 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	95
Figura 91 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	95
Figura 92 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	96
Figura 93 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	96
Figura 94 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	97
Figura 95 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	97
Figura 96 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	98
Figura 97 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	98
Figura 98 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	99
Figura 99 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	99
Figura 100 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas segundo o plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	100
Figura 101 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas segundo o plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$	100
Figura 102 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	101
Figura 103 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$	101

Figura 104 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	102
Figura 105 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	102
Figura 106 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	103
Figura 107 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	103
Figura 108 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Verão e sala semi--lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	104
Figura 109 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Verão e sala semi--lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	104
Figura 110 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	105
Figura 111 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	105
Figura 112 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	106
Figura 113 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	106
Figura 114 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	107
Figura 115 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	107
Figura 116 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	108
Figura 117 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	108
Figura 118 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	109
Figura 119 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	109
Figura 120 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	110

Figura 121 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala semi--lotada por resolução através do modelo <i>SST k-ω</i>	110
Figura 122 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	111
Figura 123 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	111
Figura 124 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	112
Figura 125 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo <i>SST k-ω</i>	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros da malha alterados relativamente aos parâmetros padrão.....	31
Tabela 2 – Condições de entrada e saída do ar no anfiteatro.	34
Tabela 3 – Temperaturas a utilizar na simulação.	35
Tabela 4 – Discretizações espaciais utilizadas.	36
Tabela 5 – Valores para os <i>Under-Relaxation Factors</i>	36
Tabela 6 - Valores dos parâmetros relativos à qualidade da malha gerada.	37
Tabela 7 – Valores das velocidades e temperaturas em vários pontos da sala e para várias situações e com resolução segundo os dois modelos considerados.....	113

Nomenclatura utilizada

A	Área
c	Calor específico a pressão constante
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$	Constantes do modelo de turbulência <i>Standard k-ε</i>
D_h	Diâmetro hidráulico
D_ω	Difusão no escoamento
ε	Taxa de dissipação de κ
G_b	Geração de energia cinética devido à flutuabilidade
G_k	Geração da energia cinética de turbulência
G_ω	Geração da taxa de dissipação específica
I	Intensidade de turbulência
κ	Energia cinética de turbulência
k	Condutividade térmica
μ_t	Viscosidade de turbulência
P_w	Perímetro
p	Pressão
Q	Caudal
Re	Número de <i>Reynolds</i>
ρ	Massa volúmica
S_h	Taxa de dissipação de energia por unidade de volume
$S_K, S_\varepsilon, S_\omega$	Termos a definir pelo utilizador
T	Temperatura
t	Tempo
σ_E	Número de <i>Prandtl</i> para ε
σ_k	Número de <i>Prandtl</i> para k
Γ_k	Coeficiente de difusão de k
Γ_ω	Coeficiente de difusão de ω
u	Velocidade do escoamento
ω	Taxa de dissipação específica de k
Y_k	Dissipação de energia cinética
Y_M	Contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível para a taxa de dissipação total
Y_ω	Dissipação de ω devido à turbulência

1. Introdução

Hoje em dia, o conforto térmico é uma característica a exigir em qualquer edifício, dada a sua influência na saúde ou na taxa de produtividade dos seus ocupantes.

Por esta e outras razões, os Decretos-lei 80/2006 e 79/2006 de 4 de Abril visam a implementação de regras que restrinjam os espaços climatizados a espaços termicamente confortáveis e, assim, não susceptíveis de desagrado ou mesmo, na pior das situações, da aquisição de doenças devido a diferenças de temperaturas ou “correntes de ar”.

O presente trabalho visa o estudo do comportamento do ar no interior de um auditório da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, uma sala climatizada, em termos de temperatura e velocidade. Pretende escrutinar-se os resultados obtidos, comparando-os com o registado nos Decretos-lei e em outra literatura científica e verificar-se se a sala preenche os requisitos de conforto.

Para tais efeitos, utilizou-se o *software* comercial *Fluent*, parte integrante do *Ansys*. O trabalho está dividido em secções, devidamente assinaladas e ordenadas. Passa a tratar-se sucintamente do objectivo de cada uma delas.

A Fundamentação teórica serve de base para apresentação do código matemático utilizado por detrás da interface da Dinâmica de Fluidos Computacional. Refere-se o significado físico das equações presentes no código. Explora-se também os modelos de turbulência utilizados nas simulações e ainda os parâmetros que determinam o conforto de um ser humano em ambiente climatizado. No Capítulo 3 explica-se os Métodos e Técnicas que levaram à familiarização com o *software*, fazendo referência ao caso académico de estudo anterior àquele que é o

objectivo do trabalho. O estudo do comportamento do ar na sala começa então e o capítulo seguinte é dedicado à explicitação das imposições colocadas ao *software* – o domínio de integração, a criação da malha, as condições de fronteira e todos os outros parâmetros necessários à definição completa do problema. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados retornados pelo *software* para as situações impostas no capítulo que o antecede. O Capítulo 6 finaliza o trabalho, fazendo referência aos aspectos considerados mais relevantes no mesmo. Faz-se ainda referência à bibliografia utilizada e anexa-se, por fim, outros dados considerados relevantes no estudo realizado.

2. Fundamentação teórica

Uma simulação computacional exige sempre o cálculo com recurso a equações matemáticas e a técnicas utilizadas para essa resolução. Para o caso em questão, passa a apresentar-se o fundamento matemático da simulação computacional para o caso em estudo de *Computational Fluid Dynamics* e os modelos de turbulência utilizados. Expõe-se também as condições que determinam o conforto térmico num ambiente climatizado.

2.1. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Os escoamentos de fluidos influenciam directa ou indirectamente a vida do ser humano, uma vez que estes podem ser encontrados na vida do dia-a-dia. São exemplos destes escoamentos os fenómenos meteorológicos (chuva, vento, furacões), os resíduos tóxicos (poluição do ar), a combustão nos motores dos automóveis e outros dispositivos de propulsão, assim como processos fisiológicos do corpo humano (circulação de sangue, respiração), entre outros.

A Dinâmica de Fluidos Computacional é um ramo da mecânica dos fluidos que se dedica ao estudo, através do uso de algoritmos e métodos numéricos, de problemas que envolvem o comportamento de sistemas, processos e equipamento envolvendo escoamentos de gases e líquidos, transferência de calor e massa, reacções químicas e fenómenos físicos relacionados. São efectuados cálculos por intermédio de computadores, que simulam a interacção de fluidos em superfícies definidas pelas suas condições de fronteira.

Quanto mais potente um computador, melhores soluções se pode obter da implementação de um problema. Investigações recentes, no entanto, levaram à criação de *software* que aumenta a precisão e a rapidez de casos complexos de escoamentos transónicos ou turbulentos. Contudo, é necessária uma validação dos resultados, sendo esta efectuada com recorrência a experimentações em túnel de vento. Validações subsequentes são elaboradas por outros meios como, por exemplo, por intermédio de testes de voo. O uso de uma ferramenta *CFD* mostra-se útil numa situação em que os objectivos da simulação sejam estudos da redução de perdas de pressão, da sustentação aerodinâmica ou do arrasto ou do cálculo de escoamentos de ar em instalações com ar condicionado, entre outros.

Todos os códigos *CFD* contêm três elementos: o *pre-processor*, o *solver* e o *post-processor*. Utiliza-se o primeiro para definir o problema em termos geométricos, gerar a malha, impor os parâmetros do escoamento e as condições de fronteira. O segundo é utilizado para resolver as equações relativas ao escoamento consoante as definições impostas no primeiro passo. Existem quatro técnicas diferentes de resolução destas equações, que são a técnica das diferenças finitas, dos elementos finitos, dos volumes finitos e a técnica espectral. Finalmente, usa-se o *post-processor* para analisar os resultados retornados sob a forma de valores, gráficos ou figuras elucidativas.

Existem, naturalmente, diferenças entre a situação de experimentação e simulação, sendo que o processo de experimentação retorna uma descrição quantitativa dos escoamentos - para números limitados de pontos e instantes de tempo, modelos geralmente à escala dependente do tamanho do laboratório e do orçamento e para uma panóplia de problemas e condições de operação limitados; associados às fontes de erro na experimentação estão as medições efectuadas e os distúrbios no escoamento causados pelos instrumentos de medição. O processo de simulação retorna ao utilizador uma descrição da previsão dos resultados por experimentação dos escoamentos – com grande resolução no espaço e no tempo, para todo o domínio à escala real e para qualquer problema com condições de fronteira realísticas. Associadas às fontes de erro na simulação podem estar a modelação do problema, a sua discretização, as iterações e a implementação.

A simulação, comparativamente com a experimentação, pode afirmar-se geralmente mais rápida, mais barata, mais fácil no que toca à modificação de parâmetros e, consequentemente, de maior facilidade relativamente ao estudo de parâmetros variados. No entanto, os resultados de uma simulação em *CFD* podem não ser totalmente fiáveis, pois os parâmetros de entrada podem envolver imprecisão, os modelos matemáticos podem não ser totalmente adequados ou as potencialidades do computador podem restringir a precisão nos resultados.

O tempo de computação de uma simulação de um escoamento depende, em grande parte, da escolha dos algoritmos numéricos, dos valores impostos como critérios de paragem e dos parâmetros de discretização (tais como a qualidade da malha ou o tamanho); por sua vez, a qualidade dos resultados está dependente do modelo matemático utilizado, da malha ou dos critérios de paragem.

2.2. Conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento

Pelos conceitos aprendidos de mecânica dos fluidos, é sabido que todo o escoamento tem de respeitar o princípio da conservação da massa e da quantidade de movimento. As equações em seguida referidas são válidas para um caso particular em que se assume escoamento incompressível e com fluido de viscosidade constante ao longo do escoamento e são formadas a partir das equações gerais de *Navier-Stokes*, juntamente com a equação da energia:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{k}{c} \text{grad } T \right) + \frac{S_h}{c} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0 \quad (2.3)$$

Na equação da energia, (2.2), o termo do primeiro membro representa a influência da transferência de calor por convecção no fluido e o termo $\text{div} \left(\frac{k}{c} \text{grad } T \right)$ o efeito da transferência de calor por condução no fluido. O termo S_h representa a taxa de geração de calor por unidade de volume, c o calor específico a pressão constante e k a condutividade térmica do fluido.

2.3. Técnicas de discretização numérica

Para resolver equações que governam o comportamento do fluido, tem de ser efectuado primeiramente o processo de discretização. Cada termo constante na equação diferencial parcial é escrito tal que o computador possa ser programado para calcular. Existem várias técnicas de discretização, mas aqui só serão expostas as três mais utilizadas: a técnica das diferenças finitas, a técnica dos elementos finitos e a técnica dos volumes finitos. Também podem ser utilizados métodos espectrais, mas não serão aqui abordados.

Técnica das diferenças finitas

A técnica das diferenças finitas usa séries de expansão de *Taylor* para escrever as derivadas da variável como as diferenças entre os valores da variável em vários pontos no espaço ou no

tempo. A utilização das séries de *Taylor* para discretizar as derivadas da variável dependente é mostrada na Figura 1.

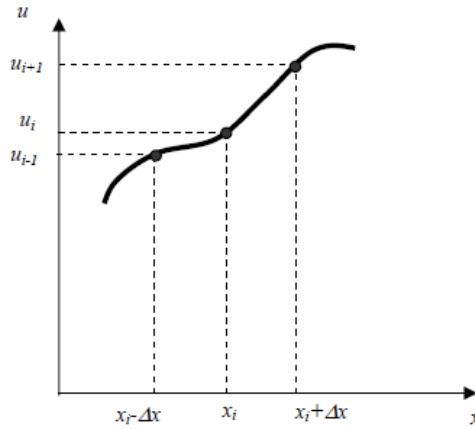


Figura 1 – Localização de pontos para uma série de *Taylor*.

Após a discretização, a curva $u(x)$ pode ser representada como um conjunto de pontos discretos, u_i . Estes pontos podem ser relacionados uns com os outros com recorrência às séries de *Taylor*.

Assuma-se que u representa uma velocidade. Considerando dois pontos, $(i+1)$ e $(i-1)$ e um afastamento, Δx , do ponto i , a velocidade $u(i)$ pode ser expressa numa série de *Taylor* da seguinte maneira:

$$u_{i+1} = u_i + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) \frac{(\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right) \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots \quad (2.4)$$

$$u_{i-1} = u_i - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) \frac{(\Delta x)^2}{2} - \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right) \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots \quad (2.5)$$

Estas equações são matematicamente exactas se o número de termos for infinito e Δx for infinitamente pequeno. Um erro de truncatura é gerado se o número de termos for finito ou o valor de Δx for grande. Para uma expressão de segunda ordem, esse erro é dado pela expressão:

$$\sum_{n=3}^{\infty} \left(\frac{\partial^n u}{\partial x^n}\right) \frac{(\Delta x)^{n-1}}{n!} \quad (2.6)$$

Técnica dos elementos finitos

Na técnica dos elementos finitos, o domínio considerado é dividido em pequenos números de subdomínios, designados elementos. É assumida uma função simples de cada variável dentro de cada elemento e usada a soma da variação da variável em cada elemento para descrever o escoamento de fluxos total.

Considere-se o elemento exibido na Figura 2, cuja variável u varia linearmente dentro do elemento. Os pontos extremos do elemento são chamados nós. Para uma variação linear de u , a primeira derivada em relação a x será uma constante. Se existir uma variação de u dentro de um elemento, não é possível definir uma segunda derivada para este.

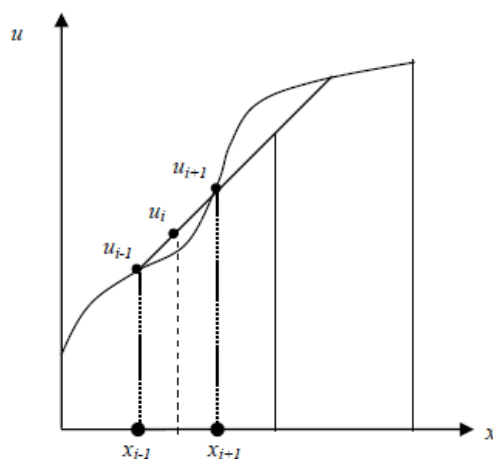


Figura 2 – Elemento linear de dois nós.

Uma vez que muitas situações de mecânica dos fluidos envolvem segundas derivadas, utiliza-se uma técnica para superar este problema. Em primeiro lugar, a equação diferencial parcial é multiplicada por uma função desconhecida e, depois, pode ser integrada ao longo do seu domínio de integração. Finalmente, os termos que necessitam de redução da ordem das suas derivadas podem ser integrados por partes.

Técnica dos Volumes Finitos

A técnica dos volumes finitos é a mais utilizada em aplicações de *CFD*. Um volume finito típico é mostrado na Figura 3. Nesta técnica, o centróide do volume, ponto P , é o ponto de referência onde se quer discretizar a equação diferencial parcial.

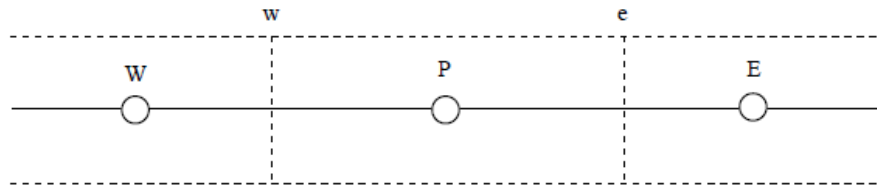


Figura 3 – Volume finito monodimensional.

Os volumes vizinhos são denominados W (para o volume a Oeste) e E (para o volume a Este). Para o volume finito monodimensional exibido na Figura 3, o volume cujo centróide é P tem duas fronteiras - w e e .

A segunda derivada de uma variável em P pode ser definida como uma diferença entre as primeiras derivadas nas faces do volume.

$$\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]_p = \frac{\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_e - \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_w}{x_e - x_w} \quad (2.7)$$

As primeiras derivadas nas faces do volume podem ser definidas através da diferença entre os valores de variável nos centróides do volume vizinho.

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_e = \frac{u_E - u_P}{x_E - x_P} \quad (2.8)$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_w = \frac{u_P - u_W}{x_P - x_W} \quad (2.9)$$

Esta técnica é descrita como a técnica das células centradas, em que as variáveis de fluxo são colocadas no centro da célula computacional, sendo a mais popular entre as utilizadas, uma vez que considera implementações mais simples que em qualquer outro método.

A técnica dos volumes finitos deve usar geralmente nós de geometria regular para maiores eficiências no cálculo computacional. No entanto, outros nós de geometria irregular têm sido utilizados para simulação de escoamentos em geometrias complexas. Isto traduz-se, porém, num maior esforço computacional, uma vez que o algoritmo usa uma tabela para verificar as relações geométricas entre volumes e faces de elementos.

2.4. Modelos de turbulência

Para escoamentos turbulentos, os modelos de turbulência mais usados hoje em dia são os modelos de duas equações, em que são resolvidas equações de transporte com resolução independente em termos de velocidade turbulenta e de escalas de comprimento.

2.4.1. O modelo de equações *Standard k-ε*

O modelo *Standard k-ε* é um modelo com base nas equações de transporte para a energia cinética de turbulência (k) e para a taxa de dissipação de energia (ε). O modelo de equação de transporte para k é derivado da equação exacta, enquanto o modelo de equação para ε foi obtido empiricamente.

O cálculo do modelo *Standard k-ε* é apenas válido um escoamento totalmente turbulento e os efeitos da viscosidade molecular neste modelo são desprezáveis.

São descritas, seguidamente, as equações de transporte para este modelo. A energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação são obtidas a partir de

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_E} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.11)$$

em que G_k representa a geração de energia cinética de turbulência devido ao gradiente de velocidade média, G_b a geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade e Y_M a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível para a taxa de dissipação total. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são coeficientes dos modelos de turbulência. σ_k e σ_E são, respectivamente, os números de *Prandtl* para k e ε e S_K e S_ε são termos a definir pelo utilizador.

A viscosidade de turbulência, μ_t , combina os termos k e ε na sua resolução e é definida pela seguinte equação:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

As constantes presentes nas duas equações do modelo *Standard k-ε* têm valores padrão, sendo eles $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Estes valores foram obtidos experimentalmente em escoamentos turbulentos.

2.4.2. O modelo de equações SST (*Shear-Stress Transport*) *k-ω*

Este modelo de equações foi desenvolvido com o objectivo de combinar a robustez e a precisão do modelo *k-ω* – são modelos muito semelhantes - obtendo algumas vantagens relativamente ao modelo *k-ω Standard*. Este último não será abordado, mas mais informação sobre o mesmo poderá ser consultada em Wilcox, [2].

As equações que regem o modelo SST *k-ω* são:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.14)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética da turbulência relativa aos gradientes de velocidade média, G_ω , por sua vez, a geração da taxa de dissipação específica, ω . Y_k representa a dissipação de energia cinética de turbulência, Y_ω a dissipação de ω . O termo D_ω é representativo da difusão no escoamento.

2.5. O conforto térmico em ambiente climatizado

A capacidade de o corpo humano transferir calor para o exterior está dependente de essencialmente quatro factores: a temperatura do ar à sua volta, a temperatura das superfícies circundantes, a humidade e a velocidade do ar. Quando se pensa em conforto térmico há que considerar, pois, estes factores. A temperatura operativa de um ambiente climatizado, segundo

Stoecker e Jones [9], deverá ser de entre 20 e 26°C, a temperatura de ponto de orvalho entre 2 e 17°C e a velocidade do ar não deverá exceder os 0,25m/s.

McQuiston e Parker [8] vão mais adiante no que toca ao estudo do conforto térmico em edifícios e afirmam que, no Inverno, a velocidade do ar não deverá exceder os 0,15m/s na zona ocupada pelos utilizadores e que, no Verão, o movimento do ar nessa zona não deverá ultrapassar os 0,25m/s. Restringem também o intervalo de temperaturas operativas, afirmando-as devendo ser de entre 23 e 24°C. É também explicitado em [12] que a velocidade do ar interior não deverá exceder os 0,2m/s.

Devido à variação do tipo de indumentária utilizado nas épocas de Verão e de Inverno, a gama de temperaturas de conforto no Verão é superior à de no Inverno.

Na zona de ocupação dos utilizadores, a temperatura não deve exceder uma diferença de 3°C na vertical, ou seja, entre a zona dos tornozelos e da cabeça.

Segundo Koehler [10], “uma pessoa com 2m² de superfície corporal exibe uma temperatura de 32°C ao nível da pele (sem roupa)”. Isto significa que a temperatura a que uma pessoa está a transferir calor para o exterior deverá ser naturalmente mais baixa que este valor devido ao uso de roupa; para além disto, tendo em conta as estações de Verão e de Inverno, essa transferência de calor para o exterior deverá ser de maior quantidade no Verão do que no Inverno, uma vez que existe maior exposição dérmica nessa estação, dado um uso de menor quantidade de roupa.

3. Métodos e Técnicas

3.1. Caracterização das técnicas envolvidas no trabalho

Este trabalho foi realizado por intermédio do *software Fluent*. Por não fazer parte do plano de leccionação ao longo do curso, foi necessária uma elucidação inicial, tendo para o efeito sido utilizado um modelo idealizado meramente académico, descrito em seguida. Seja de notar que todos os processos de simulação foram efectuados por intermédio deste *software* – o *Fluent* – sendo o mesmo uma ferramenta integrante do *Ansys*.

Os conceitos matemáticos (de mecânica dos fluidos) utilizados pelo *software* em questão foram assimilados pelo estudo da bibliografia utilizada explicitada no espaço que lhe é dedicado neste trabalho. Este passo foi seguido de uma simulação de um objecto através do *software* supracitado em que pelo interior atravessava uma corrente de fluido.

3.2. Introdução às ferramentas de CFD

O objecto inicial de estudo foi um paralelepípedo com o acrescento de um corpo cilíndrico colocado verticalmente e situado na zona intermédia do paralelepípedo. A este estão associadas uma pequena entrada e uma saída de ar em faces distintas do mesmo. As temperaturas foram escolhidas aleatoriamente, mas sempre tendo tido em conta que o objectivo desta primeira simulação foi o estudo dos gradientes de temperatura e de velocidade observados no interior do paralelepípedo. Sendo assim, o domínio de integração do problema em questão foi composto pelas paredes do objecto e pelo corpo cilíndrico.

O primeiro passo foi a modelação do objecto através do *Design Modeler* existente no *Workbench* do *Ansys*. Este subprograma do *Ansys* é de utilização e interface semelhantes a outros *softwares* utilizados como ferramentas de modelação geométrica, tal como o *SolidWorks* ou o *Inventor*.

Seguidamente, construiu-se a malha do objecto de estudo. Para o efeito, foi utilizado o subprograma *Mesher* existente no *Ansys*. Houve cuidados neste passo que se prenderam com a qualidade da malha para que se evitasse problemas relativos à convergência da solução no seu cálculo. Os parâmetros aos quais foi dedicada especial atenção foram o *Element Quality* – o valor mínimo deverá ser, no máximo, 0,10 – o *Skewness* – o seu valor máximo não deve ultrapassar os 0,98 – e ainda o *Aspect Ratio* – de valor máximo inferior a 100.

O passo seguinte consistiu em nomear as faces do objecto para que depois se pudesse estabelecer as condições de fronteira.

A procura da solução exige uma imposição de parâmetros físicos aos quais se pretende que o sistema obedeça. Esses parâmetros são implementados no subprograma *Fluent*, que trata de retornar a solução para o problema em mãos. Passa a listar-se o que foi imposto ao problema pelo utilizador para este caso específico:

- a influência da equação da energia devido às diferenças de temperaturas presentes no interior do objecto;
- o regime de escoamento observado sob a consequente escolha do modelo das equações para resolução do problema;
- os tipos de materiais a utilizar - alumínio para as paredes e para o corpo cilíndrico do cubo e ar como fluido;
- definição das temperaturas de cada parede e do corpo cilíndrico: As paredes laterais de área superior foram colocadas a igual temperatura, tal como a parede superior e inferior, assim como se associou temperaturas iguais às paredes de menor área;
- definição da temperatura de entrada do fluido e da sua respectiva velocidade - foram estipulados 15°C e 2m/s , respectivamente.

Procedeu-se, depois da imposição destes parâmetros, ao cálculo da solução. A solução só é válida para o problema se existir convergência dos resíduos do cálculo. O passo seguinte consiste na apresentação dos resultados em termos de gráficos, animações ou figuras elucidativas de escoamentos. Apresenta-se seguidamente a Figura 4, que explicita a simulação do problema em termos de escoamento de velocidade.

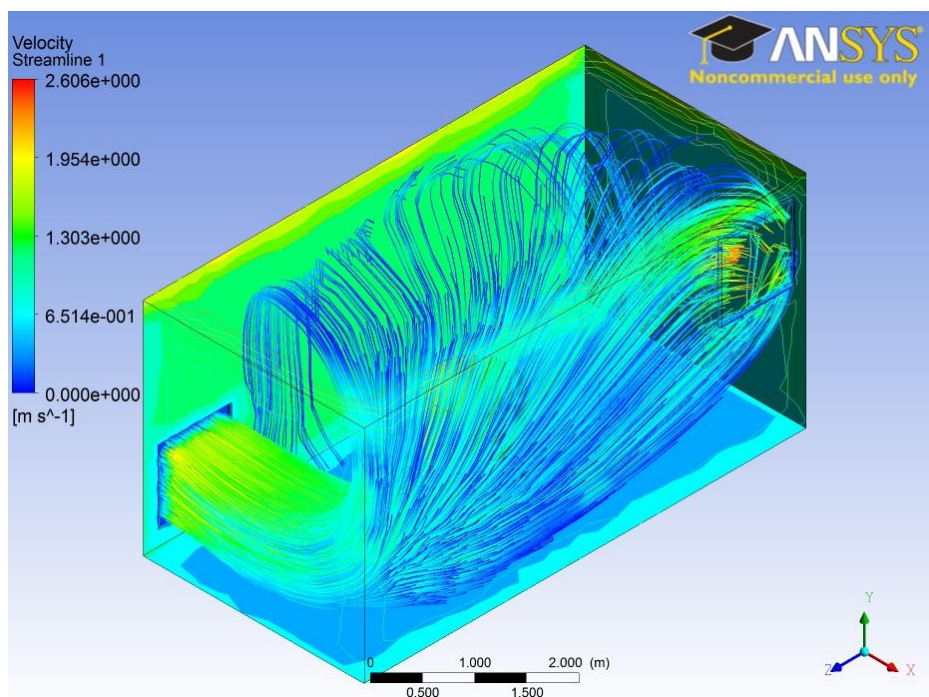


Figura 4 – Representação das linhas de correntes relativas à velocidade no interior do paralelepípedo.

4. Modelação numérica da sala de aula

Nesta fase do trabalho pretendeu estudar-se o comportamento do ar no anfiteatro em simulação computacional com condições que se aproximassem ao máximo das reais. Para tal, foi necessário que se recorresse às plantas da instalação em questão para definição do domínio de integração e que se efectuasse o levantamento e o cálculo das condições de entrada e saída do ar na sala.

4.1. Descrição do sistema de AVAC da sala de aula

O sistema de AVAC que serve a sala objecto de estudo é constituído por uma “*roof-top*” equipada com uma bomba de calor sita por cima da sala, no telhado. O ar tratado é insuflado através de sistemas de insuflação. Existe também uma UTA responsável pelo retorno, extracção e admissão de ar novo. Tanto o interior das condutas como o seu exterior contém sensores que medem a temperatura de insuflação, de extracção e do ar exterior. Ainda existe um aparelho medidor da humidade relativa do ar insuflado na sala. A temperatura do interior da sala está programada para a referência de 24°C em qualquer altura do ano e o controlo da temperatura de insuflação é determinado consoante o valor da temperatura de extracção através de um sensor de temperatura: se o valor da temperatura à entrada dos extractores for igual ao de referência, a temperatura de insuflação será igual; no entanto, se a temperatura de extracção for de valor superior ao de referência, a temperatura de insuflação será automaticamente regulada para um valor obrigatoriamente inferior ao de referência e vice-versa.

4.2. Pré-Processamento

Nesta fase, o utilizador adiciona ao programa informação que contenha os dados físicos para que o *software* retorne a solução. São esses parâmetros a geometria, o processamento da malha, os materiais a utilizar, os modelos de equações, as condições de fronteira a utilizar, entre outros.

4.2.1. Desenho da geometria

O primeiro passo para a simulação do escoamento do ar num corpo é o seu desenho (Figura 5). Foram usadas técnicas semelhantes às usadas noutros programas de desenho em 3D, nomeadamente as de *Extrude* para fins de *Add Material*, *Cut Material*, *Imprint Faces*, *Add Frozen* e com recorrência a planos e rectas auxiliares para a criação da geometria da sala. As condições de simetria da sala permitiram que ainda fosse realizada uma operação *Mirror*.

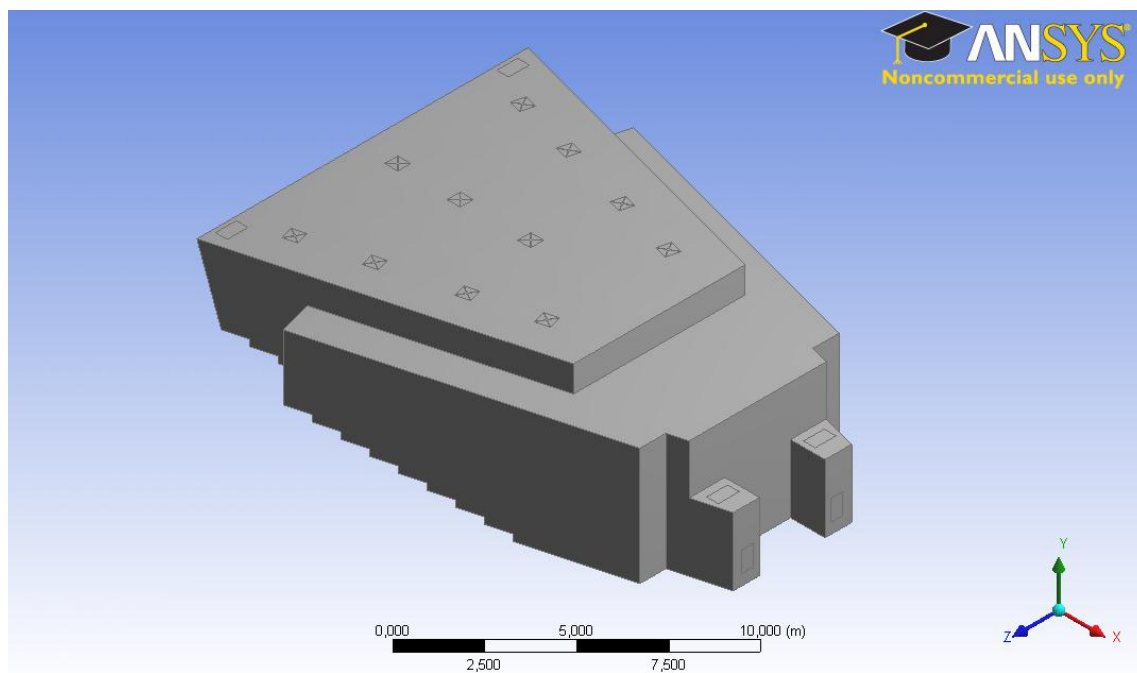


Figura 5 – Perspectiva isométrica da geometria da sala.

Toda a geometria foi criada com base na informação constante na planta do edifício, apresentada nos Anexos.

4.2.2. Malha

Para o cálculo da solução, é necessária a criação de uma malha que tenha não só um número de nós suficientemente adequado, mas também qualidade tal que seja atingida a convergência aquando da fase do processo iterativo. A malha para o objecto de estudo em questão foi criada a partir do *Mesher* constante no *Ansys Workbench*.

A experiência adquirida na fase de ambientação ao *software Ansys Workbench* ditou que houvesse especial atenção aos parâmetros *Skewness*, *Aspect Ratio* e *Element Quality*, relativos à qualidade da malha. Sem uma boa qualidade da malha a não convergência dos valores no processo iterativo pode tornar impeditivo o cálculo da solução.

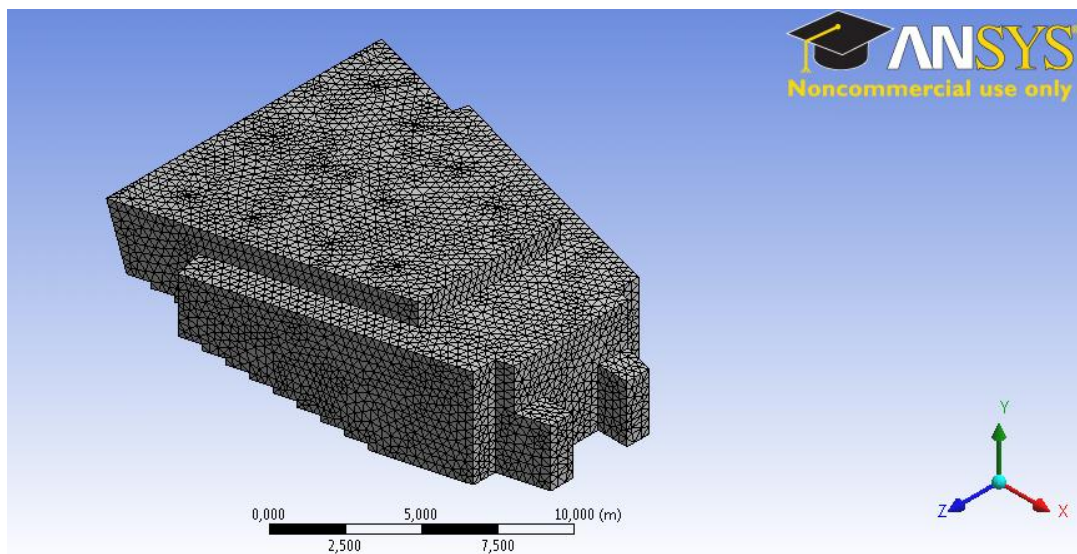


Figura 6 – Perspectiva isométrica da geometria da sala com a malha gerada.

A Tabela 1 explicita os detalhes padrão do *software* e as alterações efectuadas relativamente a estes. A ausência de parâmetros na tabela, mas que constantes no *software*, implica a não alteração dos seus valores padrão.

Tabela 1 – Parâmetros da malha alterados relativamente aos parâmetros padrão.

		Parâmetros padrão	Parâmetros alterados
Sizing	<i>Use Advanced Size Function</i>	<i>On: Curvature</i>	<i>On: Fixed</i>
	<i>Relevance Center</i>	<i>Coarse</i>	<i>Fine</i>
<i>Inflation</i>	<i>Use Automatic Inflation</i>	<i>None</i>	<i>Program Controlled</i>
<i>Advanced</i>	<i>Element Midside Nodes</i>	<i>Dropped</i>	<i>Program Controlled</i>

Note-se que as alterações efectuadas aos parâmetros da malha que conduzem à boa qualidade desta foram efectuadas mediante consulta ao aconselhado pela bibliografia, mais especificamente em [1].

Nesta fase também se definiu as zonas para que o *software* reconhecesse o tipo de condições de fronteira a aplicar a cada elemento. Os *inlets* e *outlets* foram desenhados consoante o constante nas especificações de projecto da sala e foram identificados consoante o constante na Figura 7. De notar, na mesma figura, que as insuflações de ar estão todas numeradas, sendo 11 no total e as extracções as entidades numeradas de A a F.

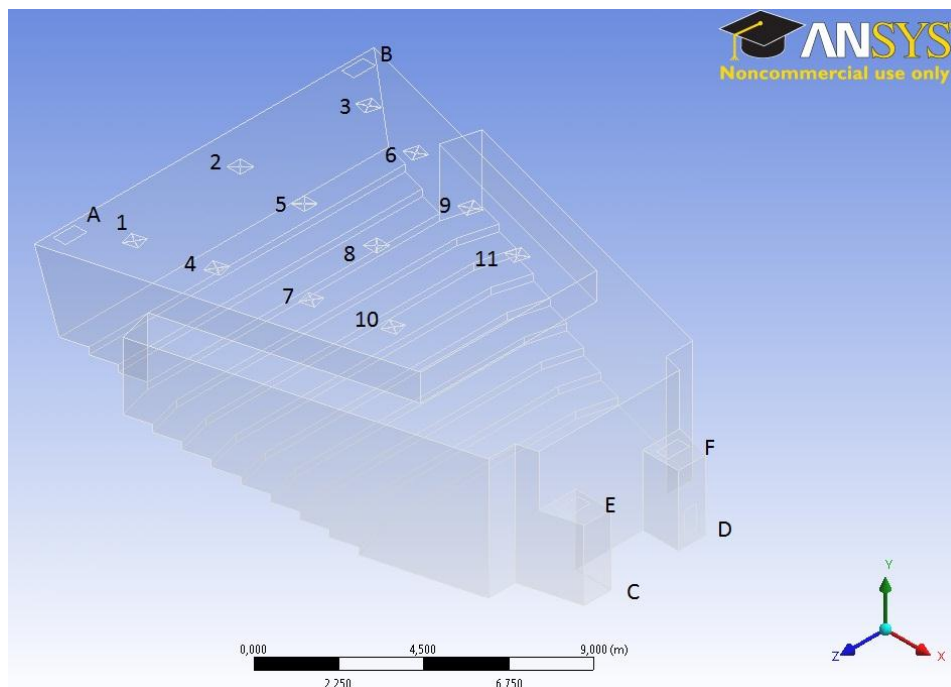


Figura 7 – Localização dos *Inlets* e dos *Outlets* na sala.

4.2.3. Modelos de equações

Para o caso em estudo, sabe-se que o modelo a utilizar deverá tratar um caso de escoamento turbulento e, para tal, utilizou-se para a resolução do problema dois modelos em que cada um envolve escoamento viscoso de duas equações, nomeadamente os modelos *Standard k-ε* e *SST k-ω*. Estes modelos de turbulência serão analisados mais à frente, na Apresentação e Análise de Resultados.

4.2.4. Materiais a utilizar

Uma vez que apenas se pretende verificar o comportamento do ar ao longo de todo o espaço da sala, o fluido a seleccionar no programa será apenas o ar. As propriedades consideradas foram as seguintes: $c_p=1006,4$ kJ/kg-K; massa volúmica $\rho=1,225\text{kg/m}^3$; condutividade térmica $k=0,0242$ W/m-K; Viscosidade dinâmica $\mu=1\times 10^{-5}$ kg/m-s.

4.2.5. Condições de fronteira

A imposição das condições de fronteira implica que se identifique o domínio de integração do objecto de estudo. Este passo é efectuado no *Meshing* e, neste caso, teve de se considerar as paredes do anfiteatro como *Wall*, o chão também como *Wall*, as insuflações como *Velocity-Inlet* e as extracções de ar como *Exhaust-Fan*. O chão foi considerado separadamente das

restantes paredes para se poder impor um piso radiante que simulasse as condições de temperatura introduzidas pela presença de pessoas na sala.

Para efeitos de simulação do sentido e da direcção do ar, as grelhas de insuflação foram subdivididas em quatro partes. Desta forma, existem quatro sentidos de insuflação. No entanto, esta medida requer cálculos para imposição de parâmetros nas condições de fronteira.

Um dos parâmetros de entrada nas condições de fronteira é o diâmetro hidráulico. O cálculo deste vem da recorrência à equação seguinte:

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (4.1)$$

Cada grelha de insuflação tem uma área de $0,5 \times 0,5m$ e cada grelha de extracção tem $0,8 \times 0,45m$ de área. Isto significa que se terá, para cada subsecção das grelhas de insuflação e para as grelhas de extracção diâmetros hidráulicos respectivamente de $D_h=0,125m$ e $D_h=0,576m$.

As velocidades de insuflação e de extracção são calculadas tendo em conta que a taxa de renovação do ar especificada em projecto para a sala é de $300m^3/(h.ocupante)$ para uma ocupação de 184 pessoas.

Impostas estas premissas, o caudal total insuflado para a sala será de $5520m^3/h$ e, em cada uma das 11 grelhas, será de aproximadamente $502m^3/h$. Cada subsecção de uma grelha de insuflação terá de caudal aproximadamente $125,5m^3/h$. O caudal de extracção, tendo em conta as especificações de projecto e que a sala está equipada com seis grelhas para o efeito, será de $920m^3/h$.

Cada uma das áreas das subdivisões das grelhas de insuflação do ar é de $0,06m^2$ e a área de cada grelha de extracção é de $0,36m^2$. A conhecida expressão

$$Q = vA \quad (4.2)$$

permite calcular as velocidades de insuflação em cada subsecção, que serão de $0,581m/s$. Por sua vez, a velocidade de saída do ar em cada grelha será então de $0,710m/s$.

A intensidade de turbulência é um parâmetro a colocar nas condições de fronteira, então torna-se necessário calculá-la tanto para o caso de insuflação como para o de extracção de ar. A expressão que leva ao seu cálculo é:

$$I = 0.16Re_{Dh}^{-\frac{1}{8}} \quad (4.3)$$

O valor do número de *Reynolds* será, para o caso de cada subsecção de cada grelha de insuflação, de 8897 para, como já referido, uma velocidade de 0,581m/s e um diâmetro hidráulico de 0,125m; para o caso de cada grelha de extracção, de 50098 para condições de velocidade de 0,710m/s e de diâmetro hidráulico de 0,576m. Ter-se-á então intensidades de turbulência de 5,52% para cada subsecção de insuflação e de 5,93% para cada unidade de extracção do ar. Apresenta-se, na Tabela 2, os resultados citados para efeitos de resumo e simplificação de leitura relativamente a cada subsecção de um *inlet* e a cada *outlet*.

Tabela 2 – Condições de entrada e saída do ar no anfiteatro.

	Insuflação (subsecção)	Extracção
Área [$m \times m$]	(0,5×0,5)/4	0,8×0,45
Diâmetro hidráulico D_h [m]	0,125	0,576
Caudal [m^3/h]	125,5	920
Velocidade [m/s]	0,581	0,710
Reynolds [-]	8897	50098
Intensidade de Turbulência [%]	5,52	5,93

Nota: Os parâmetros a negrito na Tabela 2 foram os necessários para a imposição de condições ao software. Os restantes descritos são auxiliares de cálculo.

É necessário estudar o comportamento do escoamento do ar em pelo menos duas situações distintas, uma vez que o conforto térmico nas estações do ano mais frias é diferente do nas estações mais quentes.

Para efeitos de estudo serão consideradas então duas situações – a situação de Verão e a de Inverno. Os parâmetros a diferir entre cada das situações são as temperaturas da parede e as dos ocupantes. As temperaturas utilizadas para o estudo do comportamento do ar foram determinadas em função da informação constante nos serviços administrativos sobre a temperatura de insuflação e de extracção.

Segundo Stoecker, Jones [9] e as normas constantes na *ASHRAE* que concernem às quantidades de calor dissipadas por um corpo humano e a influência da indumentária [7], sendo a temperatura média de dissipação de calor de uma pessoa sem roupa de 32°C, o efeito do uso da indumentária de cada ocupante repercutirá uma queda de temperatura de 4°C numa situação de Verão e de 6°C na situação de Inverno para efeitos de consideração de temperatura de exposição ao ambiente circundante.

A tabela seguinte explicita as temperaturas utilizadas para o cálculo do comportamento do ar na sala.

Tabela 3 – Temperaturas a utilizar na simulação.

	Verão	Inverno
Insuflação/Extracção [°C]	24	24
Piso [°C]	28	26
Paredes [°C]	20	17

De notar que não será considerada a temperatura do sistema de iluminação da sala, uma vez que o seu valor pode facilmente ser desprezável face à ordem de grandezas das entidades considerada na tabela anterior.

Para além do panorama de estudo relativo a diferentes estações do ano, será também efectuado um estudo para uma situação de uma sala com apenas metade da lotação igualmente para efeitos de verificação do conforto térmico dos utilizadores, pois existe a possibilidade de a sala nem sempre se encontrar lotada e o caudal de insuflação de projecto deixar de ser adequado. Vai assumir-se que estarão ocupadas apenas as cinco filas da frente. Os parâmetros alterar na fase de pré-processamento apenas incidem na selecção da área de piso radiante, que passa para metade relativamente à situação descrita até aqui.

4.2.6. Técnicas de cálculo para simulação

Uma vez que não houve problemas de criação de uma malha de boa qualidade, não houve consequente necessidade de recorrência a métodos que envolvessem técnicas de discretização de equações ou *Under-Relaxation Factors* diferentes dos padrões do *software*. Sendo assim, passa a apresentar-se os valores usados para resolução do problema em questão.

Tabela 4 – Discretizações espaciais utilizadas.

Solution Methods		
Pressure-Velocity Coupling	Scheme	Simple
Spatial Discretization	<i>Gradient</i>	<i>Least Cells Square Based</i>
	<i>Pressure</i>	<i>Linear</i>
	<i>Momentum</i>	<i>First Order Upwind</i>
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>First Order Upwind</i>
	<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>First Order Upwind</i>
	<i>Energy</i>	<i>First Order Upwind</i>

Note-se que poderiam ter sido usado outras técnicas numéricas de discretização das equações, mas o presente trabalho visa a resolução do caso prático de escoamento do ar num auditório e, por essa razão, não é dedicada mais profundidade ao estudo das técnicas de discretização de equações mais apropriadas para o caso do escoamento do ar no auditório.

Passa agora a explicitar-se os valores impostos a uma ferramenta de controlo da solução, os *Under-Relaxation Factors*, que são os valores padrão já constantes no programa.

Tabela 5 – Valores para os *Under-Relaxation Factors*.

Factor	Valor
<i>Pressure</i>	0,3
<i>Density</i>	1
<i>Body Forces</i>	1
<i>Momentum</i>	0,7
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	0,8
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	0,8
<i>Turbulent Viscosity</i>	1
<i>Energy</i>	1

4.2.7. Qualidade da malha gerada

A Tabela 6 explicita os parâmetros da qualidade da malha gerada segundo as imposições à malha referidas no capítulo anterior.

Tabela 6 - Valores dos parâmetros relativos à qualidade da malha gerada.

	Valor do parâmetro	Valor máximo aceitável
<i>Worst Quality Element</i>	$5,54 \times 10^{-2}$	0,10
<i>Max Cell Skewness</i>	0,961	0,98
<i>Maximum Aspect Ratio</i>	33,96	100

Uma vez mais, as discretizações espaciais e os *Under-Relaxation Factors* não sofreram qualquer alteração relativamente aos valores supracitados, pois, pelo que se pode constatar, os valores relativos à qualidade da malha estão dentro do intervalo de valores aceitáveis.

4.2.8. Critérios de paragem

Os critérios de paragem utilizados como critérios absolutos de convergência das equações de resolução do problema em questão foram estipulados como sendo de valor 0,001 para todas as equações, com a excepção do valor de 1×10^{-6} para a equação da energia. Foram definidas 1000 iterações como limite máximo de iterações para convergência de cada modelo utilizado.

Ao longo de toda a sala foram criados planos e rectas em locais convenientes da sala para efeitos de elucidação gráfica e de análise de temperaturas e velocidades nos mesmos, que servirão para explorar a qualidade dos parâmetros de conforto na sala.

A Figura 8 representa um plano de simetria, vertical, desenhado propositadamente para restituir o comportamento do ar ao longo da variação da sala em altura.

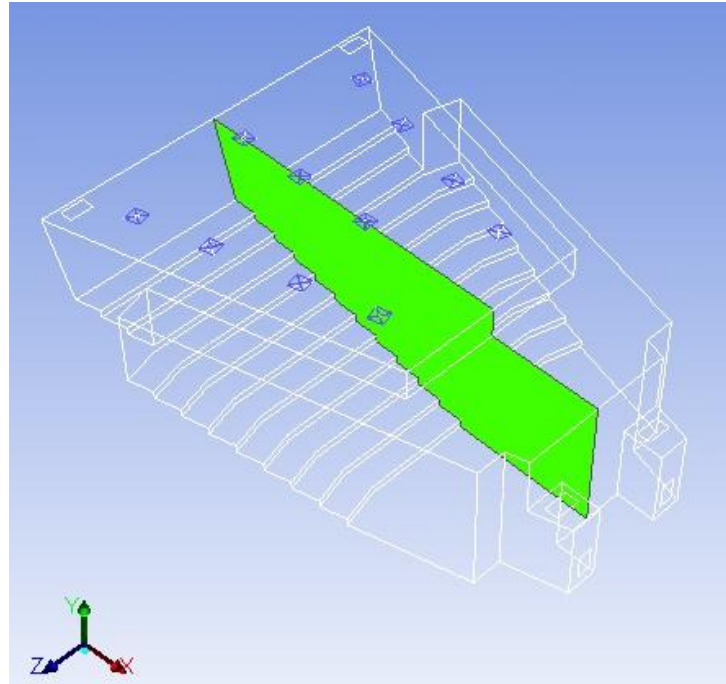


Figura 8 – Plano de simetria em perspectiva isométrica.

A figura seguinte representa um plano criado para efeitos de estudo do comportamento do ar em termos de largura ao longo da sala. A Figura 10 também explicita um plano criado para os mesmos efeitos.

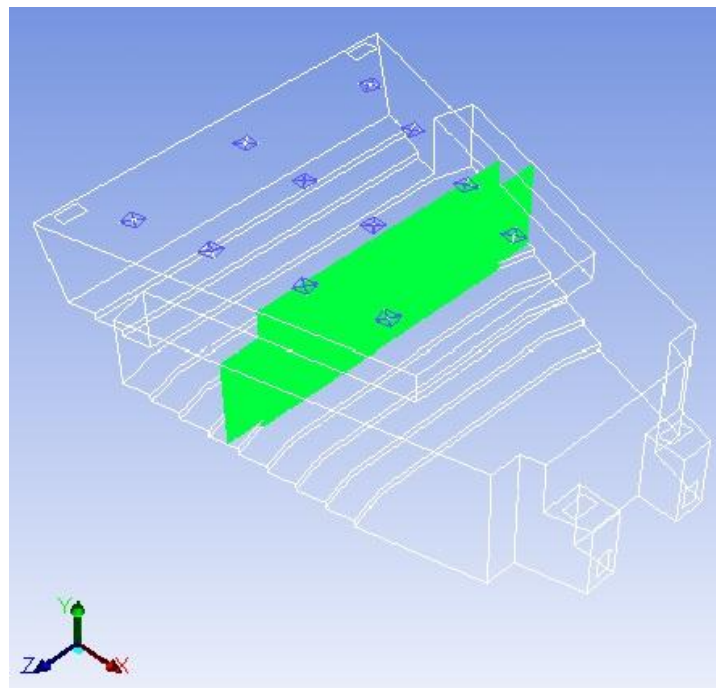


Figura 9 – Plano de frente ao meio da sala em perspectiva isométrica.

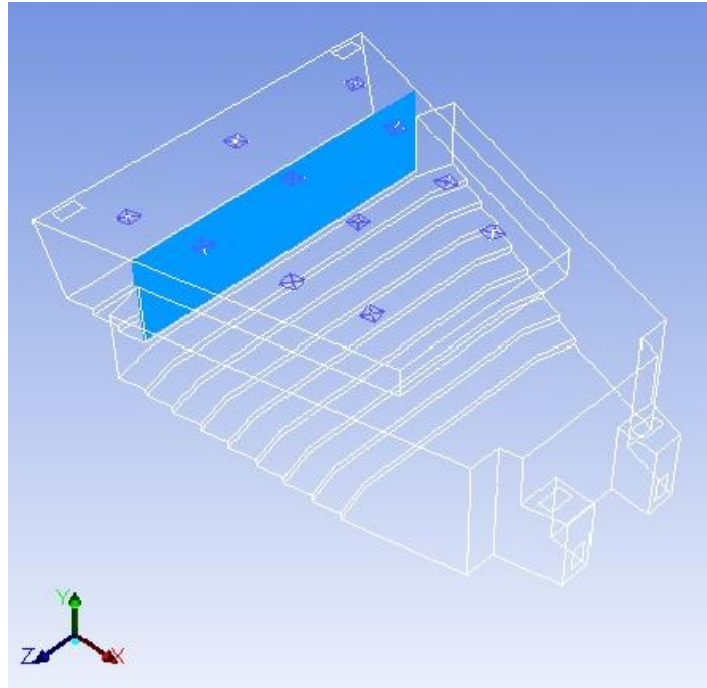


Figura 10 – Plano de frente na zona traseira da sala em perspectiva isométrica.

Uma vez que a cabeça de uma pessoa tem, entre muitas outras funções, a capacidade de avaliar o conforto térmico, tomou-se o cuidado de criar, por fim, um plano útil, que serve essencialmente para aferir o comportamento do ar ao nível médio da altura das pessoas sentadas, que é, de grosso modo, de $1,25m$ em relação ao solo.

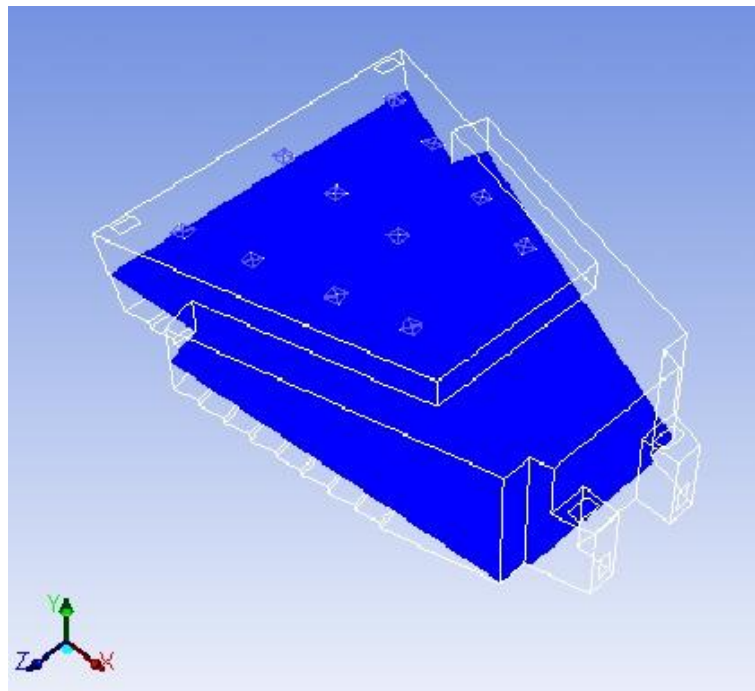


Figura 11 – Perspectiva isométrica do plano útil.

Relativamente às linhas criadas, são mostradas todas no mesmo gráfico, exibido em seguida. As linhas ao longo da largura da sala são horizontais (constantes ao longo de YY) e foram geradas para uma altura média de um utilizador da sala sentado; as linhas ao longo do comprimento da sala foram criadas com uma altura média de $1,5m$ relativamente à zona onde se sentam os utilizadores.

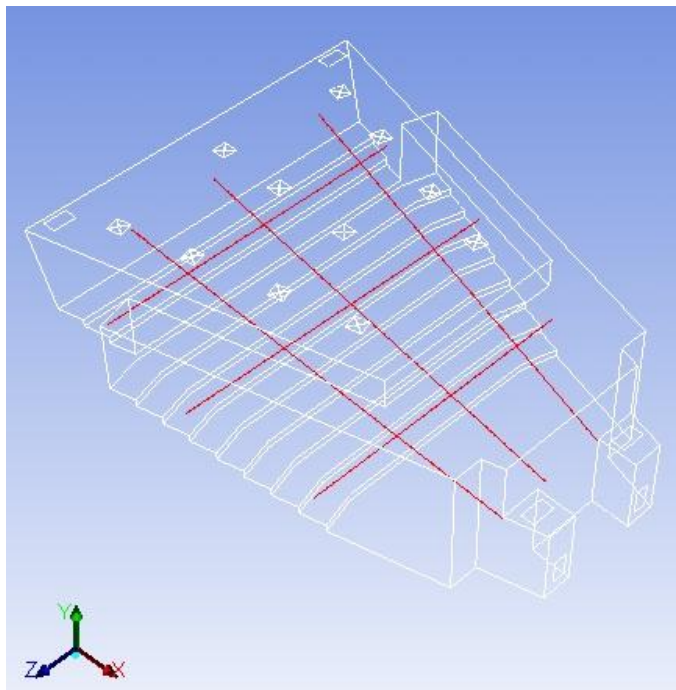


Figura 12 – Contornos das linhas criadas numa perspectiva isométrica.

Para definir estas linhas no programa, utilizou-se uma nomenclatura tal que as linhas horizontais fossem chamadas “*line-horiz*” e numeradas de 1 a 3, sendo 1 a linha na zona mais baixa e 3 a da zona mais alta segundo YY ; as linhas ao longo do plano útil foram chamadas “*line-util*”, e numeradas de 1 a 3, sendo a linha 1 a linha mais à esquerda do eixo ZZ e a 3 a mais à direita do mesmo eixo. Nas figuras em que constam os valores obtidos por estas linhas na Apresentação e Análise de Resultados, deve ler-se: para o caso das linhas horizontais, os valores apontados das linhas da esquerda para a direita vão do sentido negativo para o positivo segundo o eixo ZZ ; relativamente às linhas ao longo do plano útil, são representados os valores das temperaturas e velocidades nessas linhas, sendo as coordenadas negativas relativas à zona mais negativa em XX e as positivas relativas à zona mais positiva segundo o eixo XX .

Simulação Computacional do Escoamento do Ar no Interior de um Auditório

São considerados seis pontos na Apresentação e Análise de Resultados para efeitos de comparação dos modelos de turbulência utilizados na simulação. São esses pontos os explicitados na Figura 13. De referir que os pontos 2, 4 e 6 estão situados simetricamente em relação ao plano do meio da sala, ou seja, em pontos opostos de respectivamente 1, 3 e 5 relativamente ao plano de simetria.

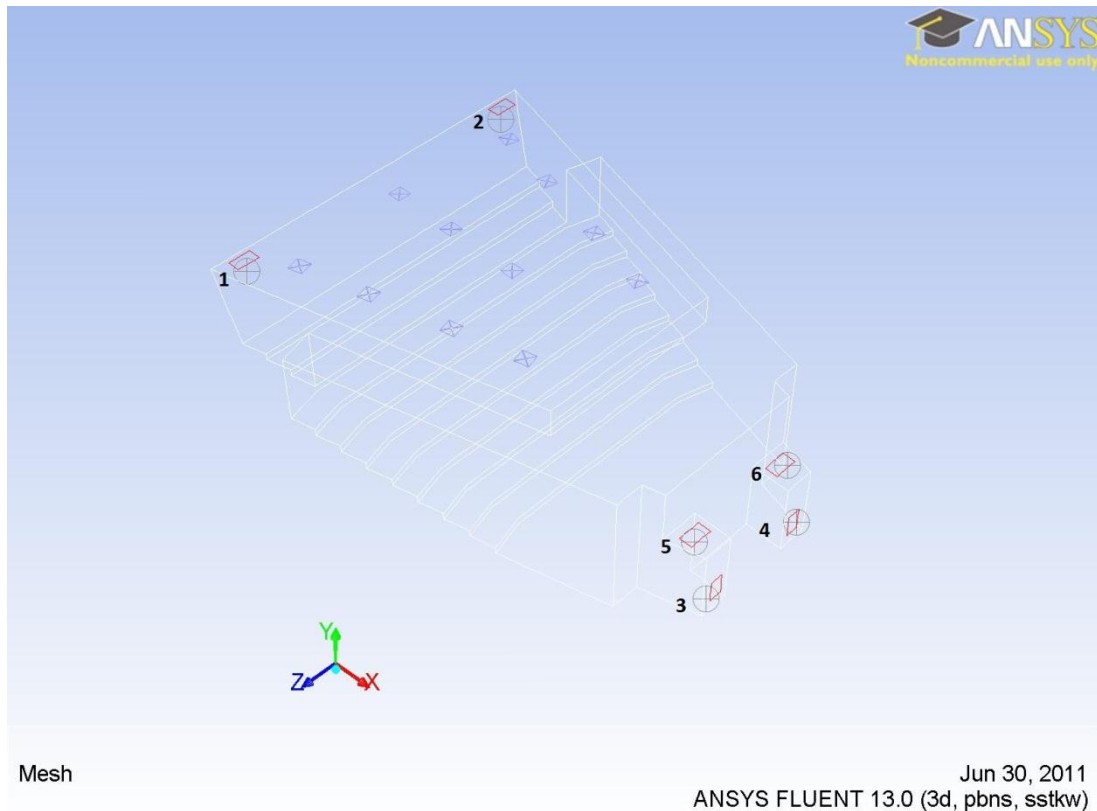


Figura 13 – Configuração espacial dos pontos considerados para efeitos de análise de resultados.

5. Apresentação e Análise de Resultados

Nesta secção trata-se da exposição e da análise dos resultados retornados pelo *software*. Foram simuladas duas situações, uma de Verão e outra de Inverno. Simulou-se também o comportamento do ar para uma situação de sala lotada e de outra com metade da lotação.

Serão, também nesta secção, divulgados e discutidos os resultados relevantes retornados por cada um dos modelos de duas equações apresentados na Fundamentação teórica. Primeiramente, serão comparadas as situações de Verão e Inverno com a sala lotada, em seguida as situações de Verão e Inverno com a sala a metade da lotação e, finalmente, serão comparados todos os modelos entre si e efectuadas análises convenientes aos resultados.

É de referir que neste capítulo são apresentados os resultados relativos à resolução do problema segundo o modelo de turbulência *Standard k-ε*. São expostos nos Anexos os resultados referentes à resolução pelo modelo *SST k-ω*.

5.1. Sala Lotada

5.1.1. Situação de Verão

Após imposição dos parâmetros relativos à situação de Verão, o cálculo das variáveis em estudo retornou os resultados após as iterações para uma resolução através do modelo de turbulência *Standard k-ε*.

Como referido anteriormente, foram criados planos, linhas e pontos auxiliares de forma a ajudar à compreensão visual dos resultados em termos de velocidades e temperaturas. Passa desde aqui a fazer-se uso desses auxiliares.

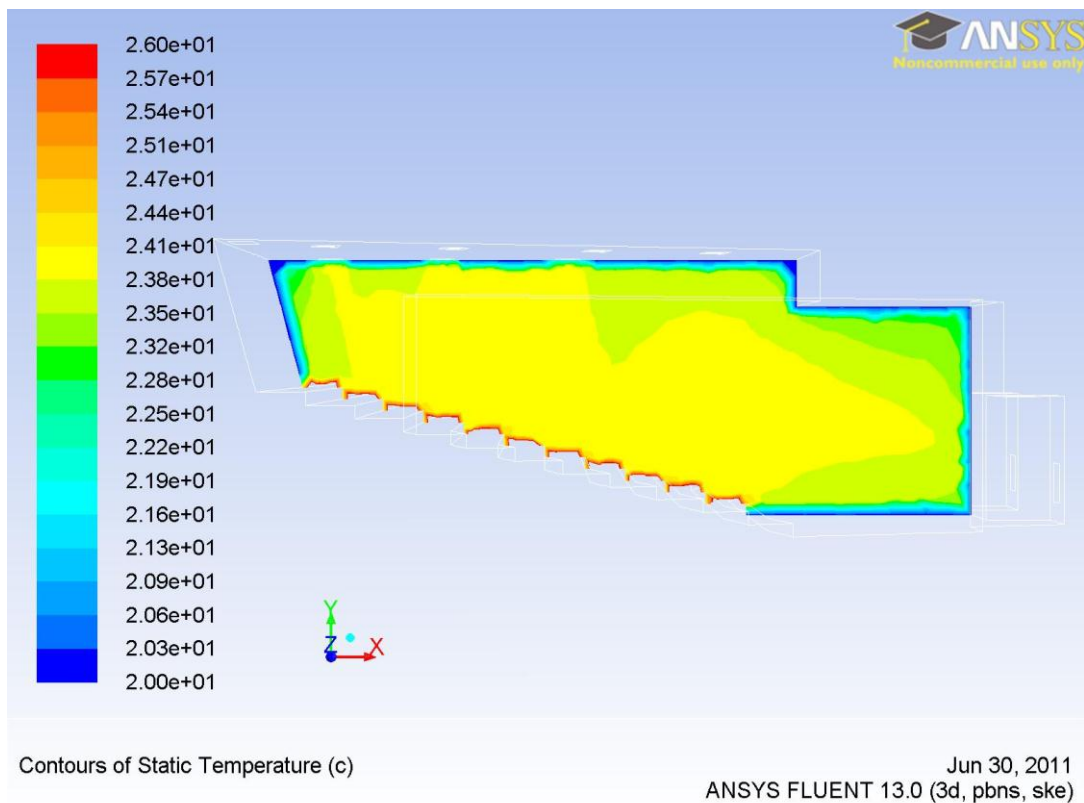


Figura 14 - Representação das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada.

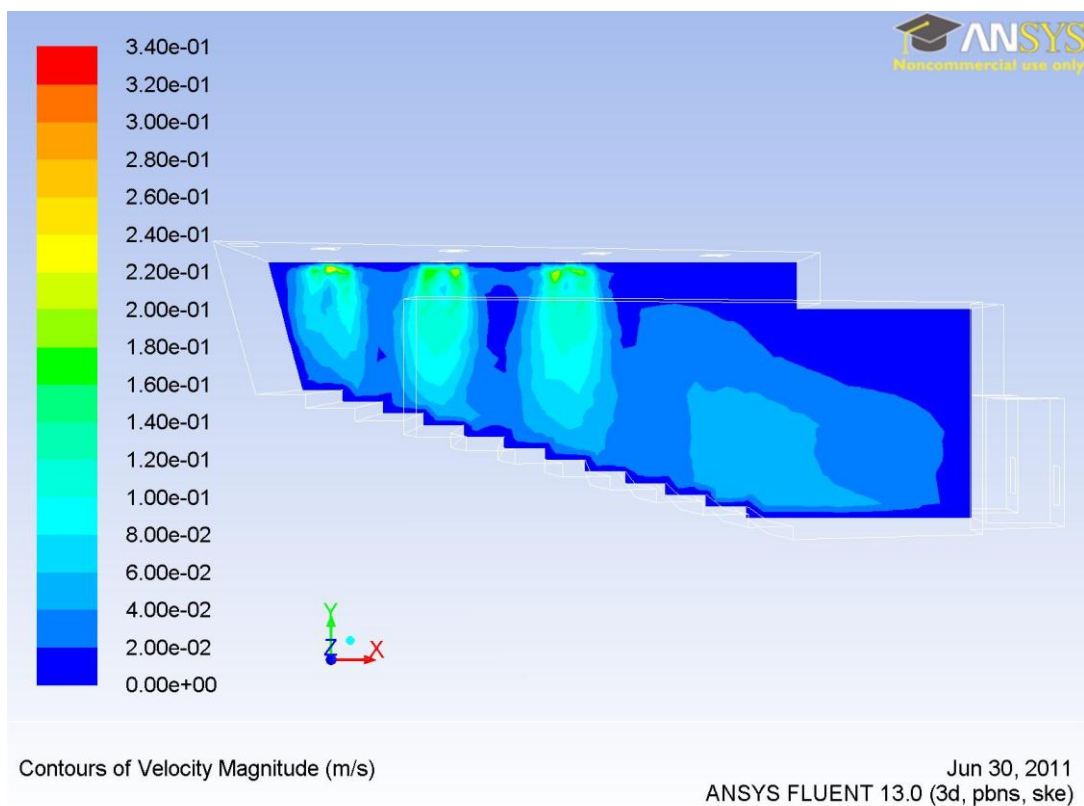


Figura 15 - Representação dos contornos das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada.

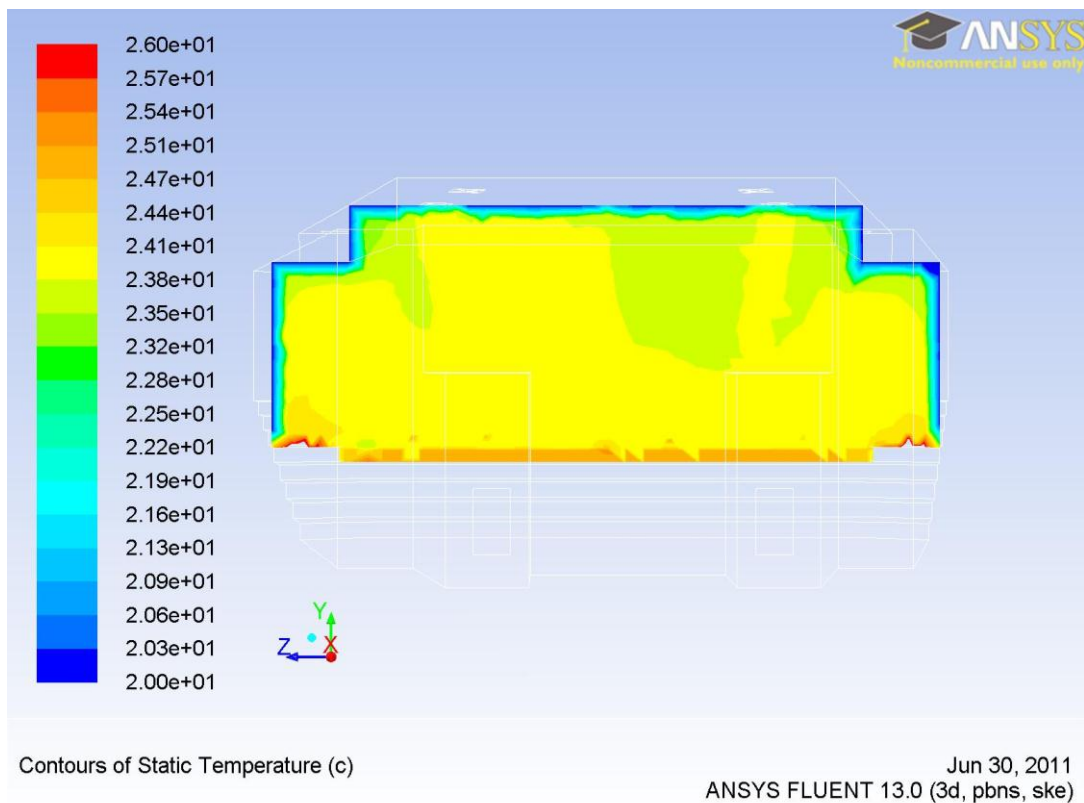


Figura 16 - Representação dos contornos de temperatura segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada.

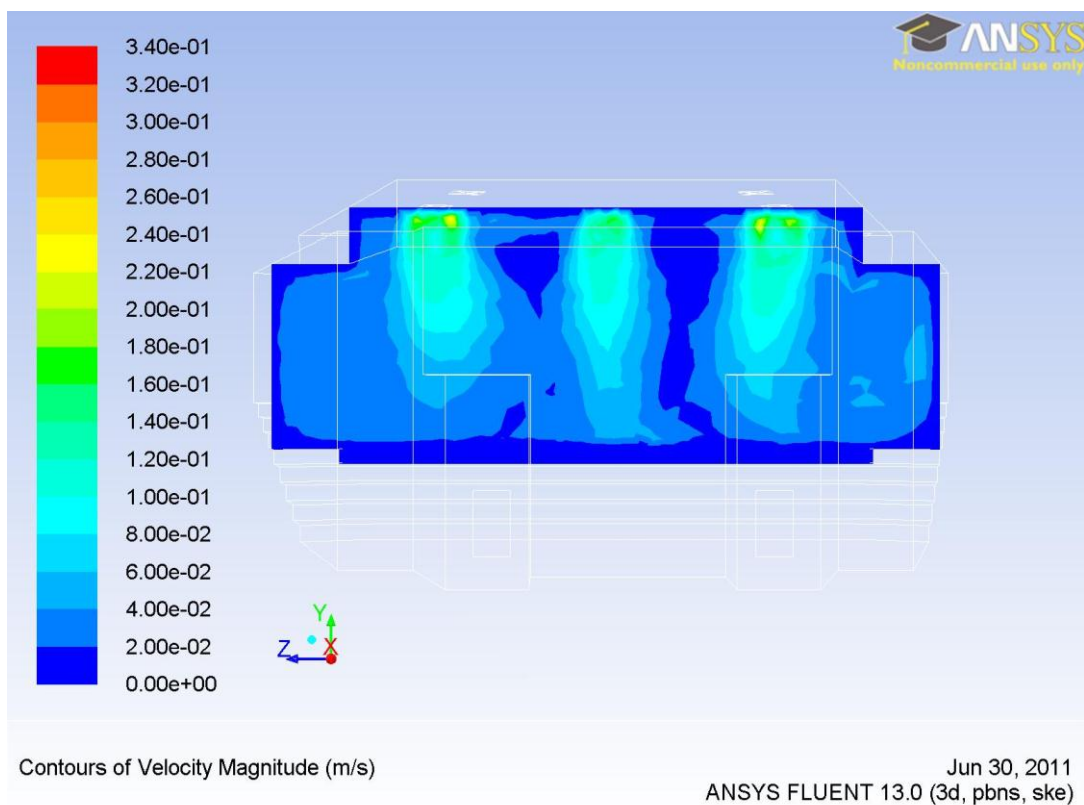


Figura 17 – Representação dos contornos de velocidade segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada.

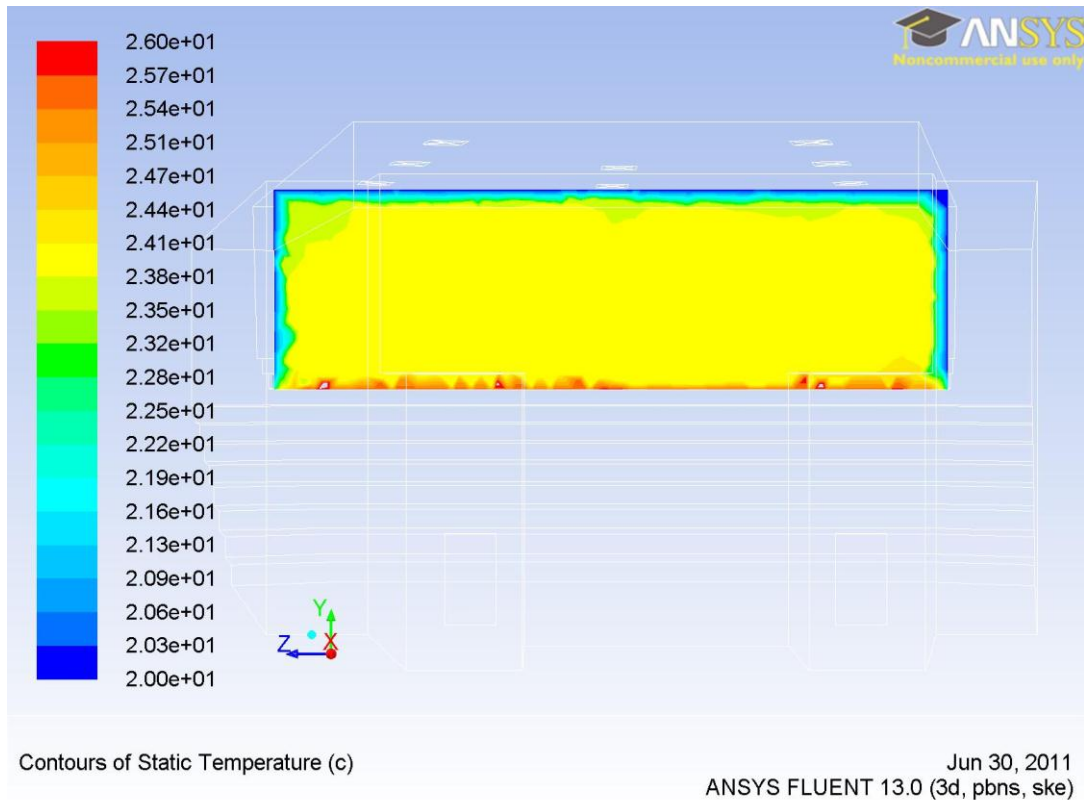


Figura 18 – Representação dos contornos de temperatura segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada.

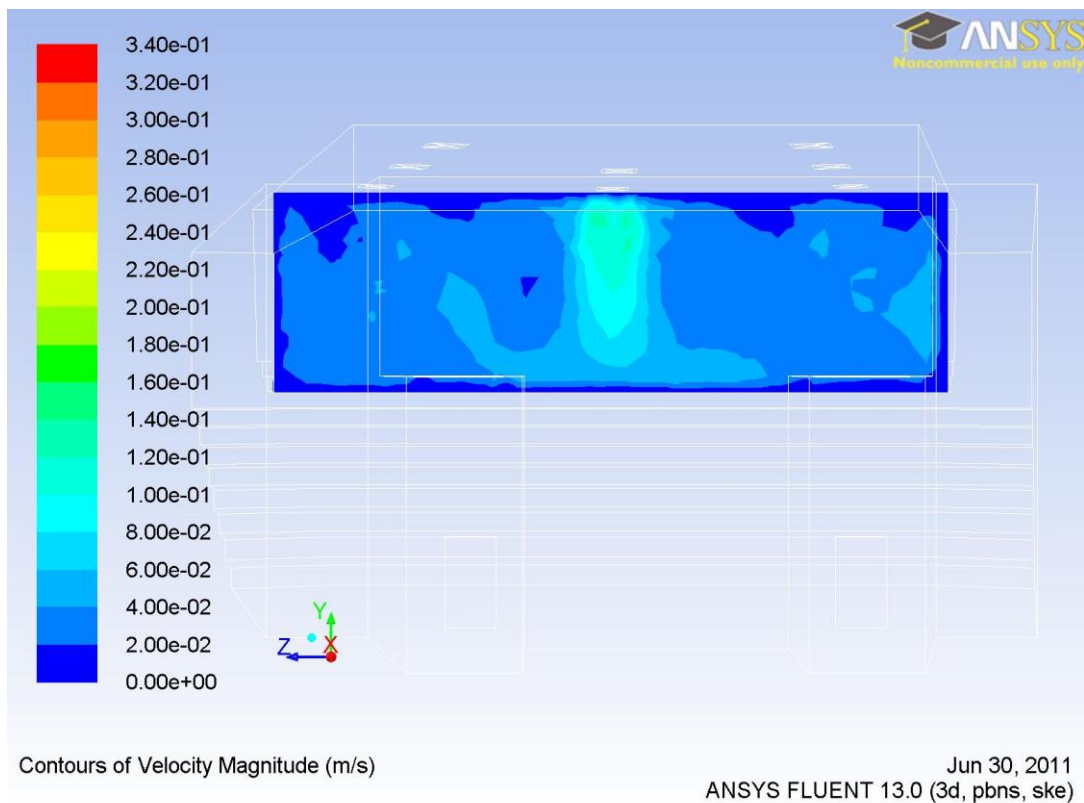


Figura 19 - Representação dos contornos de velocidade segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada.

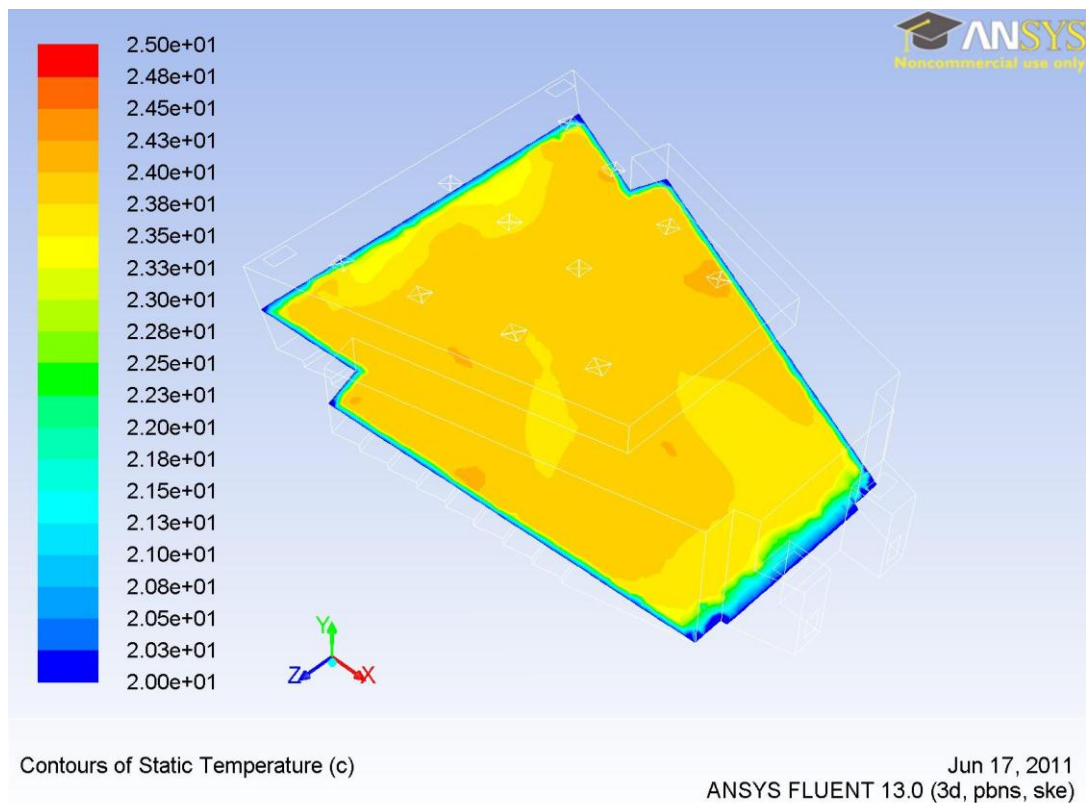


Figura 20– Representação isométrica dos contornos de temperatura segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala lotada.

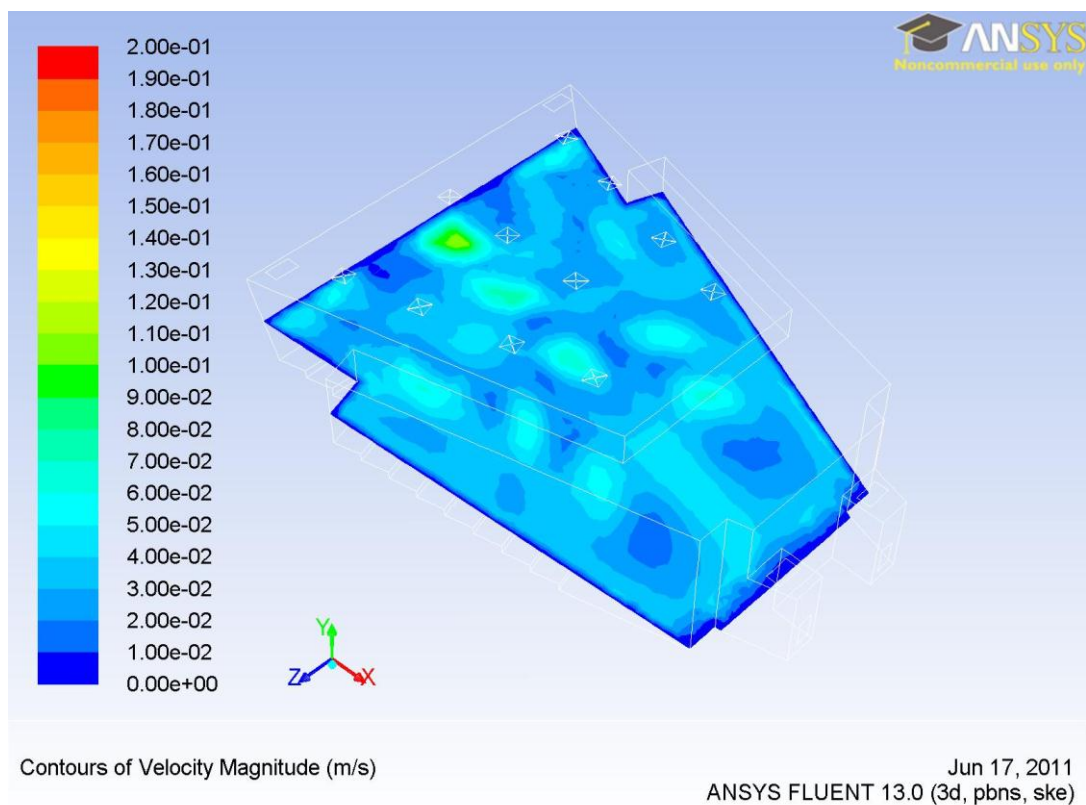


Figura 21– Representação isométrica dos contornos de velocidade segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala lotada.

Simulação Computacional do Escoamento do Ar no Interior de um Auditório

Passa agora a definir-se graficamente as temperaturas e as velocidades obtidas ao longo das linhas criadas.

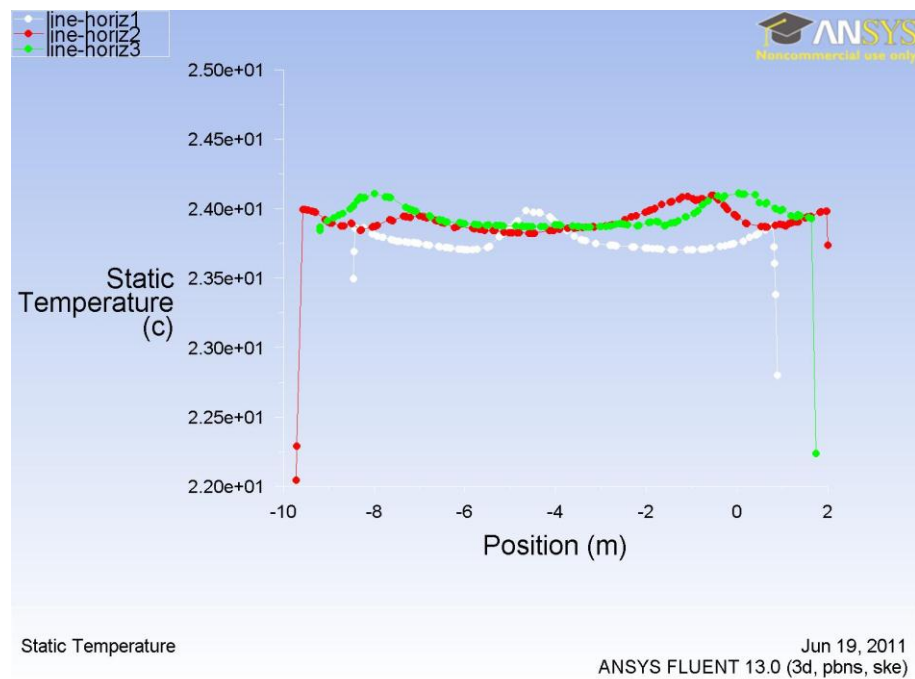


Figura 22 – Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão.

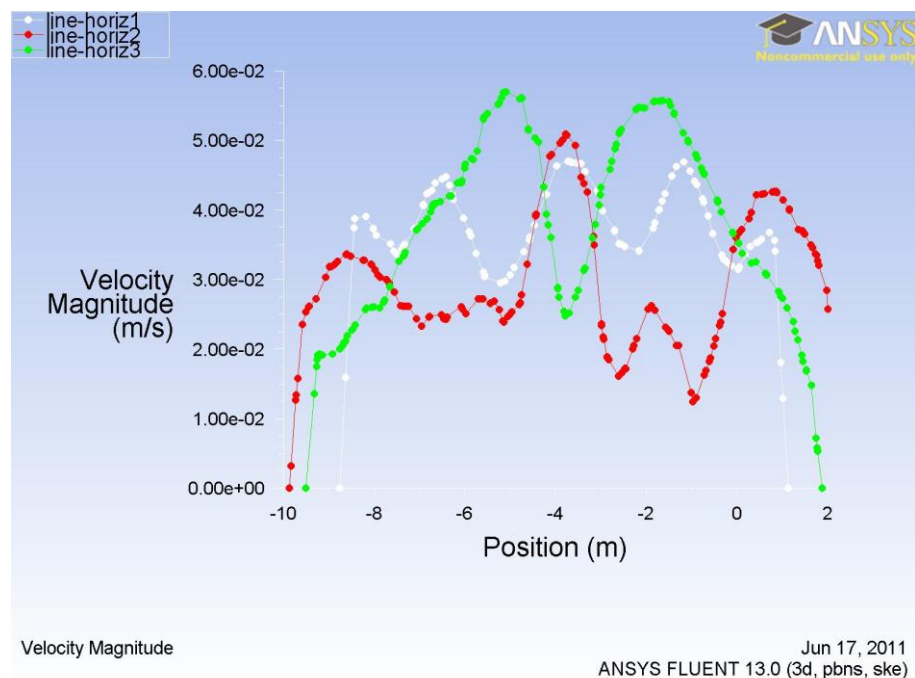


Figura 23 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão.

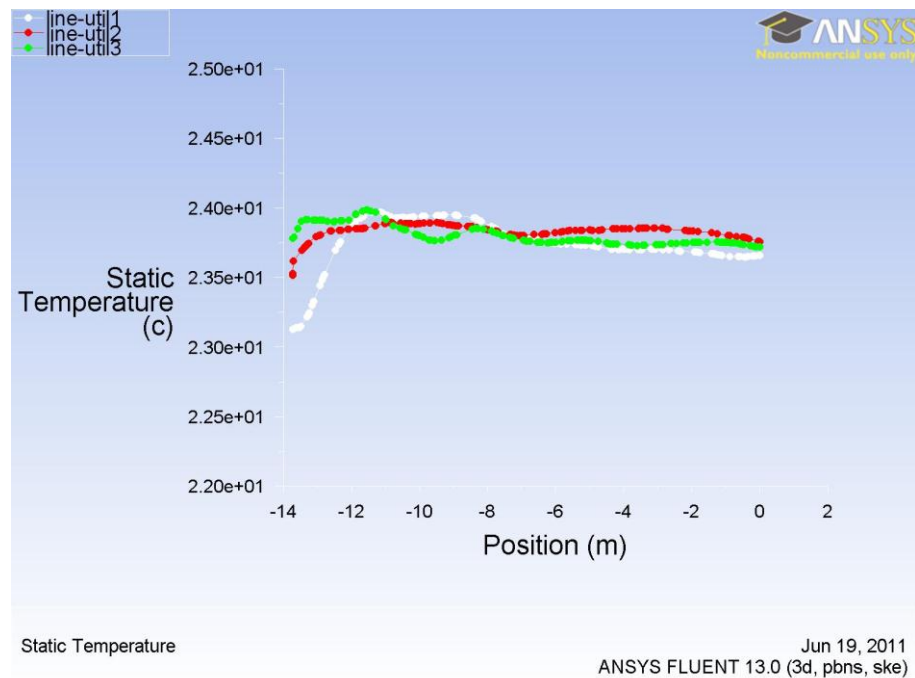


Figura 24 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão.

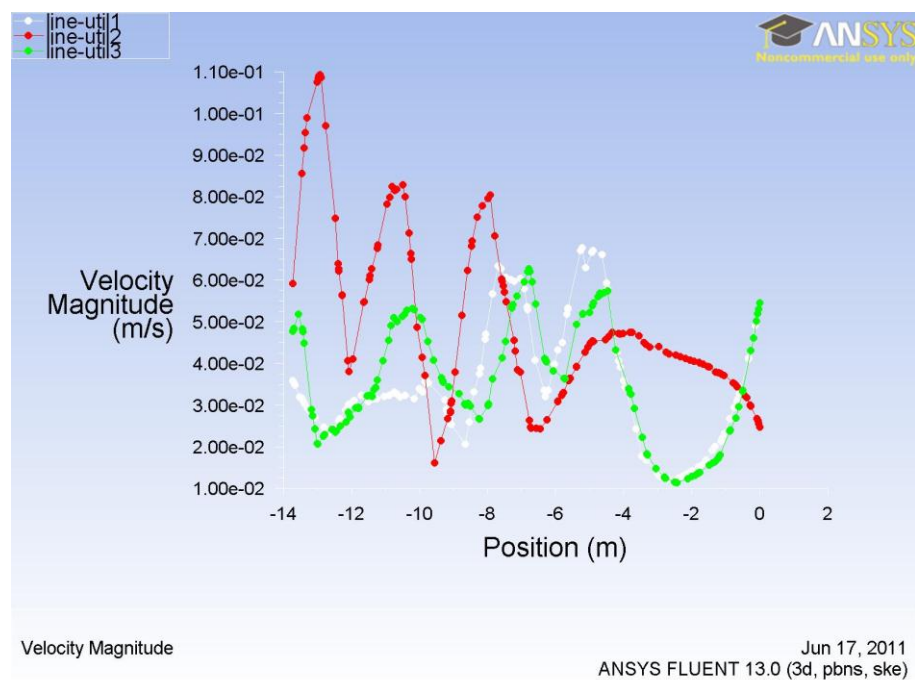


Figura 25 – Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão.

5.1.2. Situação de Inverno

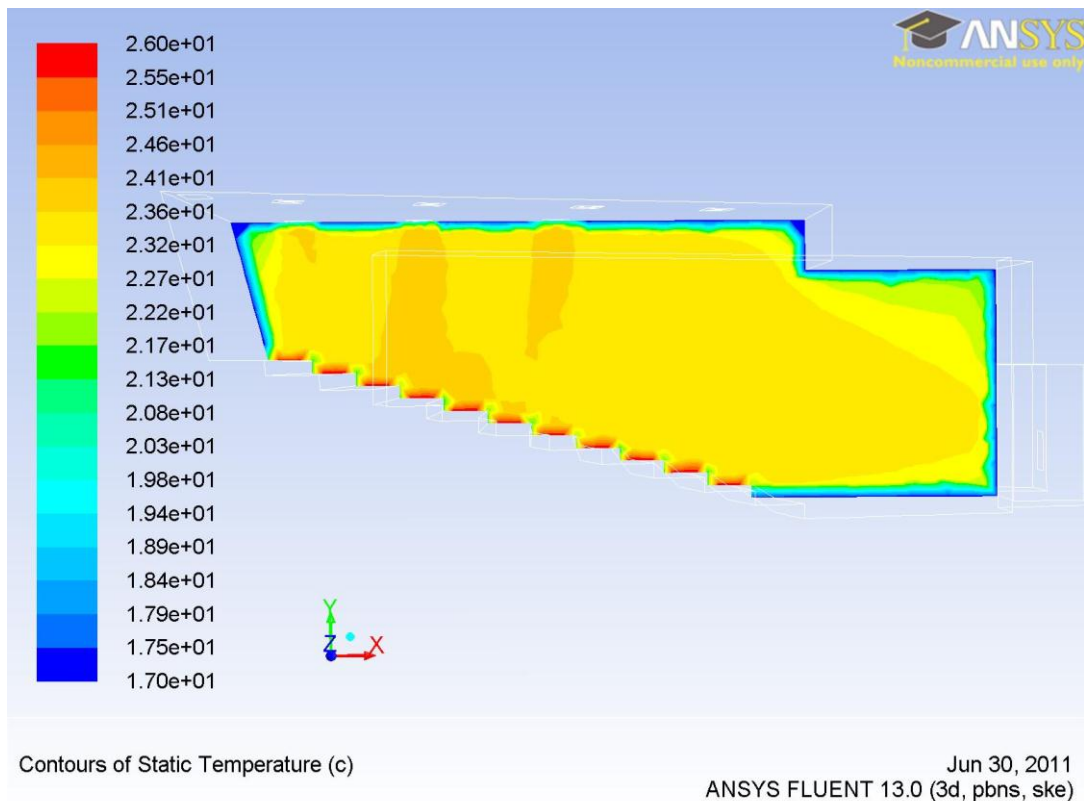


Figura 26 - Representação das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada.

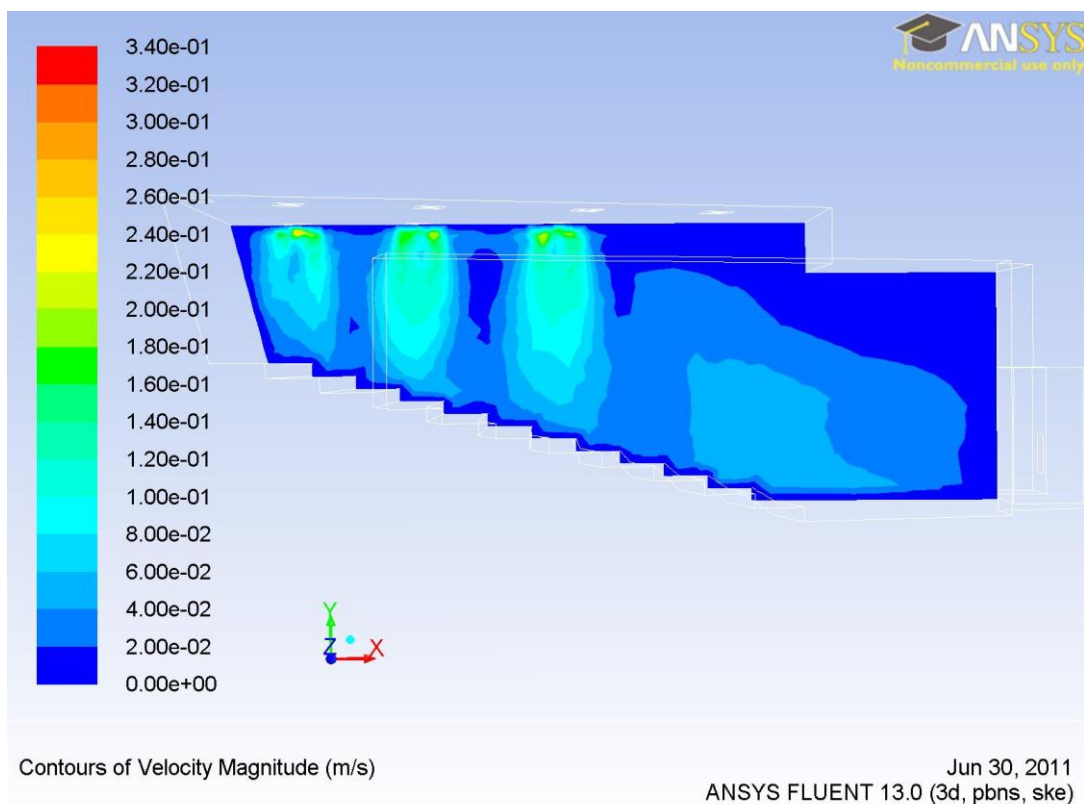


Figura 27 - Representação das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada.

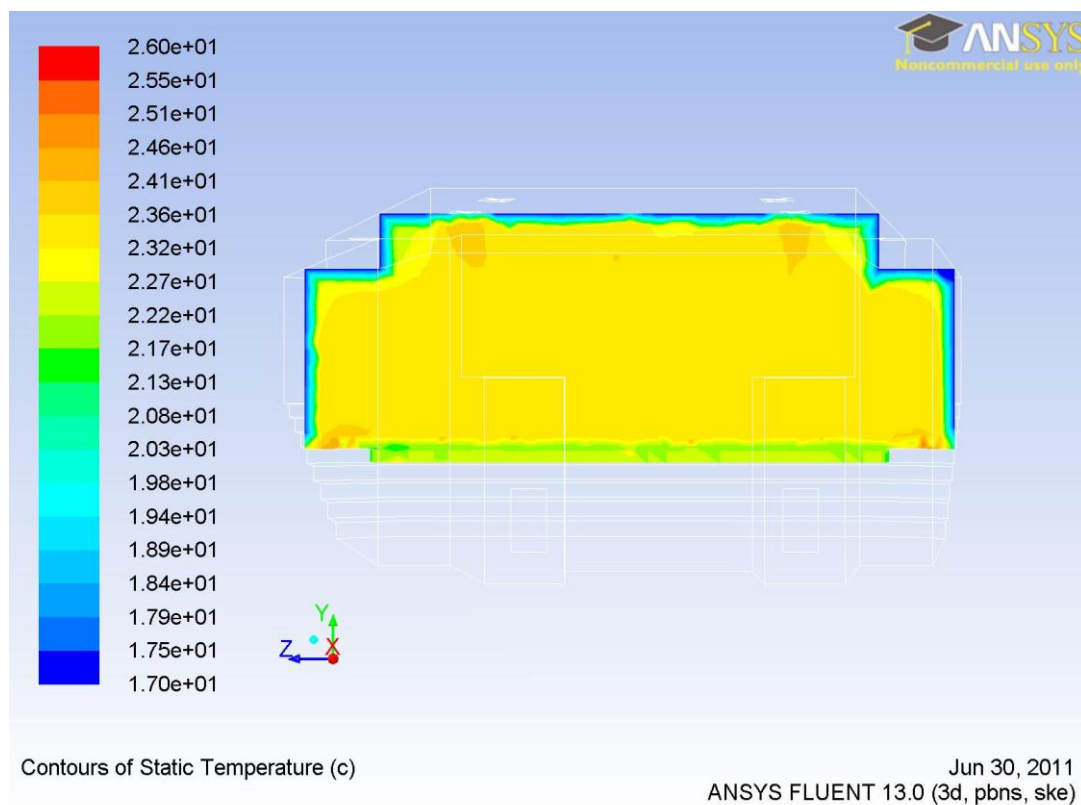


Figura 28 – Representação das temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala lotada.

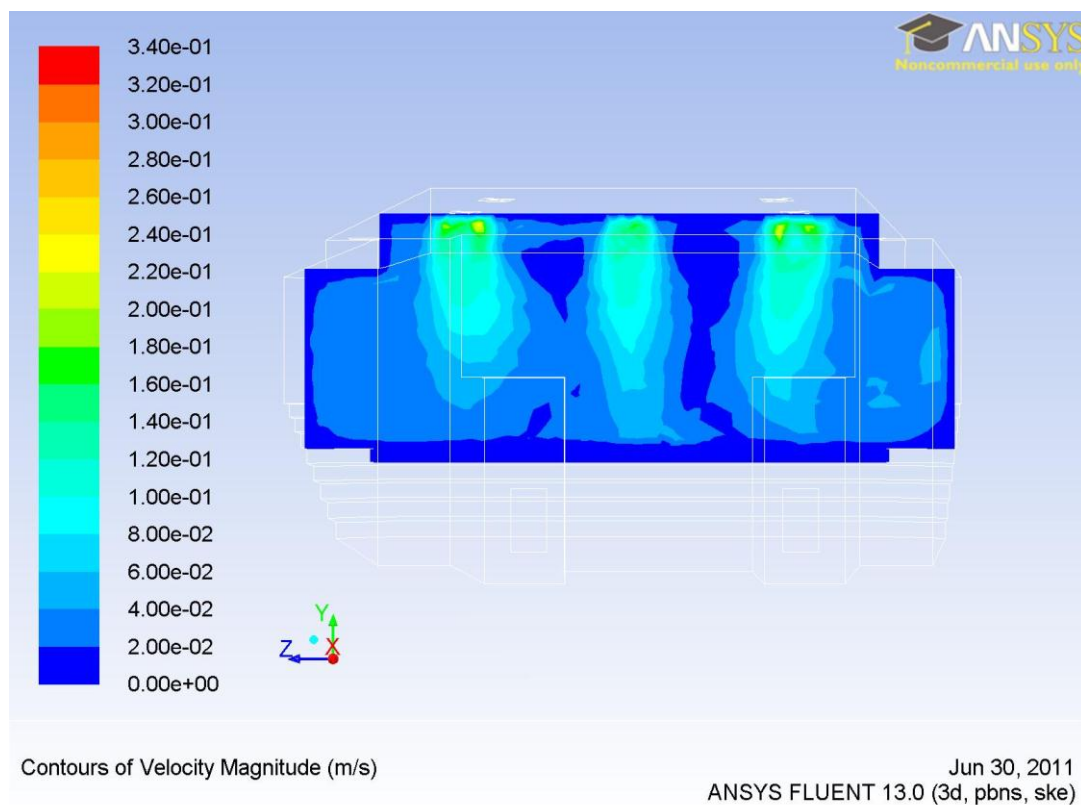


Figura 29 - Representação das velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala lotada.

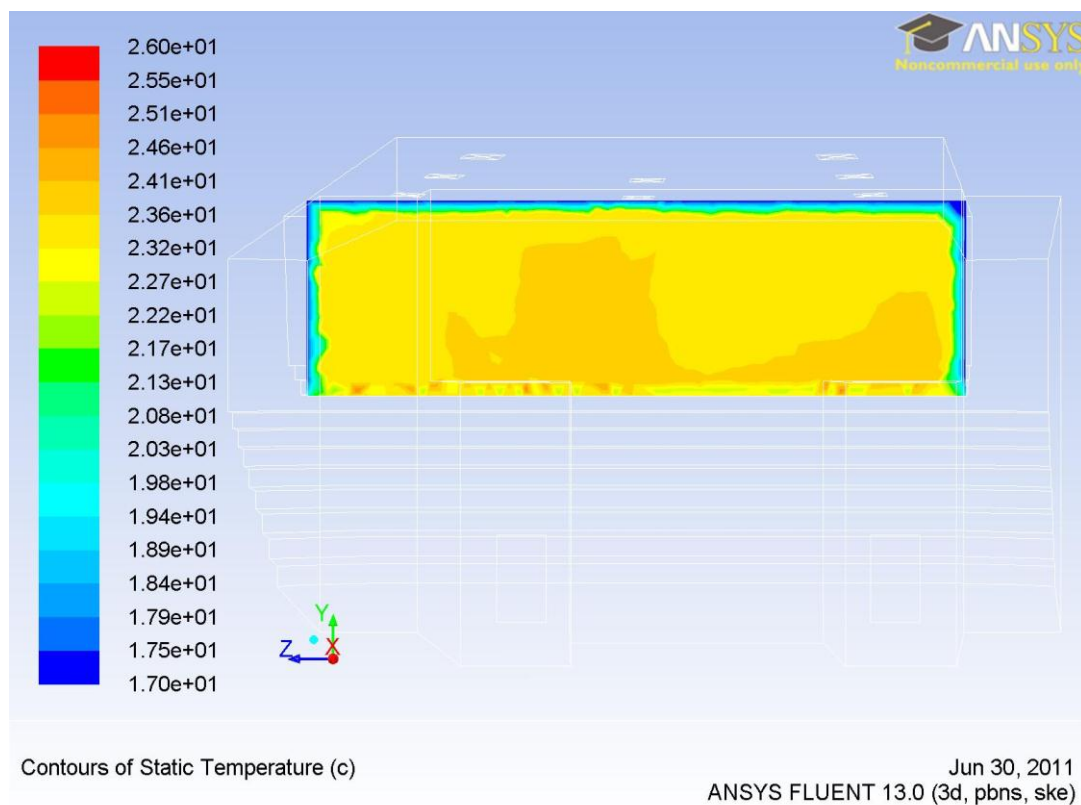


Figura 30 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada.

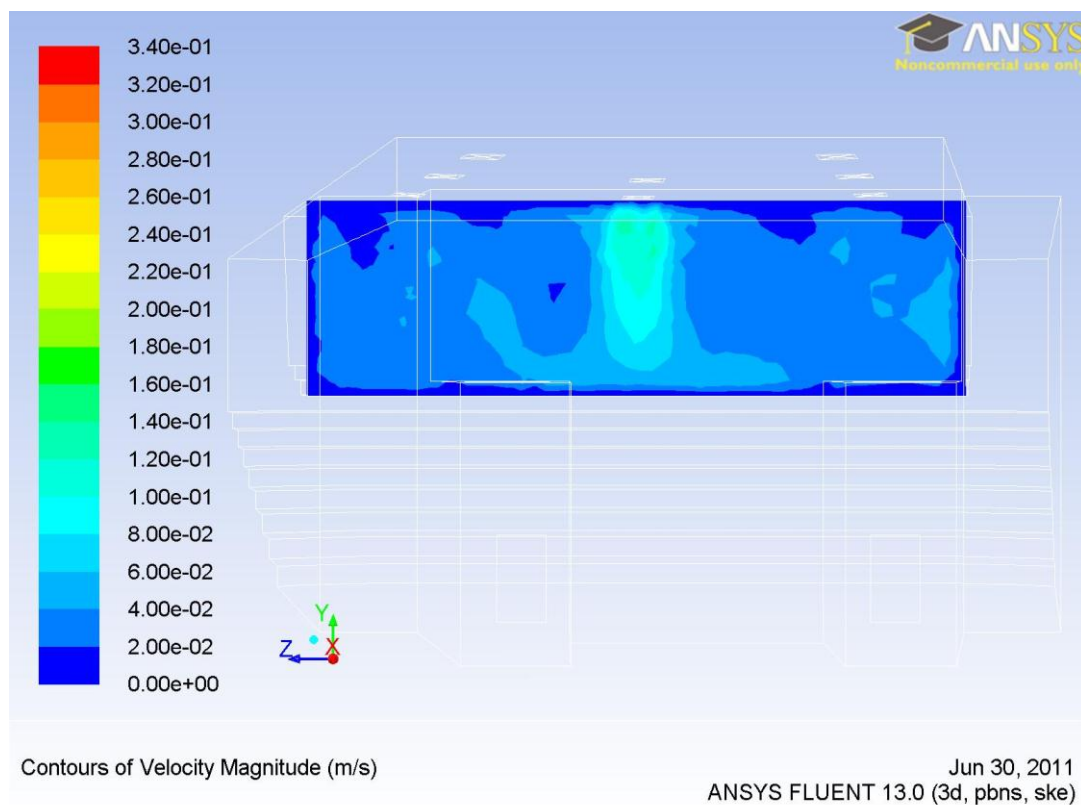


Figura 31 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada.

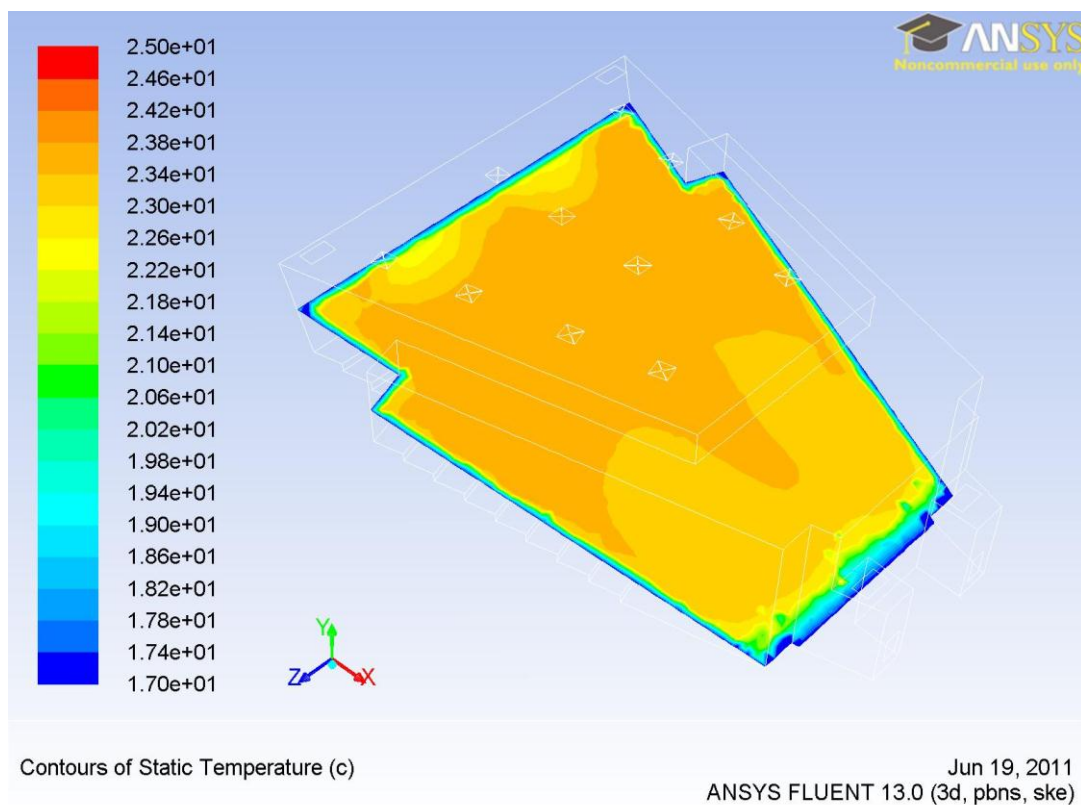


Figura 32 - Representação isométrica dos contornos de temperatura segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala lotada.

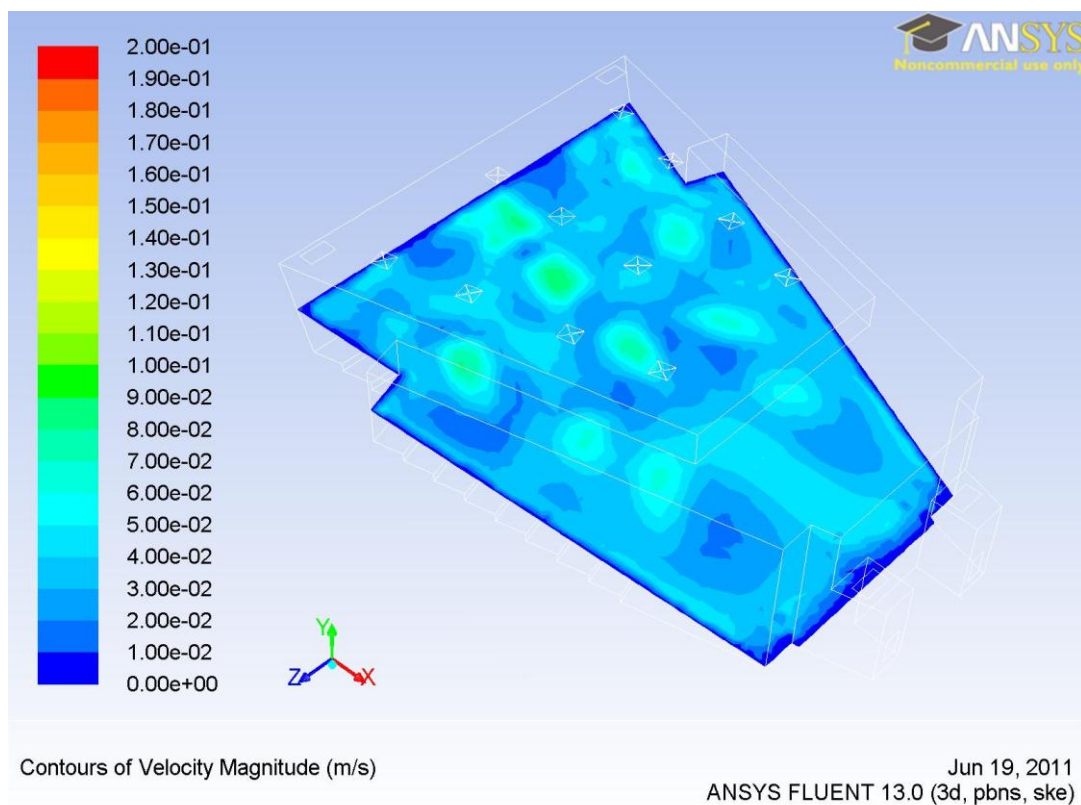


Figura 33 - Representação isométrica dos contornos de velocidade segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala lotada.

Simulação Computacional do Escoamento do Ar no Interior de um Auditório

Define-se aqui graficamente as temperaturas e as velocidades obtidas ao longo das linhas criadas.

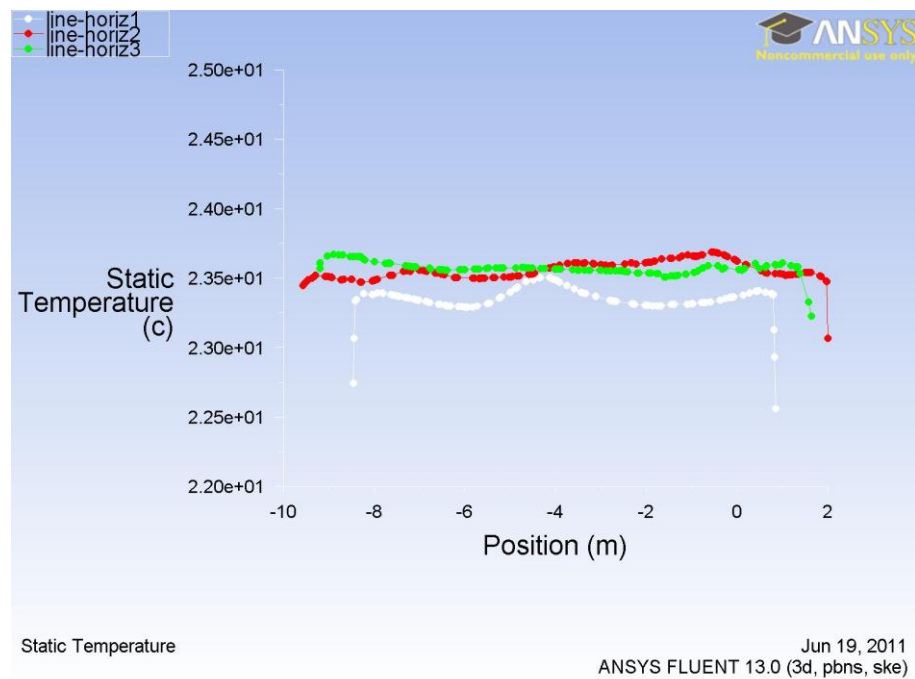


Figura 34 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno.

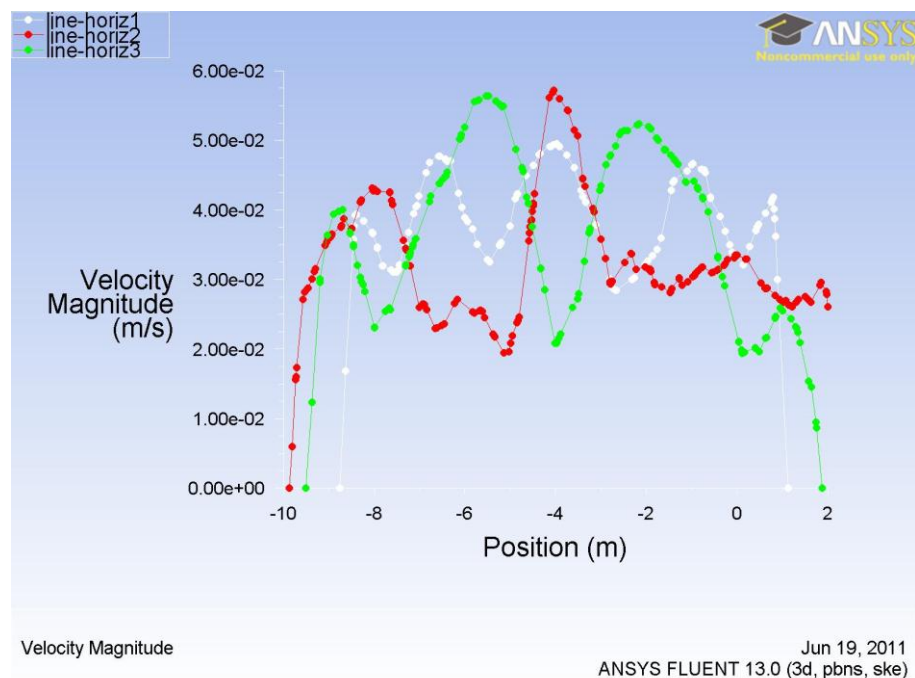


Figura 35 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno.

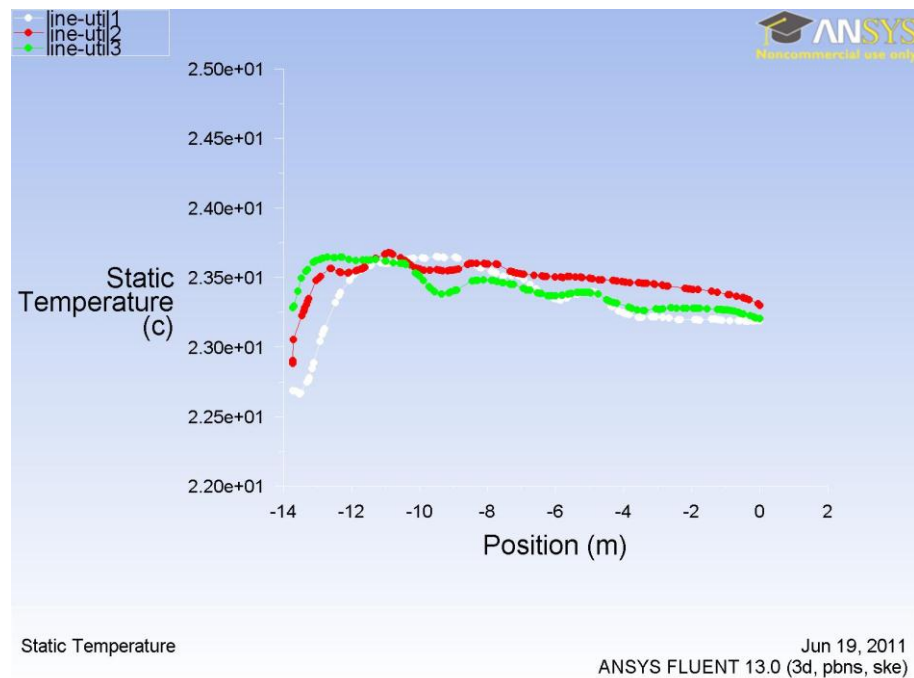


Figura 36 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno.

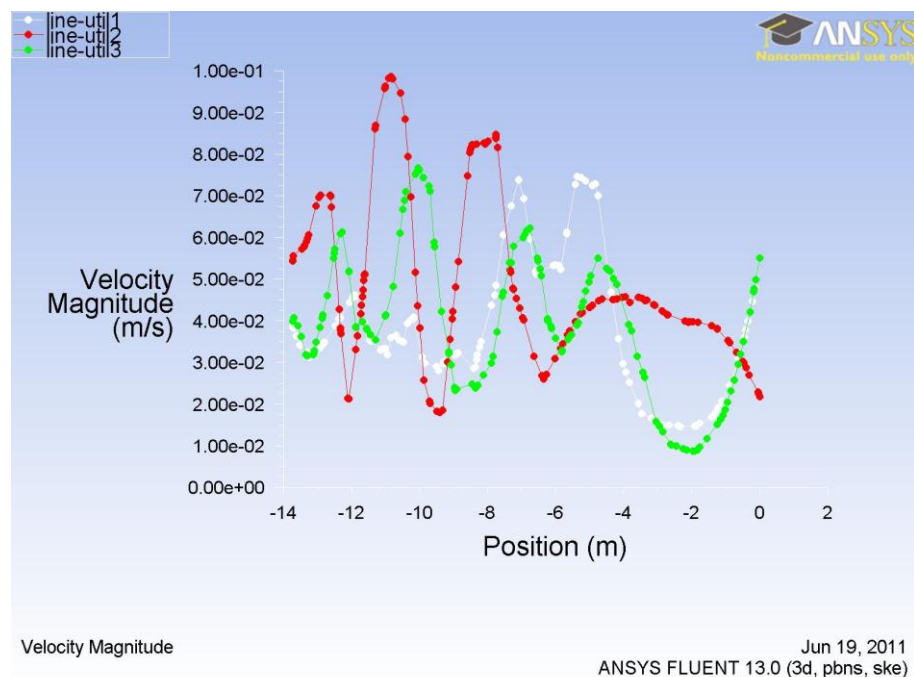


Figura 37 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno.

Podem agora ser tecidas algumas considerações relativas às duas situações justamente descritas de Verão e Inverno em sala lotada. A Figura 14 e a Figura 26, que mostram os contornos de temperaturas segundo o plano de simetria considerado, apresentam

comportamentos semelhantes. Eram de esperar gradientes de temperaturas superiores na zona traseira da sala devido ao pé-direito, o que se verifica. No entanto, nota-se um maior gradiente de temperaturas na zona da parede traseira na situação de Inverno devido à temperatura mais baixa da parede relativamente à situação de Verão. Considerando o plano de frente, nota-se diferenças de temperaturas de $0,5^{\circ}\text{C}$ relativamente às duas situações em questão, estando os maiores gradientes de temperaturas situados junto às paredes em ambos os casos; o plano de frente anterior da sala denota gradientes de temperaturas muito pequenos em ambas as situações. O plano útil denota uma temperatura média de $24,3^{\circ}\text{C}$ ao longo da sua maior parte, evidenciando, porém, zonas residuais em que a temperatura é $0,5^{\circ}\text{C}$ inferior no Verão (no meio e na parte de trás da sala) e no Inverno (na parte de trás e da frente da sala).

Em termos de velocidades, nota-se, pelas figuras apresentadas, que existe um comportamento muito semelhante tendo em conta os planos exibidos nas situações de Verão e Inverno e que estas não ultrapassam os $0,12\text{m/s}$ na zona delineada pelos planos úteis, ou seja, ao nível da cabeça dos ocupantes sentados. Nota-se as velocidades máximas nas zonas onde o ar é insuflado e gradientes baixos na zona de ocupação de lugares.

Existe também outro aspecto a considerar nos resultados gráficos dos contornos de velocidades, que é os seus valores baixos na zona dianteira da sala. Não são de esperar velocidades mais baixas nessa zona, uma vez que a velocidade do ar tem de aumentar para entrar nas condutas de extracção e, por isso, os contornos deviam denotar esse comportamento do ar, o que não se verifica segundo os planos de simetria.

Os gráficos de temperatura segundo as linhas horizontais (Figura 22 e Figura 34) confirmam uma pequena diferença de temperaturas entre as situações de Verão e Inverno, diferença essa de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$. Também se pode notar que os picos superiores de temperaturas são notados em zonas próximas das paredes, com a excepção de a linha da frente (branca) denotar uma maior inconstância nos valores de temperaturas, apresentando um pico na zona a meia distância das paredes laterais da sala. Os gráficos das temperaturas segundo as linhas de um plano útil vêm confirmar valores mais baixos de temperaturas em toda a zona de trás da sala, valores esses até $1,2^{\circ}\text{C}$ abaixo dos desejáveis 24°C .

Relativamente aos gráficos relativos às linhas de velocidades (Figura 23, Figura 25, Figura 35 e Figura 37) são notados variados picos, tanto ao longo das linhas horizontais como das do plano útil. Na zona da frente da sala, os gradientes de velocidade são mais baixos do que nas restantes zonas e isto deve-se ao maior pé-direito nessa zona; a zona traseira da sala, com

baixo pé-direito, apresenta o maior gradiente de velocidades. Para o caso tratado e, considerando os gráficos de velocidades segundo as linhas horizontais, são apresentados gradientes de velocidades para valores escalares não superiores a $0,06\text{m/s}$, que se revelam irrelevantes por serem relativos a uma velocidade que é relativamente baixa e não causa o desconforto aos ocupantes da sala. Tendo em conta os gráficos que explicitam as velocidades segundo as linhas num plano útil, aí se denota um gradiente de velocidades superior que, para o meio da sala, pode ser da ordem de $0,08\text{m/s}$; pela mesma razão, para o caso em estudo pode considerar-se tal valor irrelevante.

5.2. Sala com metade da lotação

5.2.1. Situação de Verão

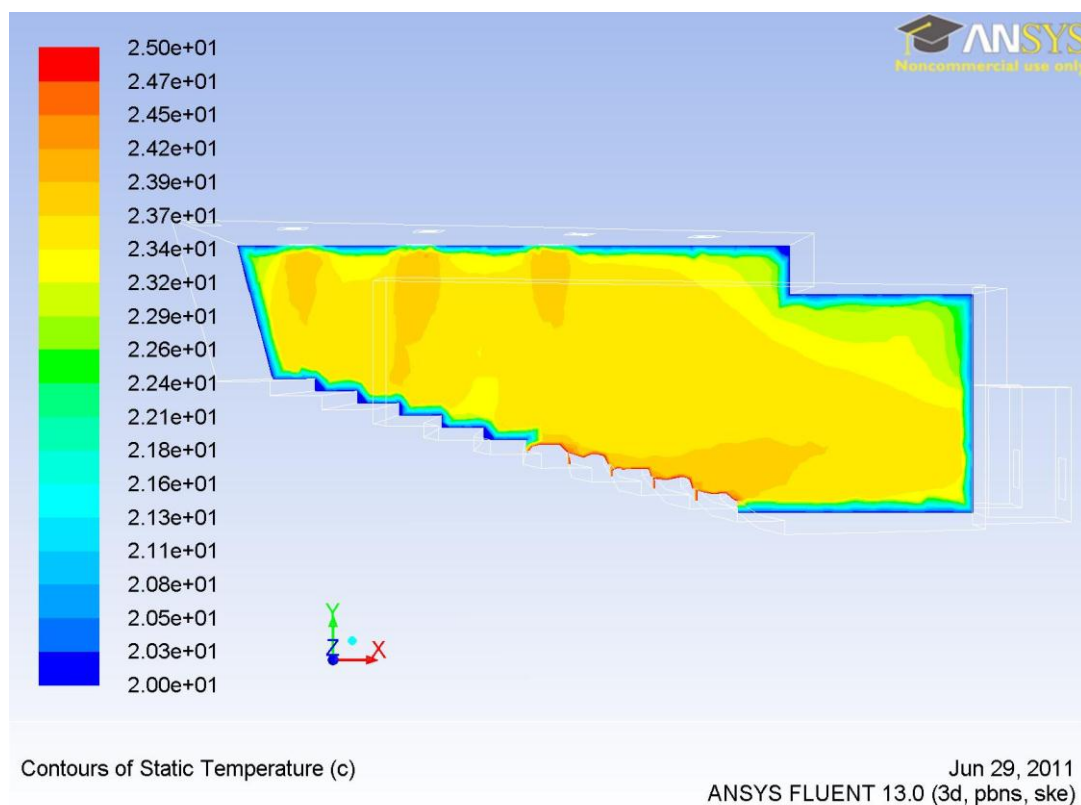


Figura 38 - Representação das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada.

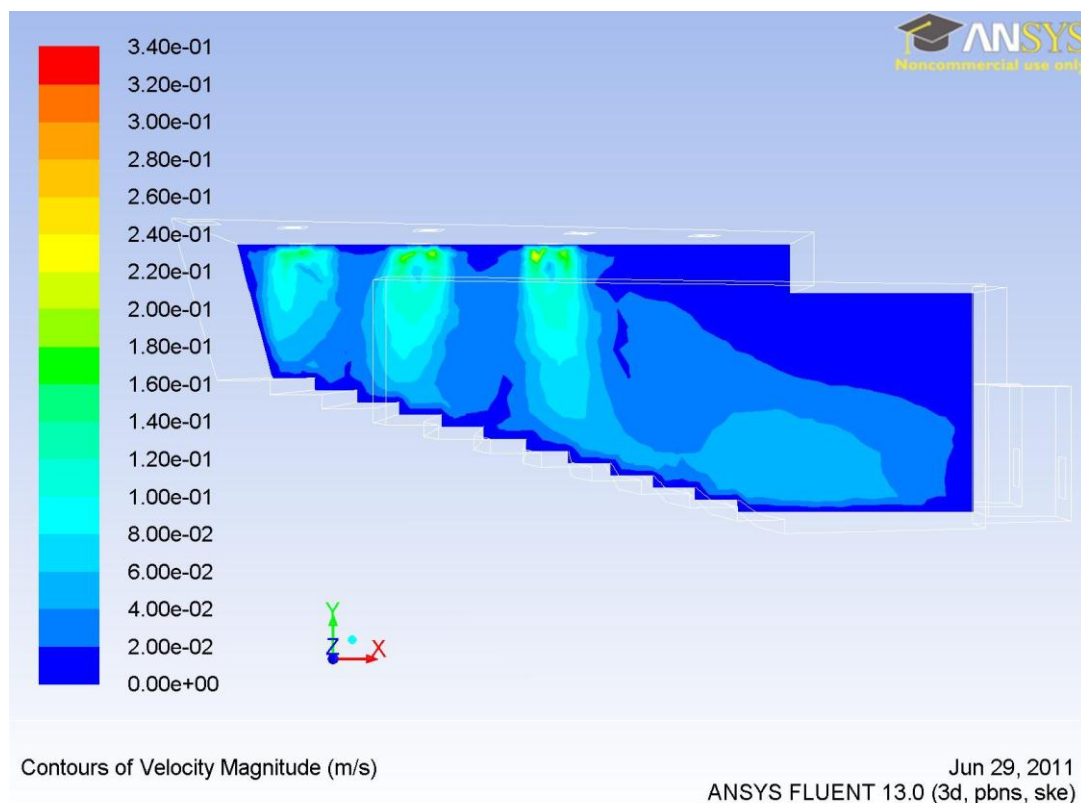


Figura 39 - Representação das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada.

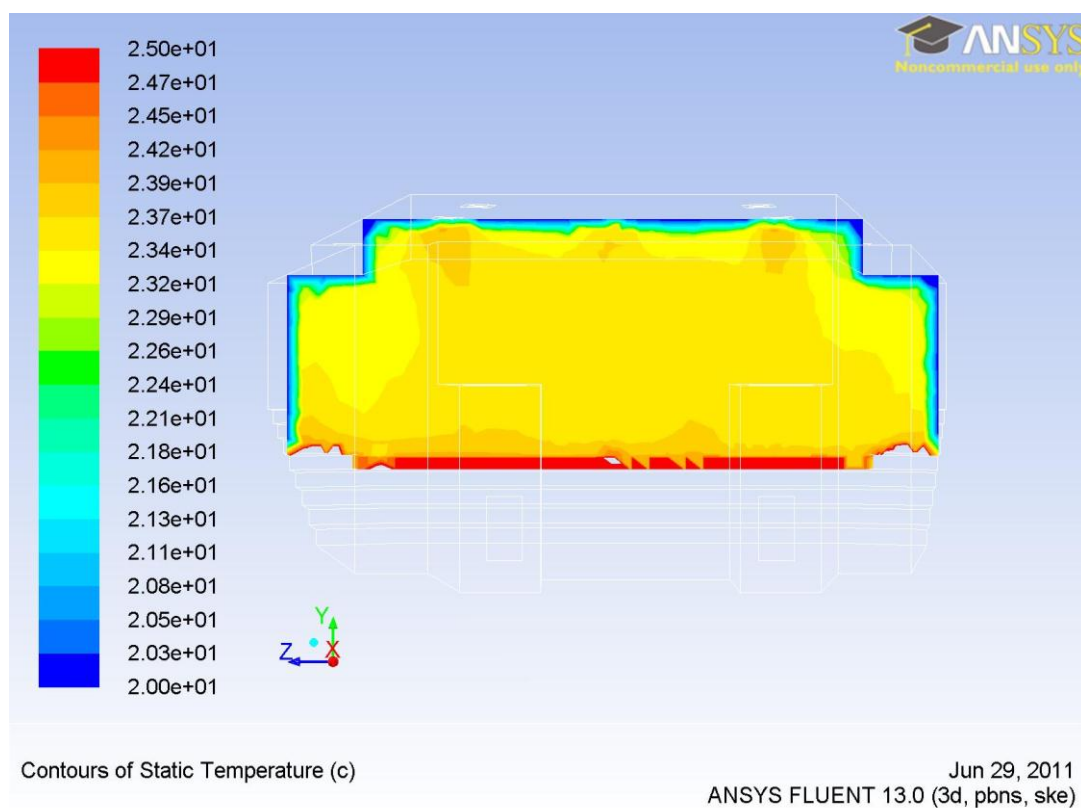


Figura 40 - Representação das temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Verão e sala semi-lotada.

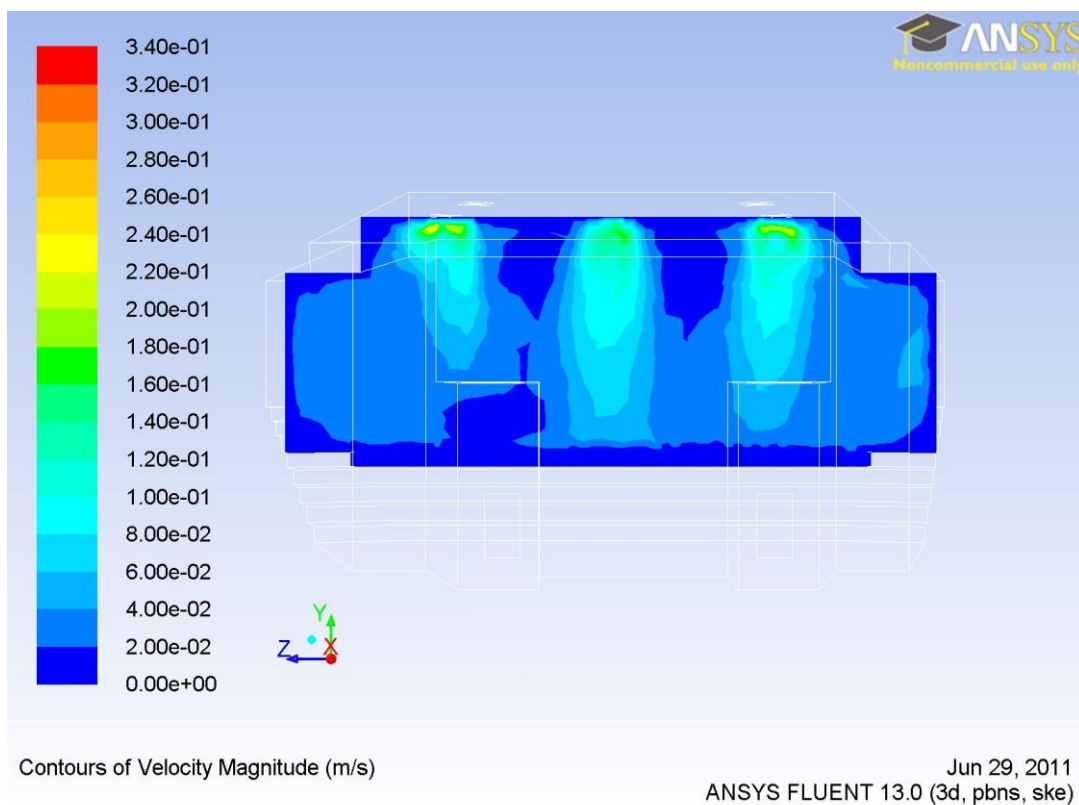


Figura 41 - Representação das velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Verão e sala semi-lotada.

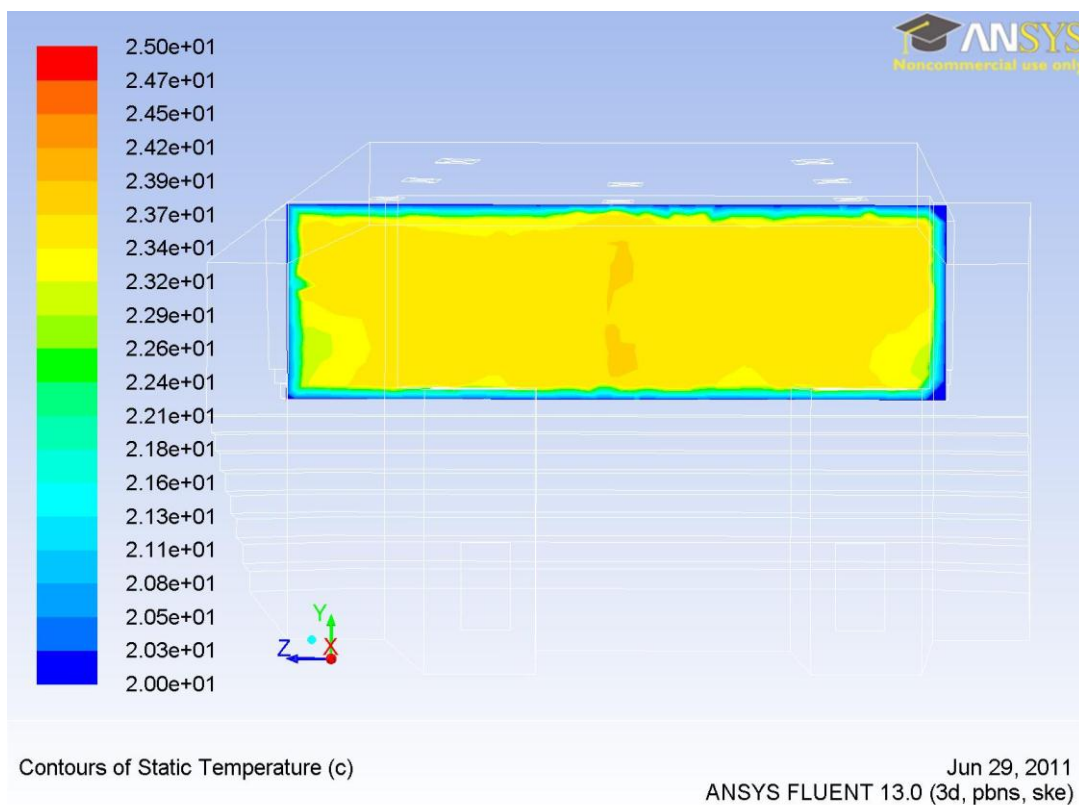


Figura 42 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.

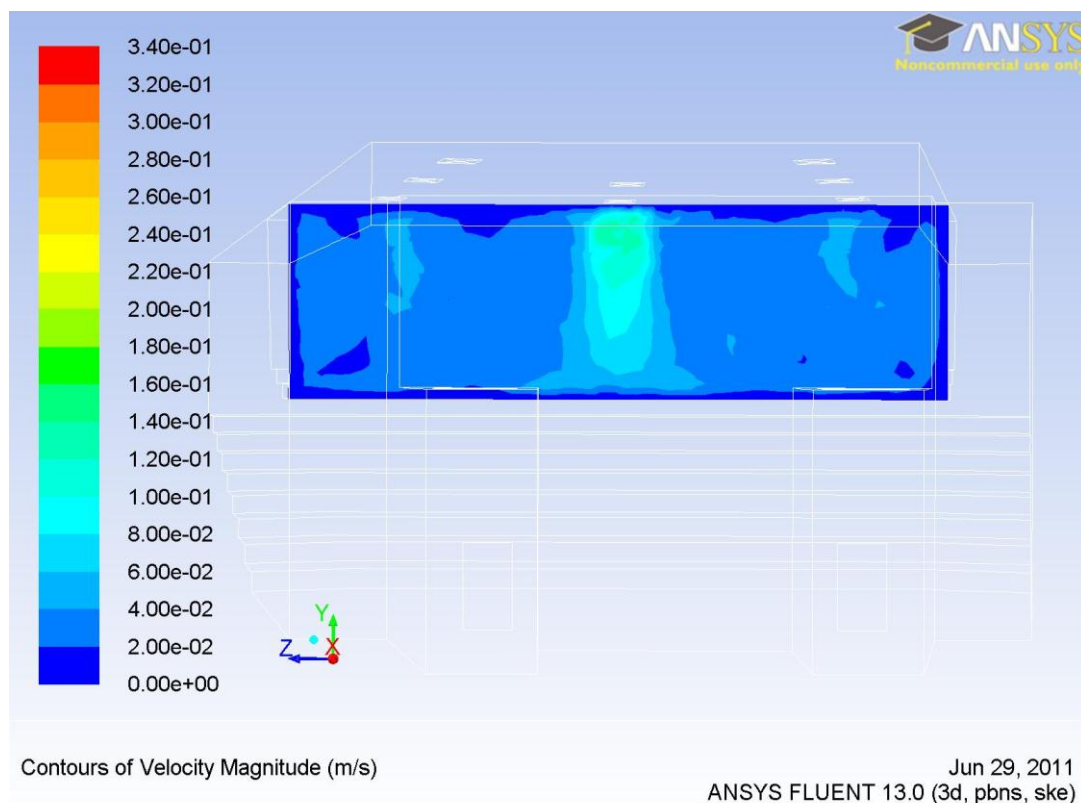


Figura 43 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.

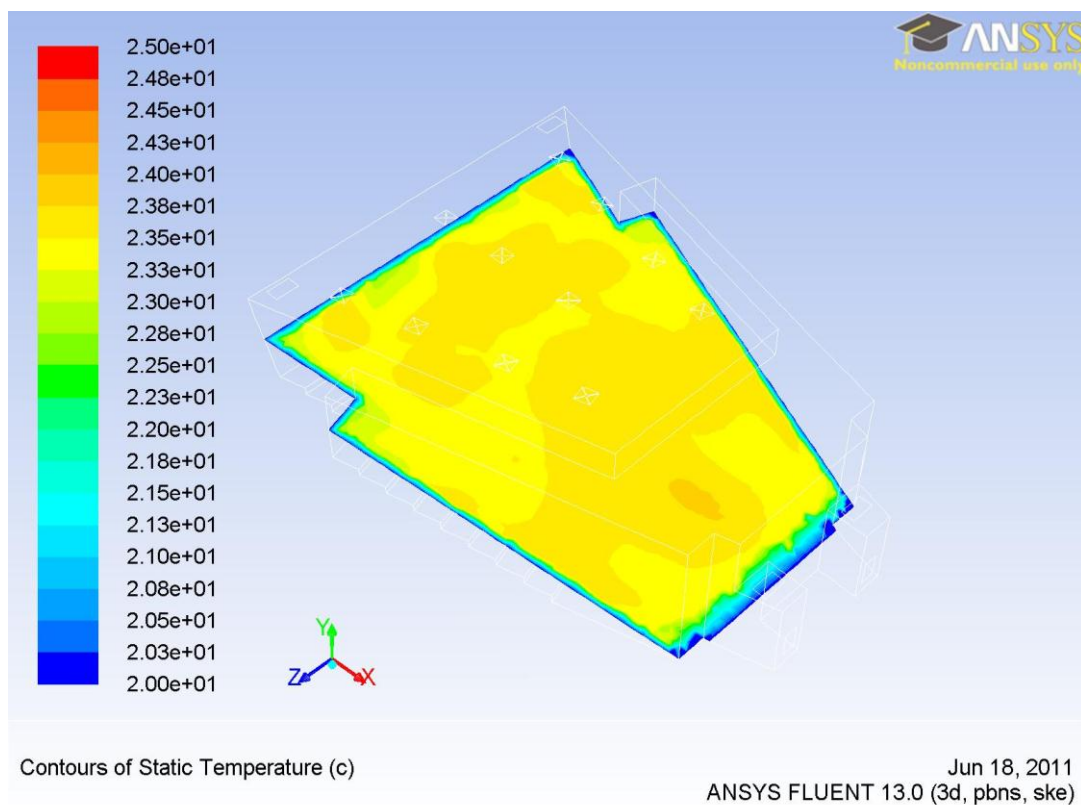


Figura 44 - Representação isométrica dos contornos de temperaturas segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.

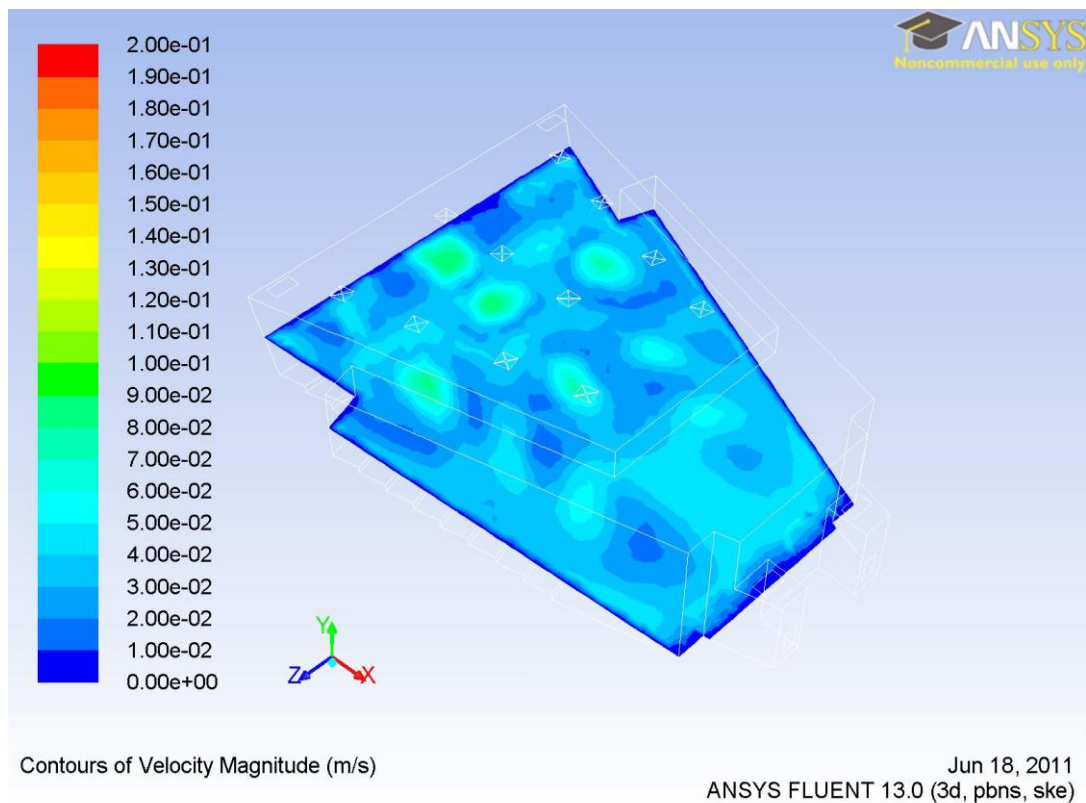


Figura 45 - Representação isométrica dos contornos de velocidades segundo o plano útil da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada.

Define-se agora graficamente as temperaturas e as velocidades obtidas ao longo das linhas criadas.

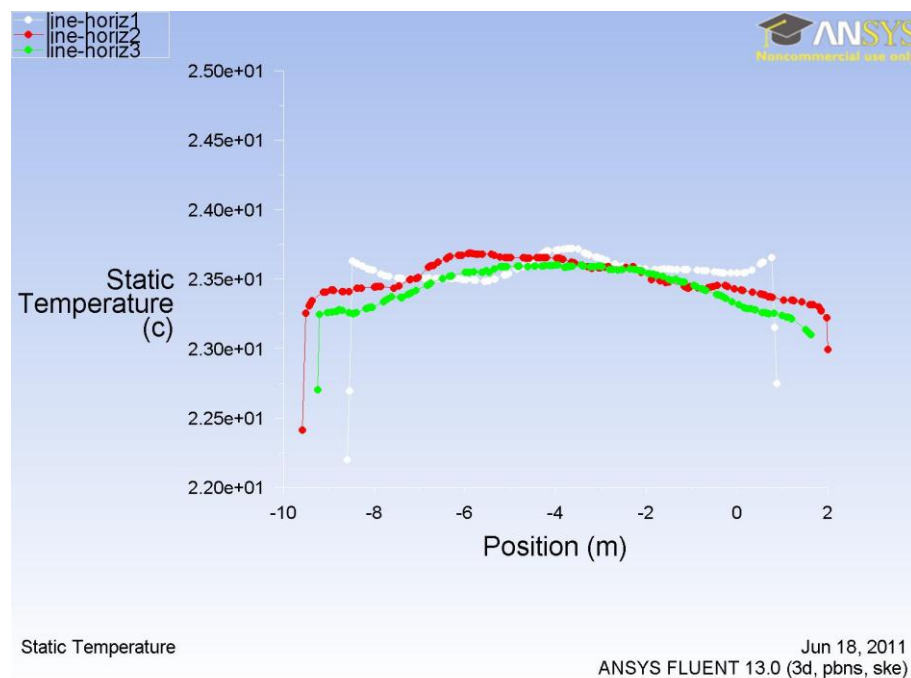


Figura 46 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão.

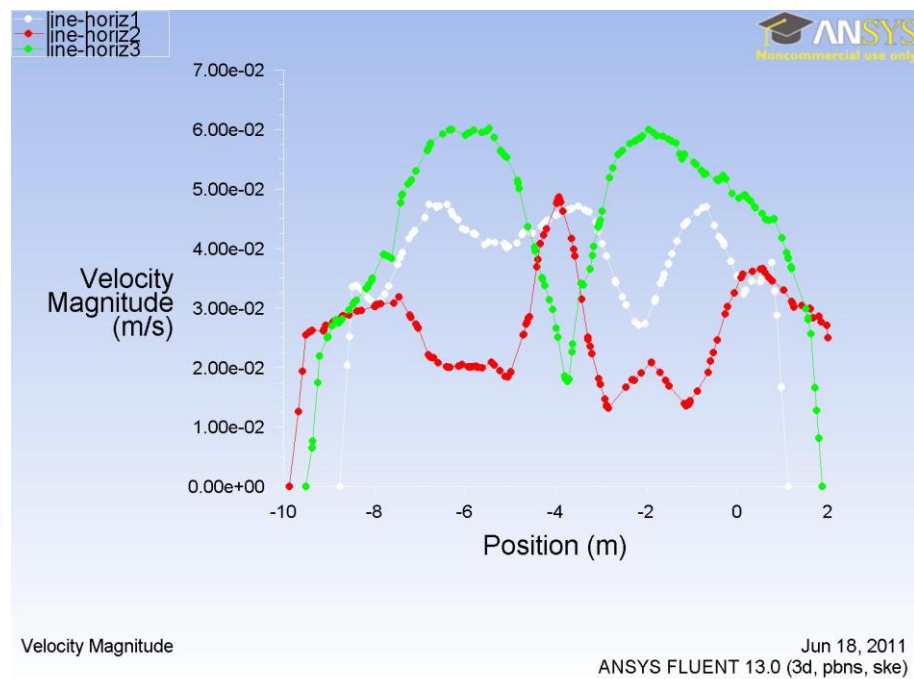


Figura 47 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão.

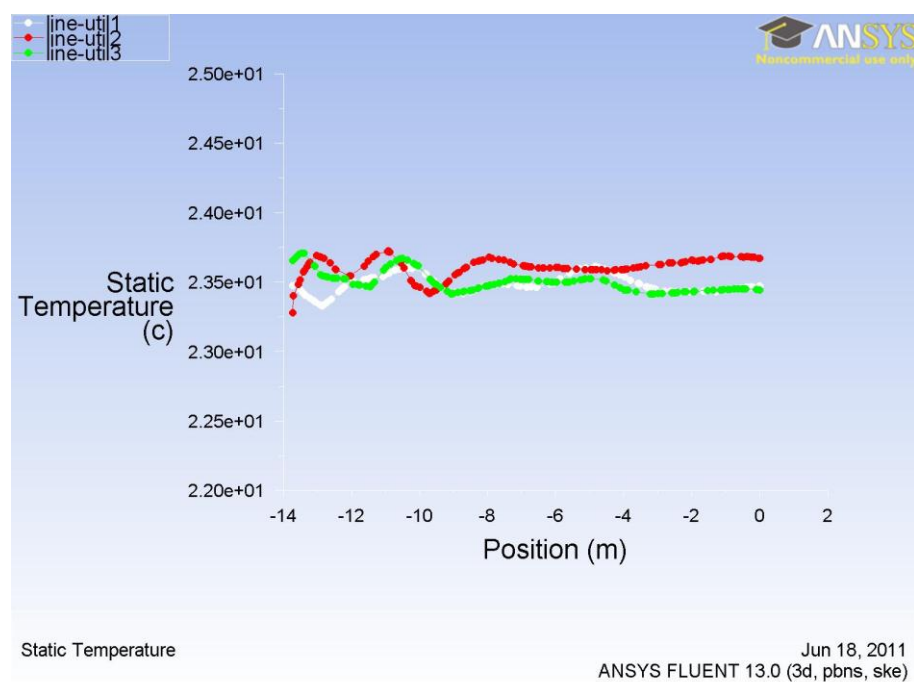


Figura 48 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão.

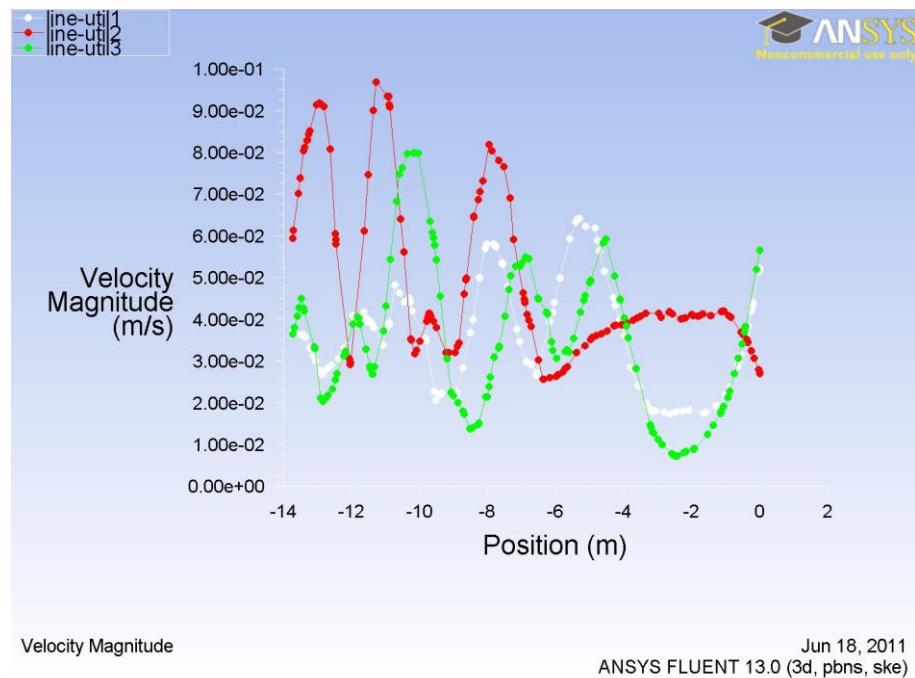


Figura 49 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão.

5.2.2. Situação de Inverno

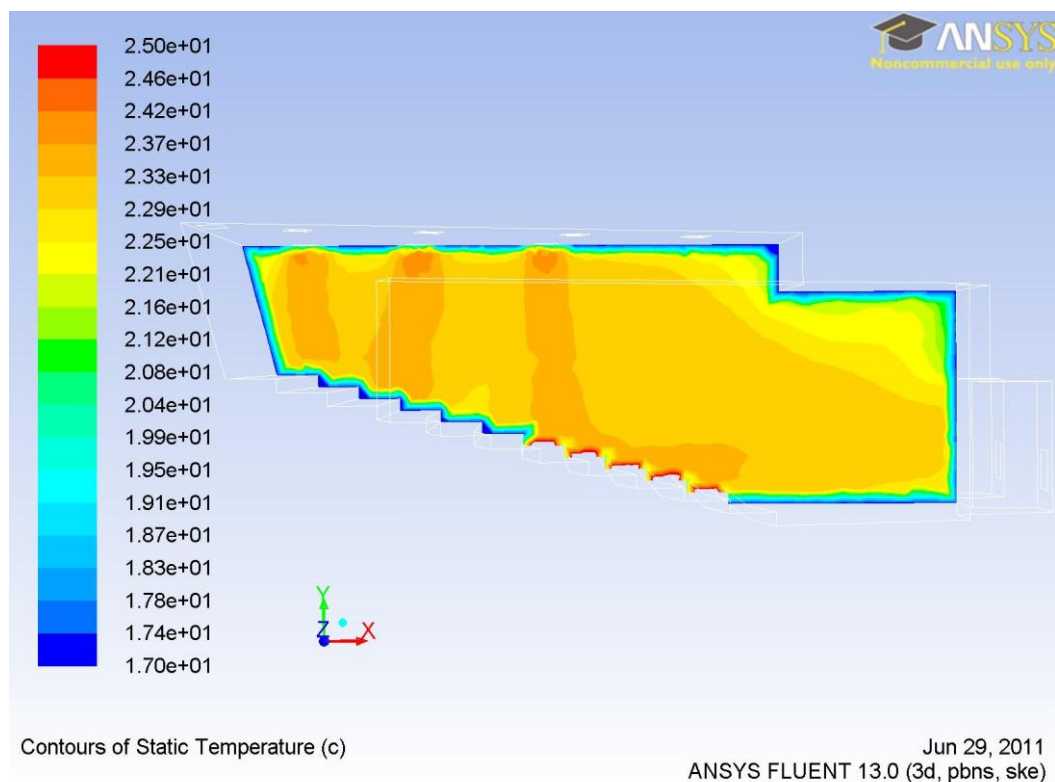


Figura 50 - Representação dos contornos das temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada.

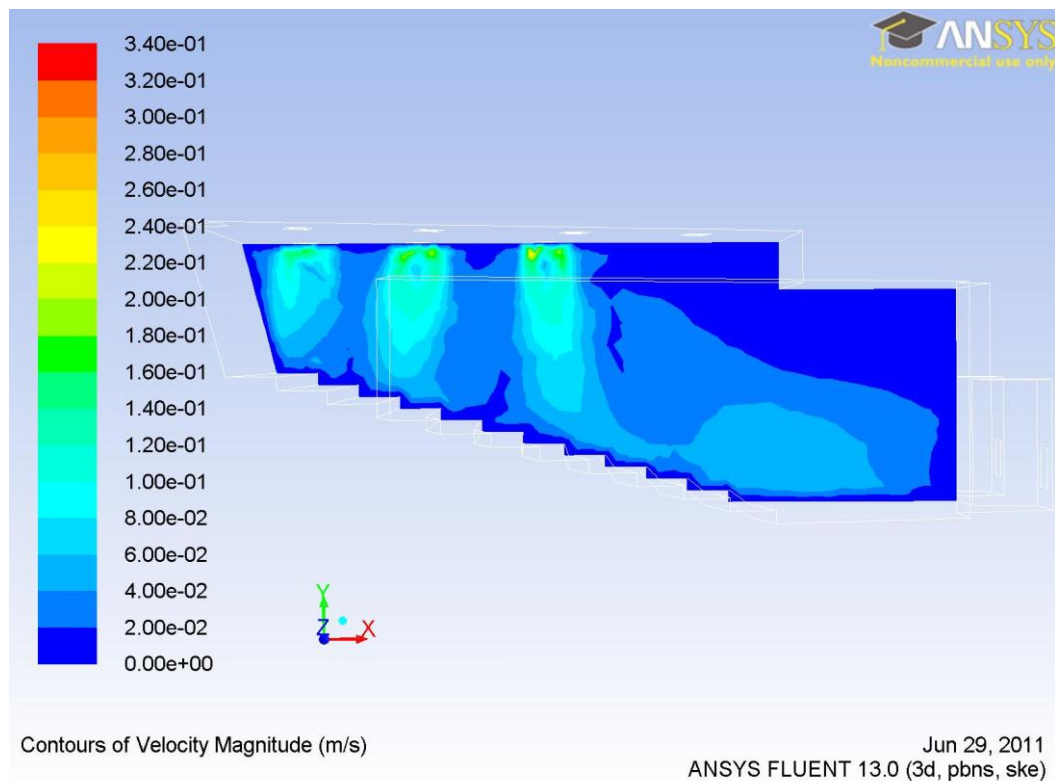


Figura 51 - Representação dos contornos das velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada.

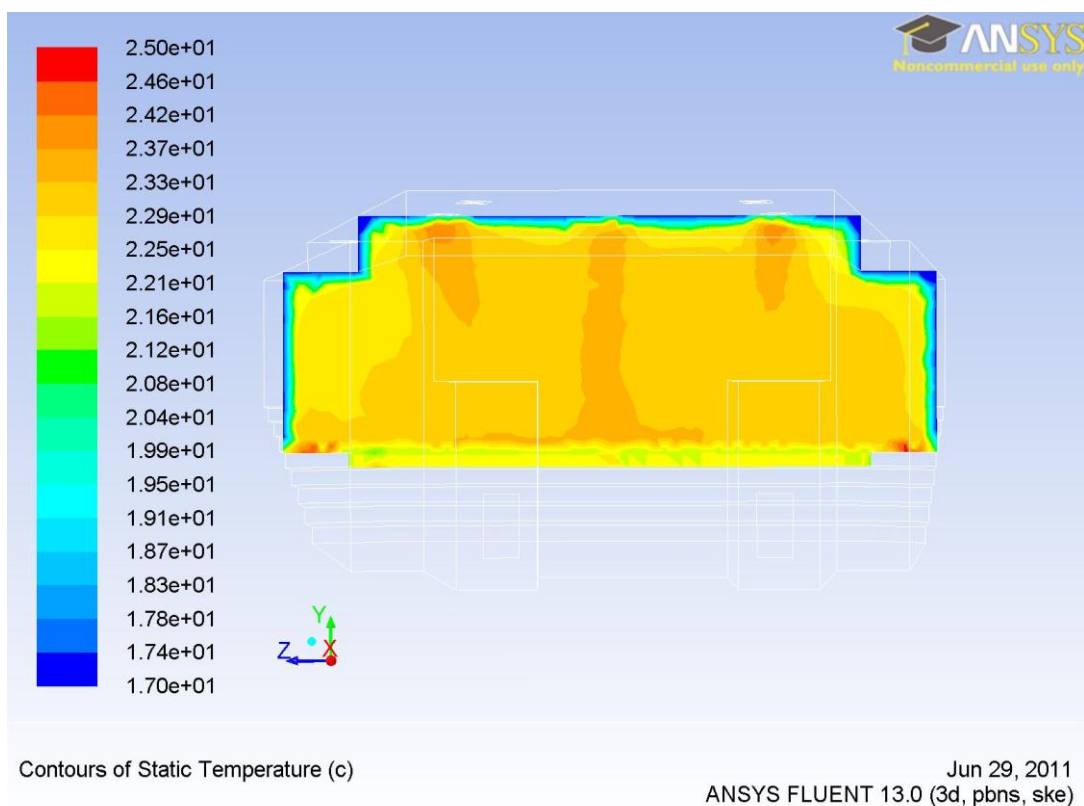


Figura 52 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala semi-lotada.

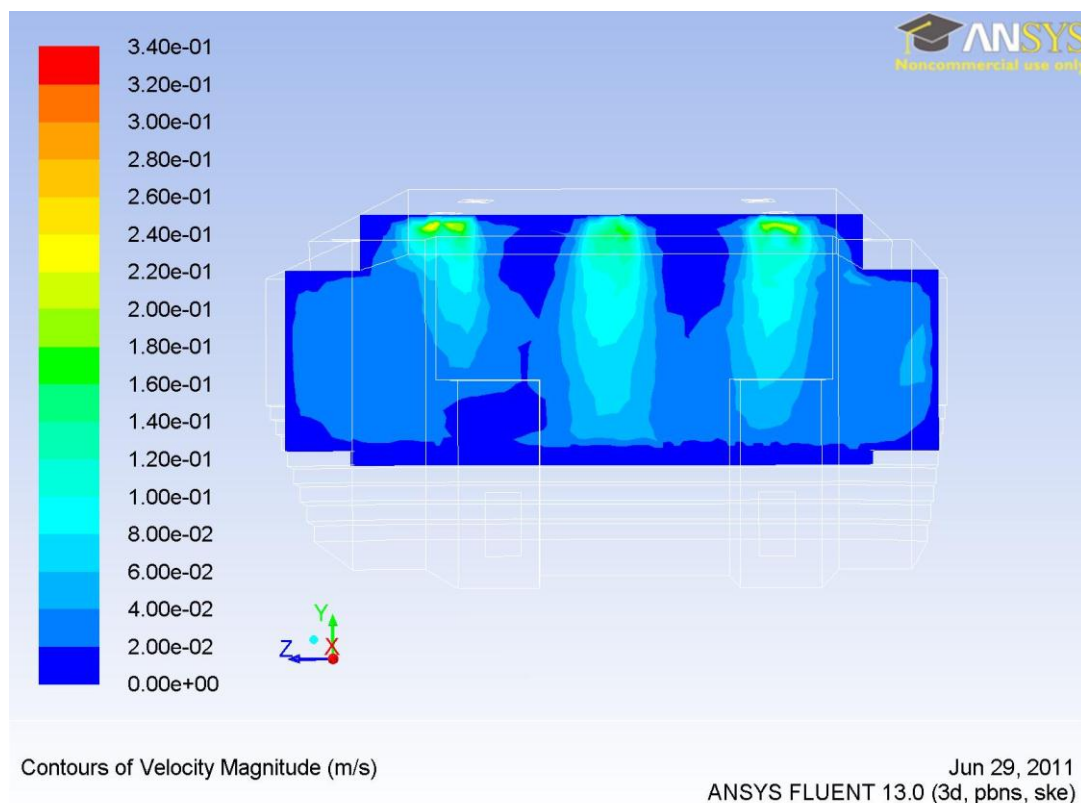


Figura 53 - Representação dos contornos das velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para uma situação de Inverno e sala semi-lotada.

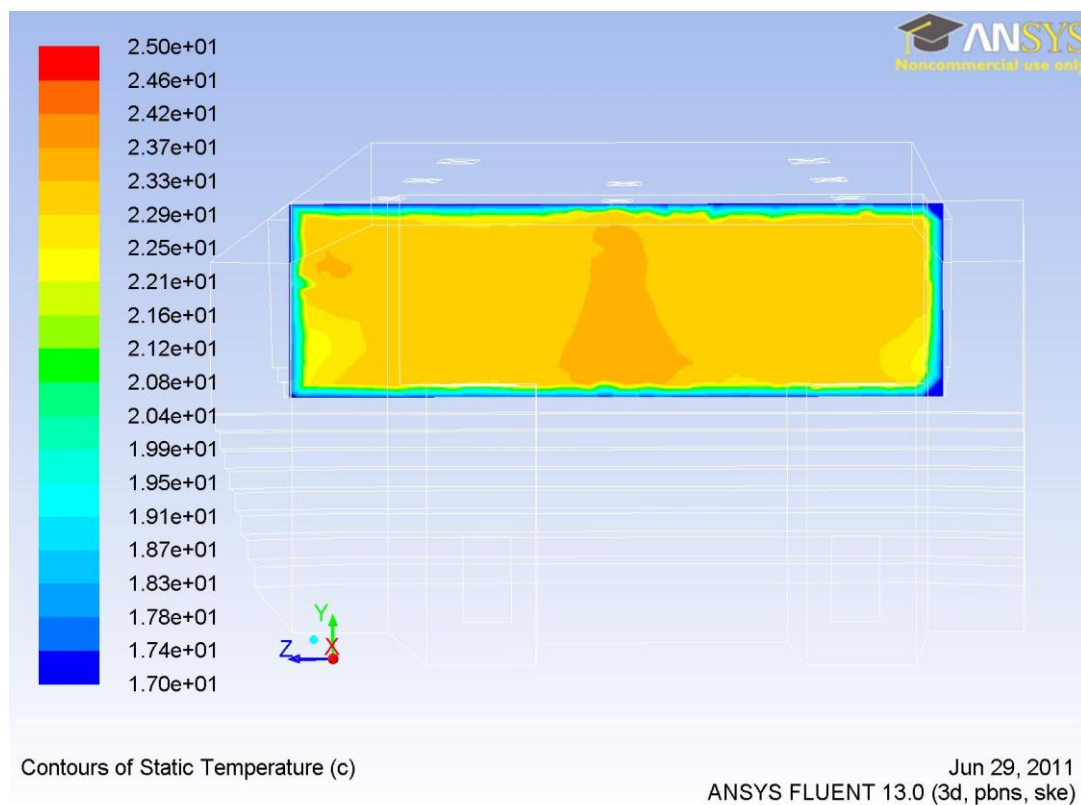


Figura 54 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.

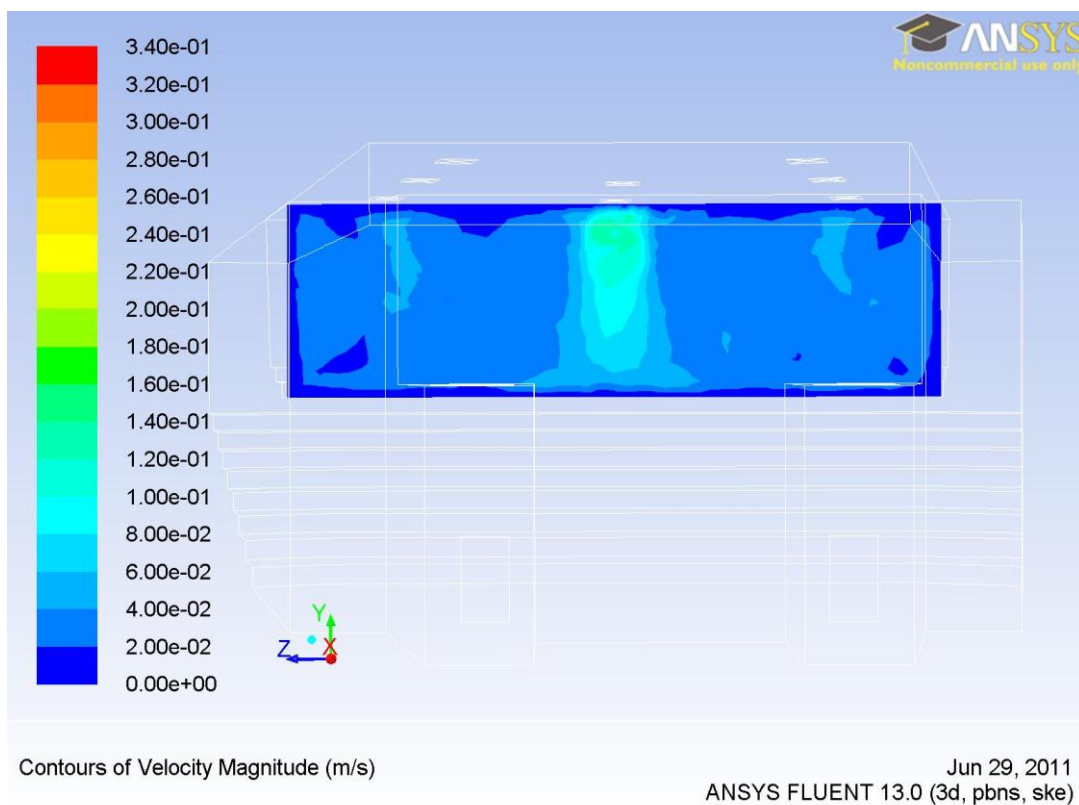


Figura 55 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.

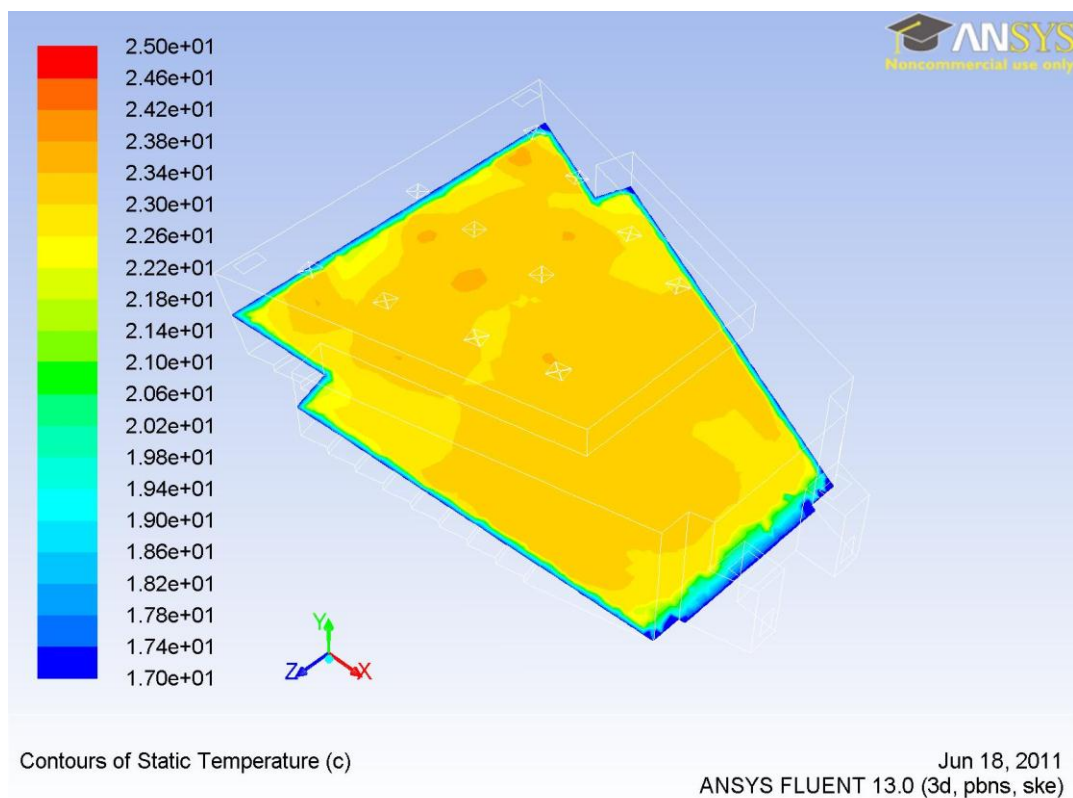


Figura 56 - Representação isométrica dos contornos de temperaturas segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.

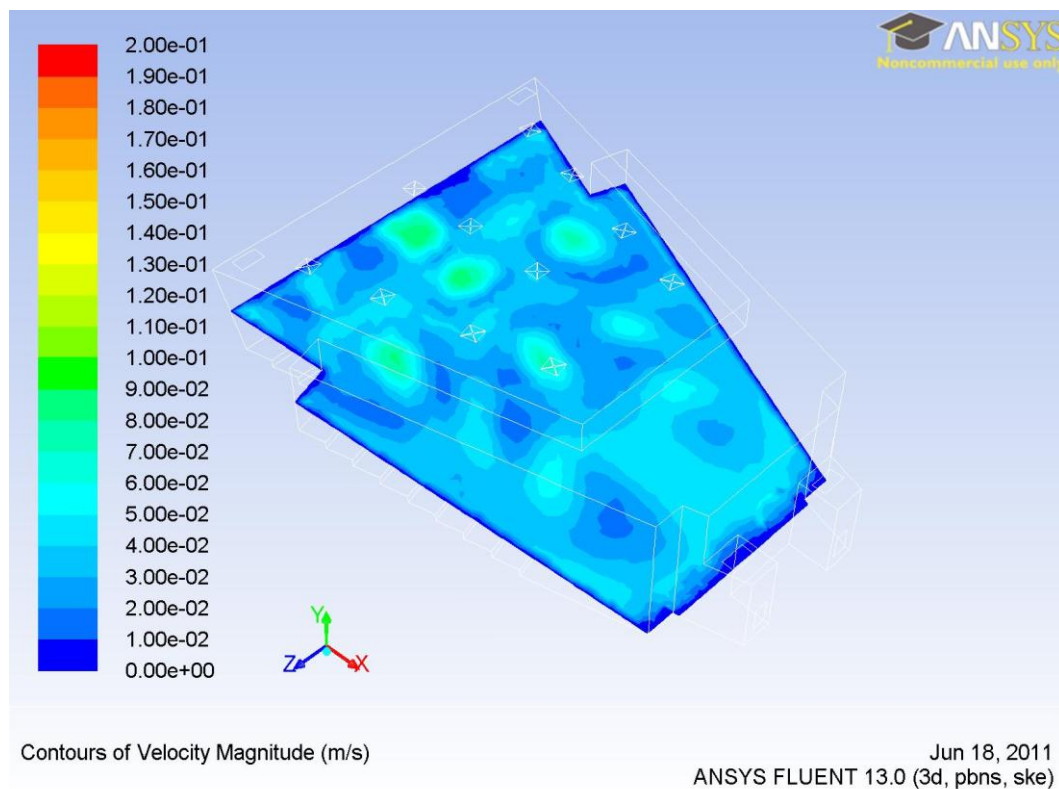


Figura 57 - Representação isométrica dos contornos de velocidades segundo o plano útil da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada.

Passa agora a definir-se graficamente as temperaturas e as velocidades obtidas ao longo das linhas criadas.

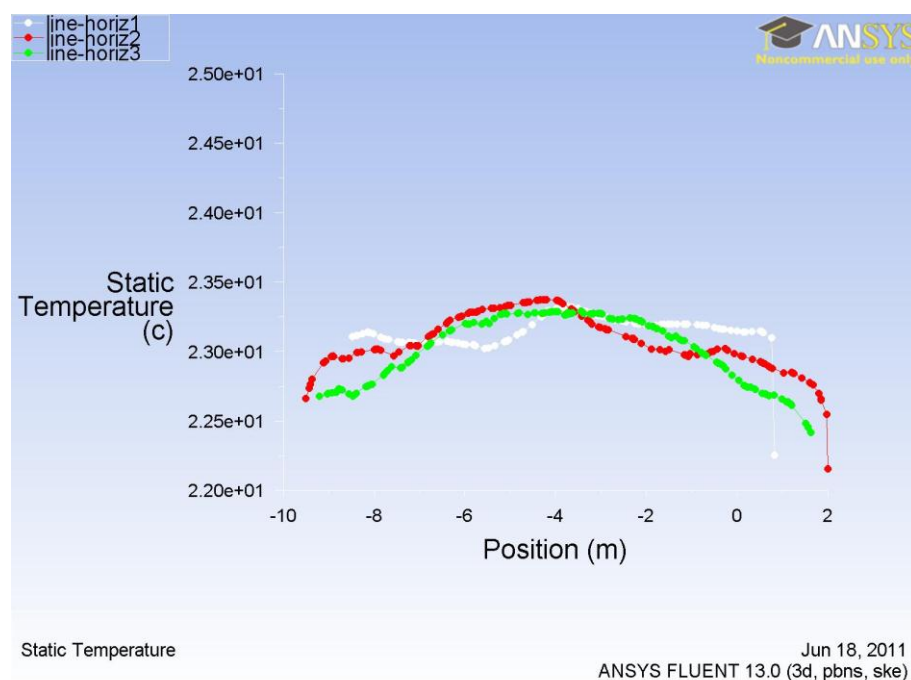


Figura 58 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.

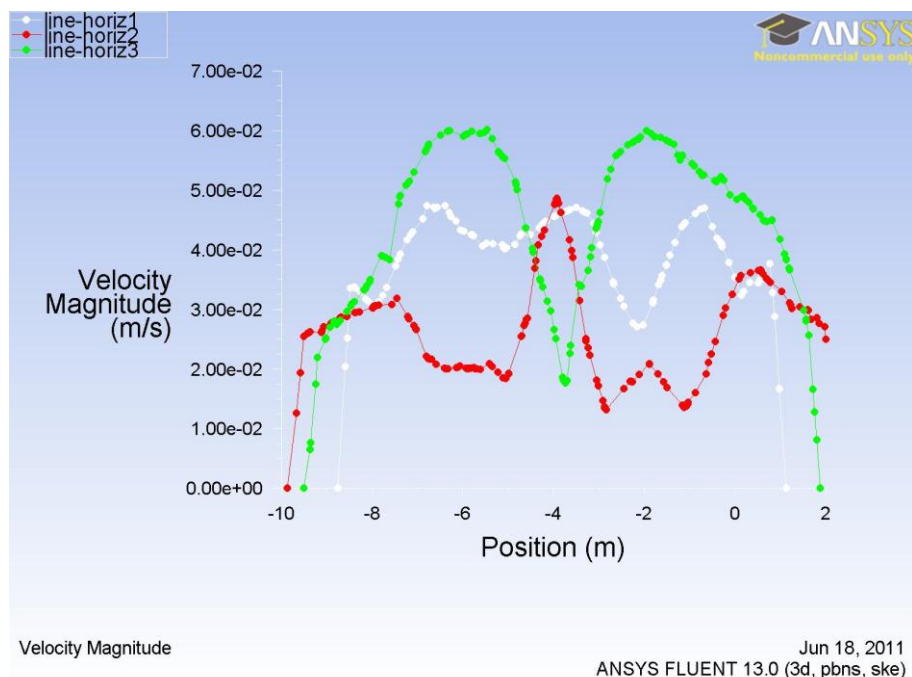


Figura 59 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.

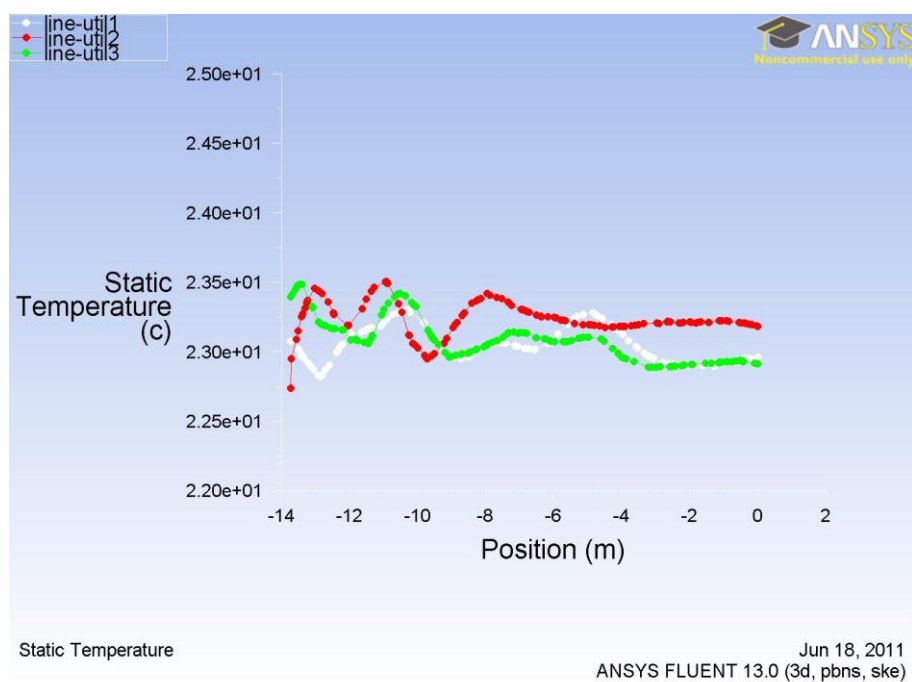


Figura 60 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.

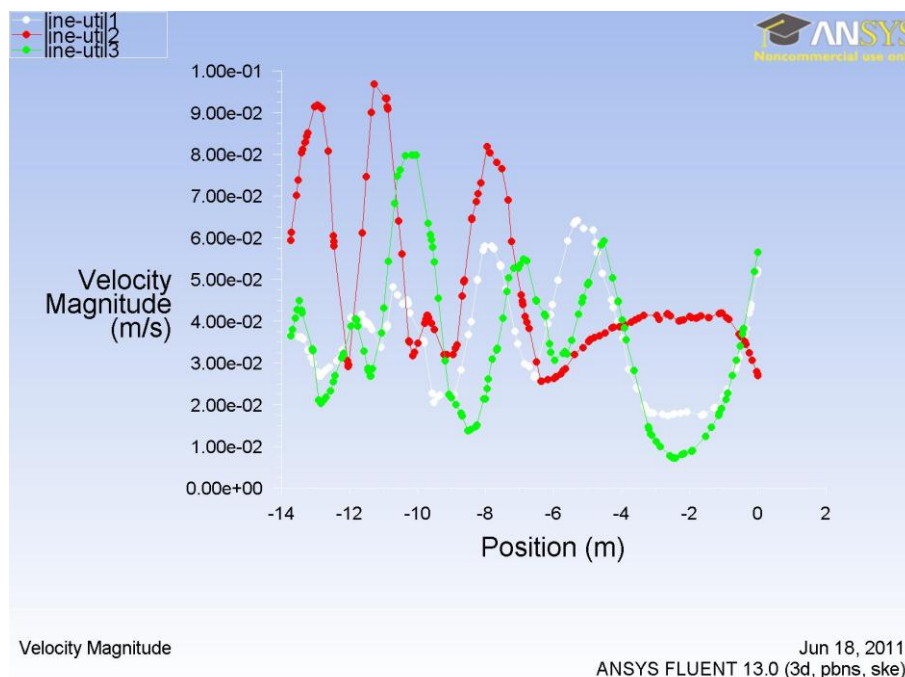


Figura 61 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno.

Passam a ser tecidas algumas considerações sobre as situações expostas de sala semi-lotada. As figuras relativas aos contornos de temperatura representadas no plano de simetria demonstram que a temperatura tem um comportamento semelhante na fase de Verão e de Inverno. Devido à ausência de pessoas, a zona de trás da sala apresenta uma pequena massa de ar mais fria – tal pode implicar um certo desconforto térmico nas pessoas que estejam na última fila a ser ocupada, uma vez que, de ocupantes, só recebem calor dos que estejam sentados à sua frente e ao lado. No entanto, pode afirmar-se que, no geral, a temperatura da sala é constante e de temperatura desejável no espaço em que o é necessário. Os planos úteis representados denotam uma gama de temperaturas 1°C mais baixa que a desejável, principalmente na situação de Inverno, o que não constitui qualquer motivo de desconforto térmico.

Os contornos de velocidades apresentados (Figura 39, Figura 41, Figura 43, Figura 45, Figura 51, Figura 53, Figura 55 e Figura 57) sugerem a inexistência de diferenças significativas entre a situação de Verão e de Inverno. Confirma-se ainda este comportamento semelhante observando os gráficos relativos às velocidades (Figura 47, Figura 49, Figura 59 e Figura 61), os quais denotam que o espaço de maior velocidade está compreendido na zona do meio da sala entre as paredes laterais nos lugares dianteiros, não ultrapassando, porém, os $0,1\text{m/s}$. No entanto, tal como na situação de sala lotada, volta a referir-se que não se verifica um aumento da velocidade do ar segundo o plano de simetria na zona dianteira da sala, facto que seria

expectável, uma vez que quatro das seis condutas de extracção se encontram situadas na zona dianteira da sala e, através esse plano, devia notar-se um aumento do movimento do ar nessa zona.

Observa-se, nos gráficos de temperaturas, uma diferença entre as situações de Verão e Inverno de $0,5^{\circ}\text{C}$ à altura das linhas desenhadas segundo o plano útil (Figura 48 e Figura 60). Essa diferença não acarta qualquer significado relevante, sendo que as temperaturas em qualquer das estações apresentam valores sinónimos de conforto térmico próximos dos desejáveis.

5.3. Comparação dos dois modelos de turbulência utilizados

Neste subcapítulo compara-se os resultados retornados pela simulação efectuada com recorrência aos dois modelos já referidos: o modelo *Standard k- ϵ* e o modelo *SST k- ω* . Para efeitos de uma comparação expedita resolveu utilizar-se a comparação entre temperaturas geradas pela resolução de cada um dos modelos em pontos de iguais coordenadas. Esses pontos são localizados à saída das grelhas de extracção.

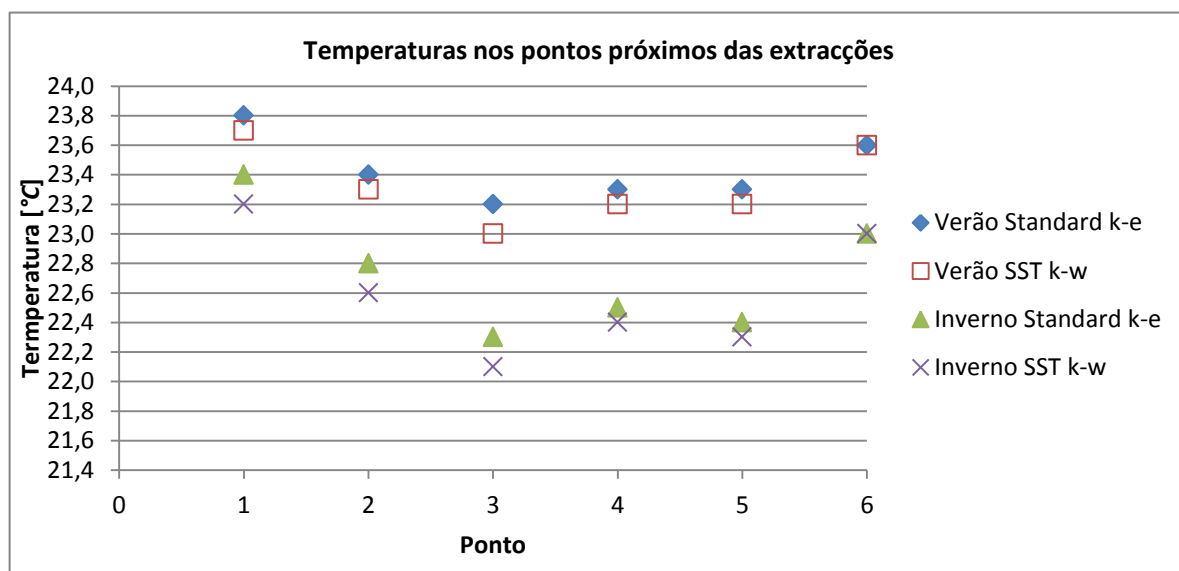


Figura 62 - Comparação dos modelos em termos de temperaturas para uma situação de sala lotada.

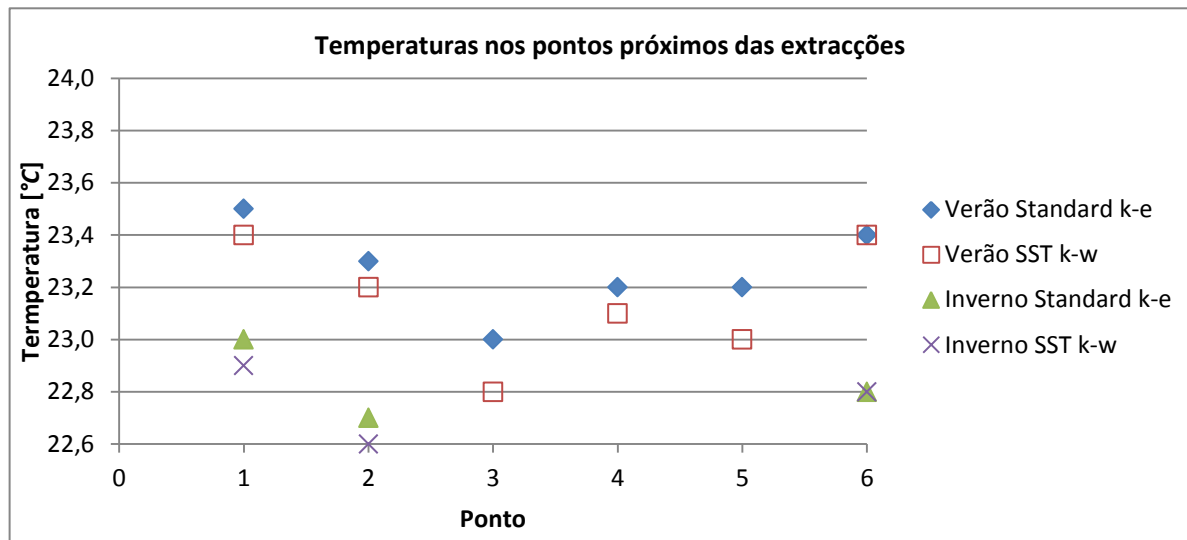


Figura 63 – Comparação de modelos em termos de temperaturas para uma situação de sala semi-lotada.

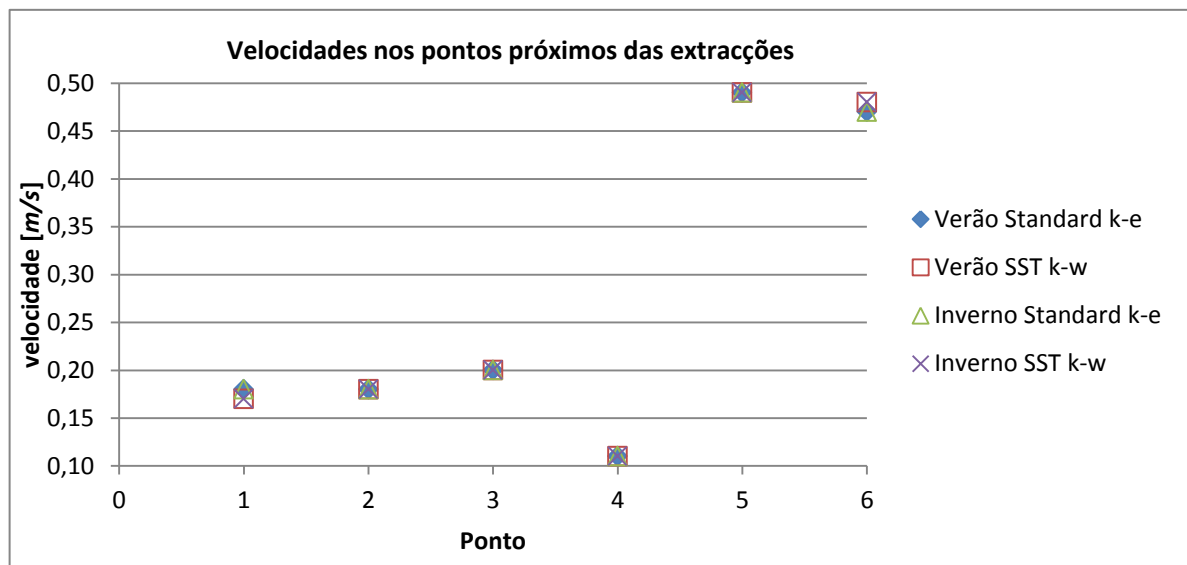


Figura 64 – Comparação de modelos em termos de velocidades para uma situação de sala lotada.

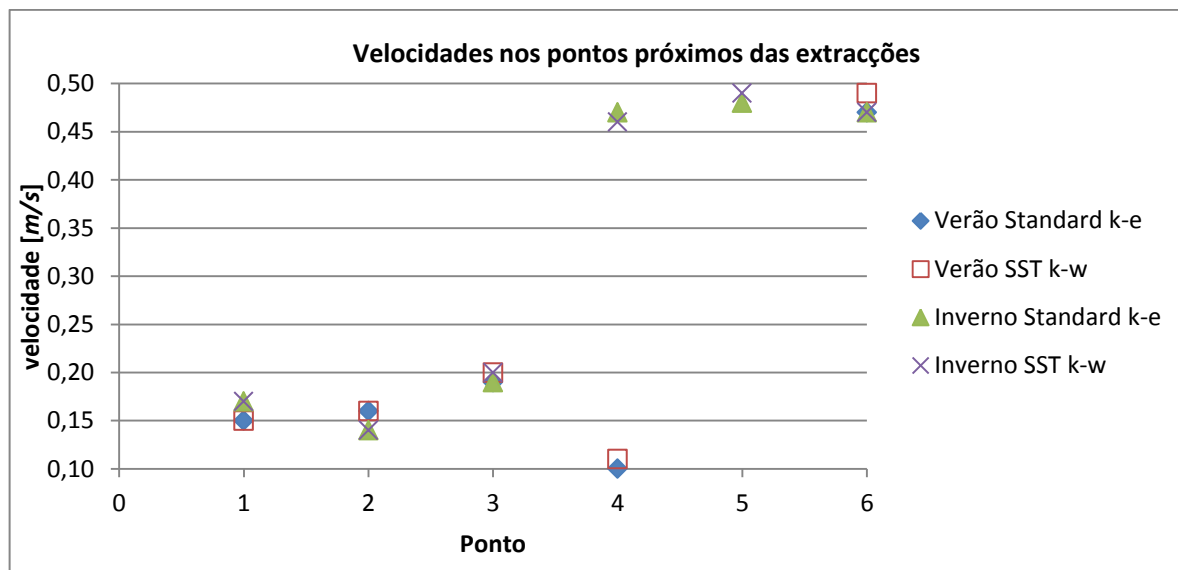


Figura 65 – Comparação de modelos em termos de velocidades para uma situação de sala semi-lotada.

Os valores explícitos na tabela para os casos dos modelos de turbulência *Standard k-ε* e *SST k-ω* permitem que se afirme a não existência de uma diferença de temperaturas superiores a $0,2^{\circ}\text{C}$, assim como diferenças de $0,02\text{m/s}$ em termos de velocidades. Para além de isto significar que o programa restituiu temperaturas e velocidades de valores muito semelhantes calculadas por dois modelos de turbulência distintos, também deixa implícita uma maior segurança nos valores obtidos na simulação.

Considerando as condições de simetria da sala e dos pontos criados para a avaliação dos dois modelos referidos, pode afirmar-se que eram esperados valores idênticos, em termos de temperaturas e de velocidades nos pontos 1 e 2, tanto como em 3 e 4 e em 5 e 6 segundo o mesmo modelo de turbulência. Os valores das temperaturas nos pontos 1, 3 e 5 não se aproximam de todo, como esperado, do seu respectivo simétrico para qualquer um dos modelos; o mesmo também se pode afirmar relativamente às velocidades obtidas. Para o mesmo modelo de turbulência utilizado, as temperaturas diferem em $0,6^{\circ}\text{C}$ entre os pontos 1 e 2 (situação de Inverno com sala lotada para resolução com o modelo de turbulência *Standard k-ε*), nota-se também diferenças máximas de $0,4^{\circ}\text{C}$ entre os pontos 3 e 4 (situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução por qualquer dos modelos) e ainda diferenças de $0,6^{\circ}\text{C}$ entre os pontos 5 e 6 (situação de sala lotada no Inverno segundo uma resolução através do modelo *Standard k-ε*). Confronta-se também velocidades nos pontos 1 e 2 que, devendo ser iguais, diferem em $0,03\text{m/s}$ (situação de sala semi-lotada no Inverno para o modelo *SST k-ω*); o mesmo se afirma relativamente aos pontos 3 e 4, em que existe uma diferença máxima entre

os seus valores de $0,09\text{m/s}$ (em todas as situações, excepto na de sala semi-lotada no Inverno para o modelo *Standard k- ϵ*); os pontos 5 e 6 apresentam diferenças máximas de $0,04\text{m/s}$ (situação de sala semi-lotada no Verão com resolução segundo o modelo *Standard k- ϵ*). Explicando de outra forma, verifica-se velocidades e temperaturas, para o modelo *Standard k- ϵ* , que deviam ser de igual valor escalar, mas cujas diferenças são respectivamente de $0,09\text{m/s}$ e de $0,6^\circ\text{C}$; o modelo *SST k- ω* denota diferenças em velocidades de $0,09\text{m/s}$ e em temperaturas de $0,7^\circ\text{C}$. Estas diferenças de velocidades e temperaturas apresentadas, não sendo esperadas, acusam a incapacidade do sistema de retornar uma solução inteiramente coerente dados os valores dos resíduos estipulados na fase de *pre-processing*, ou seja, são indicadores de insuficiência dos valores de convergência da solução. Por outro lado, a velocidade do ar começa a aproximar-se da calculada para as condutas de extracção de $0,71\text{m/s}$, em oposição às velocidades verificadas ao longo de toda a zona da sala ocupada pelas pessoas e mais longe dessas condutas.

Os valores que deram origem aos valores constantes nas figuras deste subcapítulo poderão ser consultados nos Anexos.

A totalidade dos resultados obtidos ainda carece ainda de uma análise geral, que se passa a apresentar.

Em qualquer das situações apresentadas neste capítulo, não existe nenhum indício de desconforto em termos de temperatura. A gama de temperaturas existentes na sala é reduzida, sendo, consequentemente, o gradiente térmico baixo. No entanto, existem duas zonas onde os gradientes são mais altos – uma delas é a zona frontal da sala, em que existe a influência nessa área da presença de pessoas nos assentos; outra é a zona traseira da sala, onde temperatura nos assentos é influenciada pela sua proximidade à parede, aumentando desta forma os gradientes.

Os dois planos de frente em que são mostrados resultados foram criados propositadamente para efeitos de comparação de temperaturas com e sem presenças de pessoas numa situação de sala semi-lotada. Dos valores apresentados segundo os dois planos de frente, tanto para a situação de Verão como de Inverno, constata-se gradientes de temperaturas mais acentuados segundo o plano dianteiro, o que seria de esperar, tendo em conta a presença de pessoas apenas na zona da frente da sala. Pode constatar-se diferenças de temperaturas de até aproximadamente 2°C nos planos de frente e estes são evidentes na zona do meio da sala e também junto às paredes. Levanta-se a questão do conforto térmico dos ocupantes dos últimos assentos, que não recebem calor humano vindo da zona traseira da sala e, por isso,

susceptíveis a gradientes de temperaturas de até esse valor. Esta situação não é semelhante na situação de sala lotada, em que as temperaturas nas duas zonas são idênticas devido à presença de pessoas nas duas zonas em questão. Pode, no entanto, afirmar-se que a temperatura da sala segundo o plano útil que determina a temperatura a uma altura média das pessoas ronda os $23,5^{\circ}\text{C}$ em qualquer tipo de situações consideradas.

Os valores das velocidades nas zonas de presença humana (plano útil) retornados pelo *software* não revelam qualquer parâmetro anormal e são indicadores de condições de conforto na sala, não ultrapassando as velocidades dos $0,15\text{m/s}$ no Inverno ou dos $0,2\text{m/s}$ em qualquer altura do ano, como recomendado em [8] e [12], respectivamente, na zona da presença dos ocupantes. Esses valores têm um máximo na ordem dos $0,11\text{m/s}$, incidente na zona traseira da sala, o que pode ser confirmado pelos gráficos que contêm os seus valores segundo as linhas horizontais, e o seu valor médio na totalidade da sala ronda os $0,06\text{m/s}$. Os resultados obtidos também satisfazem o leque de temperaturas operativas de conforto descritas em [8] e [9].

6. Conclusões e Considerações Finais

O presente trabalho pretendeu o aprofundamento do uso de uma ferramenta computacional para análise de climatização, fazendo-se recorrência ao estudo do comportamento do ar numa sala de aulas e palestras. Para tal, foi necessária a ambientação às ferramentas de *CFD* e um estudo das suas potencialidades e limitações. Procurou fazer-se um estudo baseado essencialmente em resultados de cariz mais prático. Recorreu-se ao uso de vários modelos de turbulência, mas apenas são apresentados os modelos que convergiram até aos critérios de paragem impostos – os modelos de turbulência *Standard k-ε* e *SST k-ω*. Procurou simular-se com condições o mais aproximado possível da realidade e exibir-se os resultados da forma mais expedita, ou seja, através de ilustrações e gráficos que permitissem um entendimento imediato das variáveis em estudo.

É importante referir que todas as simulações cujas exposições são feitas neste trabalho foram efectuadas em situações em que foi assumido de regime permanente. Este trabalho de simulação não foi baseado em qualquer trabalho efectuado experimentalmente; por isso, a comparação com dados obtidos experimentalmente foi impraticável. Os objectivos do estudo foram o levantamento das temperaturas e velocidades no interior da sala e tais foram atingidos com sucesso.

No capítulo relativo à Apresentação e Análise de Resultados, trata-se de comparar os modelos de turbulência em termos de velocidades e temperaturas à entrada das grelhas de extracção. Estes seis pontos foram considerados e escolhidos por duas razões: para que se comparasse os resultados de temperaturas e velocidades obtidos por cada um dos modelos de turbulência utilizados e também para que se pudesse aferir as temperaturas a que o ar é extraído. Tendo em conta os resultados obtidos, nota-se que as temperaturas de extracção se situam todas a uma temperatura abaixo dos 24°C. Nas situações de Inverno esta temperatura chega a ser de 22°C no ponto 3 para uma situação de sala semi-lotada. É de grande importância referir as temperaturas à entrada dos extractores uma vez que, como mencionado no presente trabalho, o sistema de AVAC possui sensores de temperatura localizados nos *outlets* que regulam a

temperatura de insuflação, imposta automaticamente pelo sistema. Isto significa que, para a situação em questão, ou seja, em que as temperaturas retornaram todas abaixo dos 24°C à entrada dos *outlets*, o sistema responderá aumentando a temperatura do ar a insuflar para um valor imposto pelo sistema de controlo com o fim de restabelecer a temperatura da sala para o valor pretendido. Em termos práticos, portanto, a situação de regime permanente não é uma boa aproximação para o estudo do comportamento do ar, não pelo menos segundo as condições impostas neste trabalho, uma vez que certamente a sala deve ser estudada como um caso de regime instacionário. Existem também outros condicionantes que podem influenciar a temperatura à entrada do caudal de extracção e, conseqüentemente, a temperatura de insuflação. São exemplos deles a situação de portas abertas ou em intermitência, a incidência do sol nas duas janelas situadas ao meio da sala ou a afluência de utilizadores.

Uma vez que a temperatura do ar a insuflar é determinada automaticamente pelo controlador do sistema, é incerto o valor da temperatura para situações tanto de aquecimento como para arrefecimento. Esta característica do controlador pode, por vezes, não ser um bom precedente. Se a temperatura aumentar de repente na sala, o sistema automaticamente insufla ar frio a uma temperatura pelo mesmo determinada. Essa temperatura de arrefecimento pode ser tanto de 20°C como de 14°C , por exemplo. Ora, se o sistema insuflar ar a 20°C para arrefecer o espaço, o conforto térmico não é afectado; no entanto, se o ar for insuflado a uma temperatura mais baixa, tal como a 14°C , os gradientes de temperatura da sala aumentam e é provável que, mesmo para as velocidades que foram registadas nos resultados, os utilizadores da sala sintam o desconforto de pequenas massas de ar de temperaturas relativamente baixas, principalmente numa situação de Verão, em que a indumentária usada nessa estação por regra protege menos área de pele exposta ao ar.

Relativamente aos resultados obtidos pela simulação, disponíveis na Apresentação e Análise de Resultados, pode afinar-se várias considerações. Em termos de velocidades, sabe-se que não é atingido ou ultrapassado o valor de $0,25\text{m/s}$, considerado na área de climatização como o valor máximo de referência admissível para a existência de condições de conforto num espaço fechado e ventilado. Verifica-se, também, um gradiente de velocidades baixo, independentemente da situação considerada, com insuflações à saída das grelhas na ordem dos $0,58\text{m/s}$.

No que diz respeito às temperaturas, pode afirmar-se que, independentemente da situação estudada, os gradientes são baixos e tal favorece as condições de conforto dos utilizadores.

Em situação de Verão, o ar insuflado à temperatura de 24 °C desce mais facilmente até ao piso, pois as temperaturas a que as pessoas se encontram são mais altas e o ar insuflado mais denso. Numa situação de sala semi-lotada, os gradientes de temperaturas observados podem desfavorecer os utilizadores sentados o mais atrás na sala devido à ausência da transferência de calor de outros vinda de trás deles. De notar também que as zonas próximas da parede são afectadas pelas diferenças de temperaturas entre a parede e as envoltórias e aí se notam alguns gradientes, principalmente junto à parede na zona do fundo da sala, e que esse gradiente se deve essencialmente à proximidade dos ocupantes às paredes e também da maior proximidade das insuflações (baixo pé-direito).

Tendo em conta as condições de simetria da sala, esperava-se igualmente simetria nas ilustrações apresentadas segundo os planos de frente e úteis para os parâmetros objectos de estudo deste trabalho. Nota-se, contudo, assimetria nas ilustrações segundo esses planos, tanto em termos de temperaturas como de velocidades. Em qualquer dos casos estudados neste trabalho e, já referido anteriormente, verificou-se velocidades muito baixas na zona dianteira da sala, nomeadamente em exposições ilustrativas segundo os planos de simetria, tendo sido esperados aumentos devido à proximidade dos *outlets*. Não havendo sido verificadas as condições de simetria esperadas e os aumentos das velocidades na superfície mais baixa da sala, pode apreciar-se que os critérios de paragem escolhidos para a resolução segundo os modelos utilizados no trabalho não se revelaram de valor suficiente para que o sistema retornasse os resultados esperados.

Concluindo este trabalho, pode afirmar-se que eram esperados resultados um pouco diferentes dos obtidos – gradientes de temperatura um pouco maiores, tendo em conta o volume da sala estudada, e valores de velocidades superiores aos obtidos, na ordem dos 0,2m/s ao nível da cabeça dos ocupantes.

A falta de conhecimentos práticos no que toca à resolução de casos de mecânica dos fluidos por métodos computacionais foi certamente um aspecto que induziu um grau de dificuldade ao trabalho. O *Ansys Fluent*, ainda que um *software* muito técnico e pouco intuitivo, revelou-se uma ferramenta extremamente útil, porém morosa, na resolução destes casos e um ponto de partida de qualquer projecto que envolva esta área.

7. Bibliografia

- [1] ANSYS *Fluent 13.0 Theory Guide*, 2010
- [2] Wilcox, D. C. – *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc. La Canada, California. 1998
- [3] Launder, B. E., Spalding, D. B. - *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England. 1972
- [4] Patankar, V.S. – *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Company, 1980
- [5] Menter, F. R.. - *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, AIAA Journal, 32(8). 1598–1605. August 1994
- [6] 2009 ASHRAE *Handbook – Fundamentals*, Chapter 9 - Thermal Comfort
- [7] ASHRAE *Standard 55-81*, 1981
- [8] McQuiston; Parker – *Heating, Ventilation and Air Conditioning – Analysis and Design*. Second Edition
- [9] Stocker; Jones – *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw-Hill International Editions, Second Edition
- [10] Koehler, Kenneth R. - *Body Temperature Regulation*. University of Cincinnati Raymond Walters College.
- [11] Ashgriz, Nasser; Mostaghimi, Javad - *An Introduction to Computational Fluid Dynamics; Fluid Flow Handbook*, Chapter 20
- [12] *Decreto-lei nº 79/2006* – Diário da República, I Série-A, 4 de Abril de 2006
- [13] Munson, B.R. *et al.* - *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Wiley, 4th Edition

8. Anexos

Anexo A - Plantas e cortes da sala

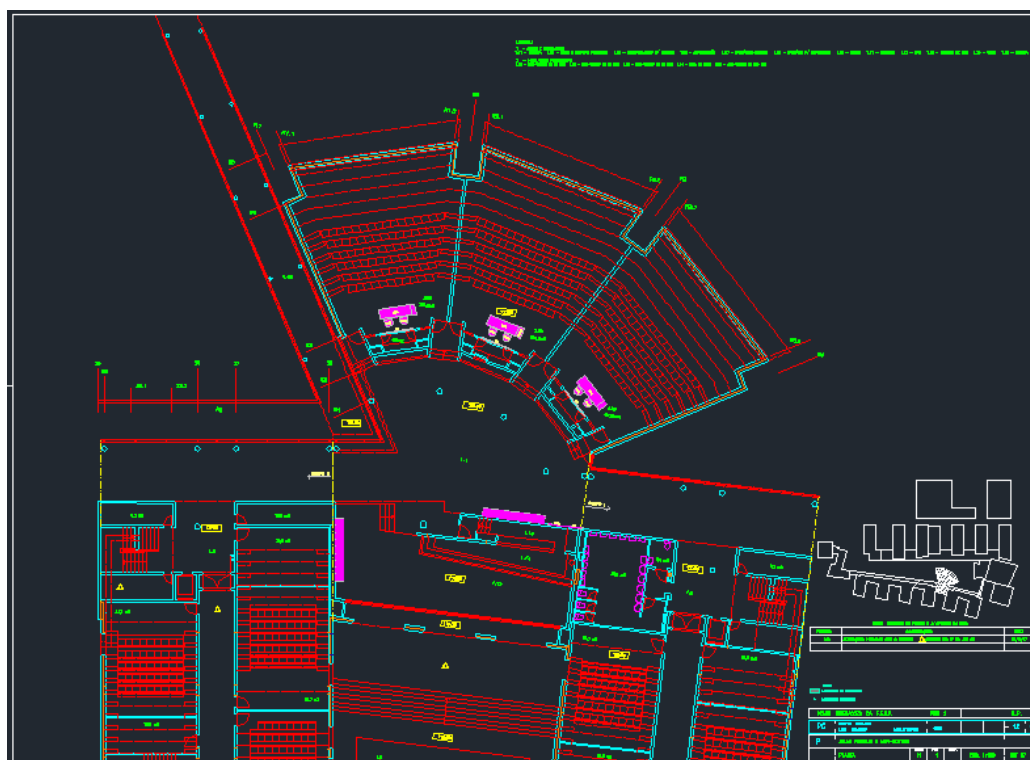


Figura 66 – Planta dos Anfiteatros.

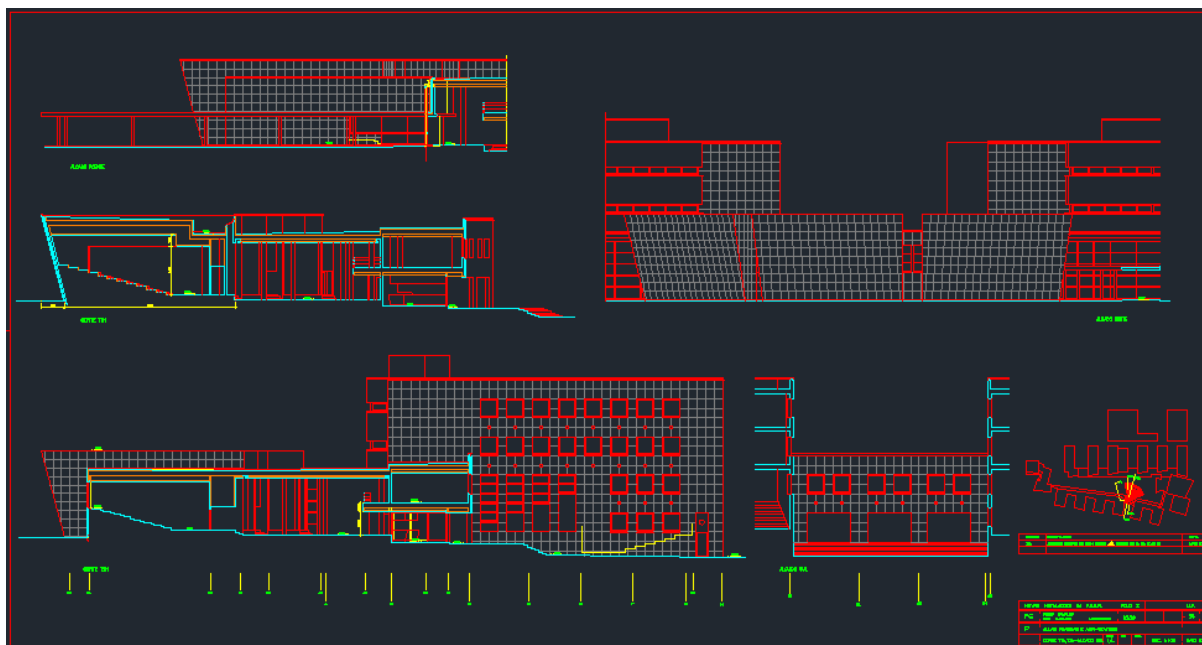


Figura 67 – Vistas em corte dos Anfiteatros.

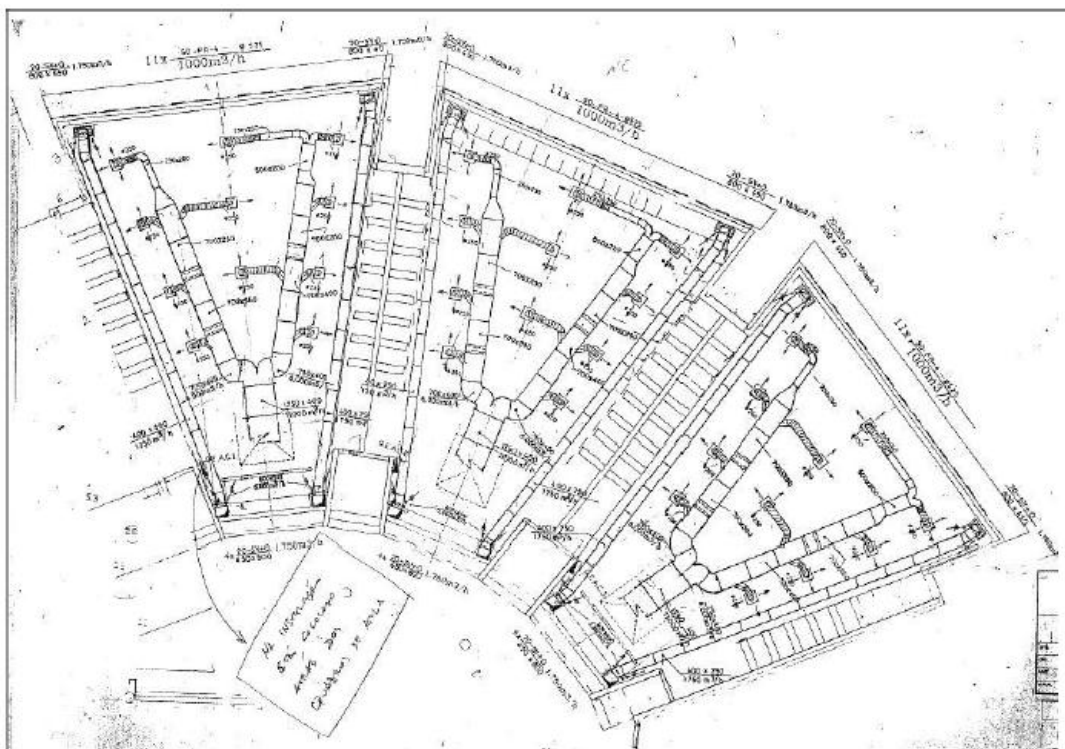


Figura 68 – Planta de AVAC dos Anfiteatros.



Figura 69 – Conduções de AVAC no telhado da sala.

Anexo B – Gráficos de convergências

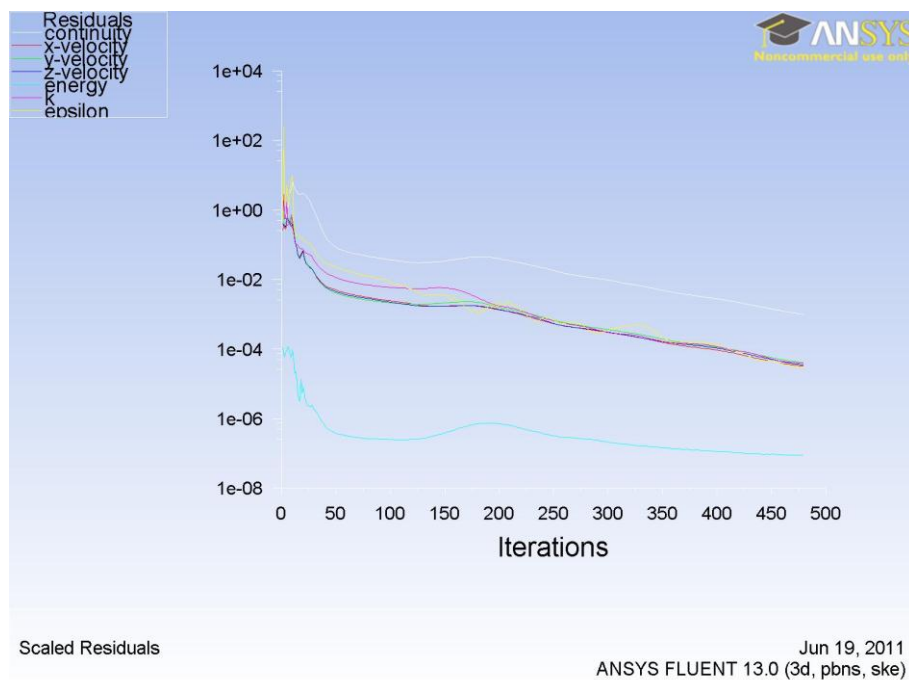


Figura 70 – Resíduos para situação de Verão e sala lotada segundo o modelo *Standard k-ε*.

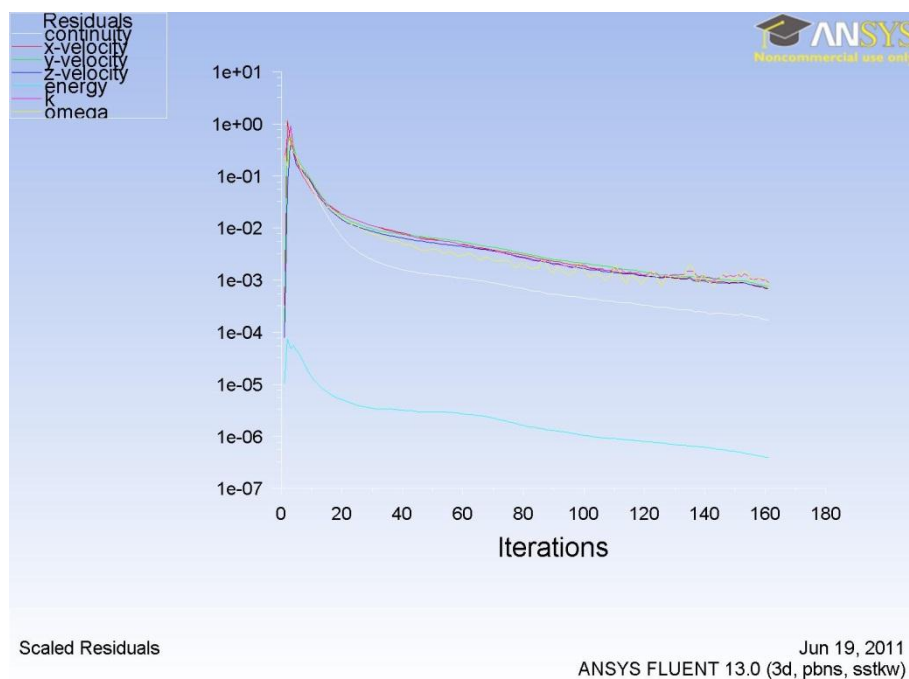


Figura 71 - Resíduos para situação de Verão e sala lotada segundo o modelo *SST k-ω*.

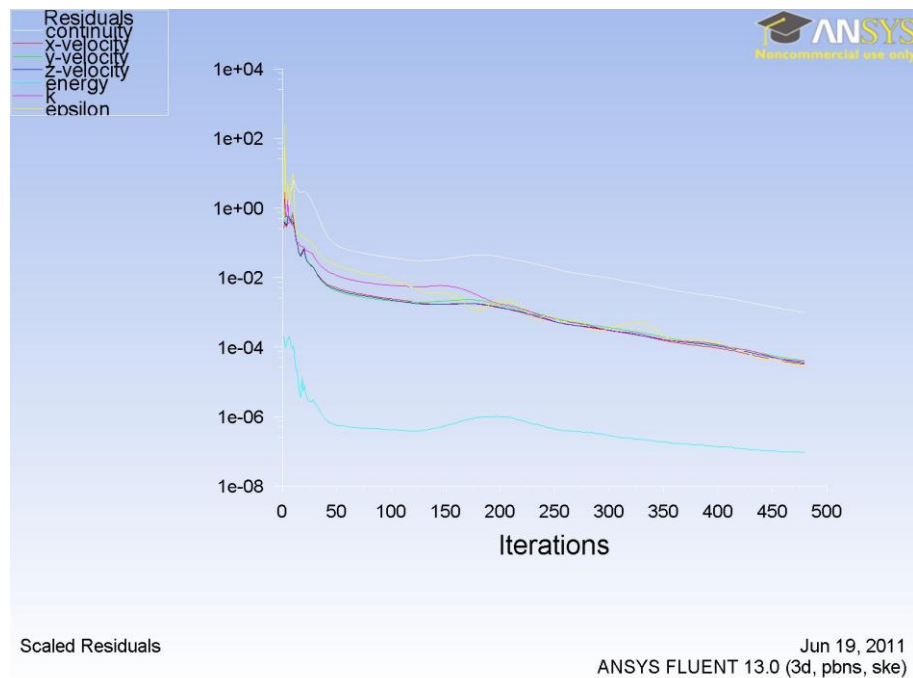


Figura 72 - Resíduos para situação de Inverno e sala lotada segundo o modelo *Standard k-ε*.

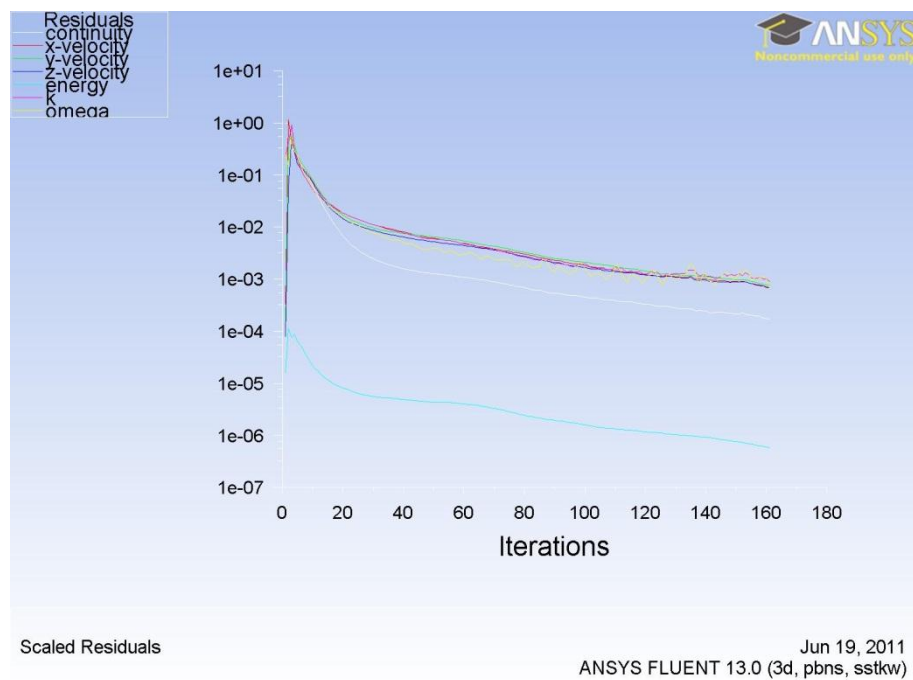


Figura 73 - Resíduos para situação de Inverno e sala lotada segundo o modelo *SST k-ω*.

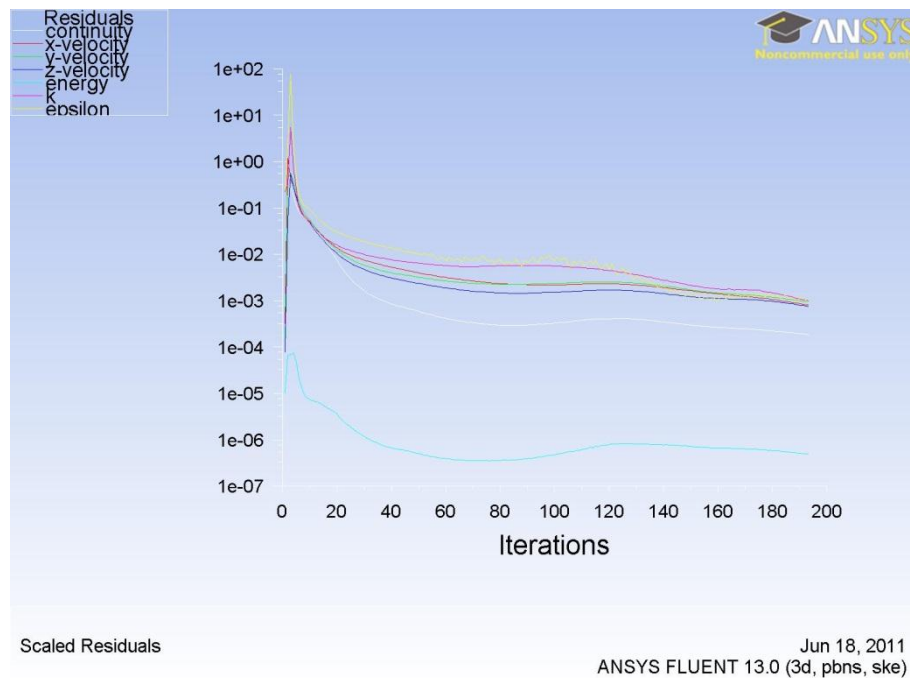


Figura 74 - Resíduos para situação de Verão e sala semi-lotada segundo o modelo *Standard k- ϵ*

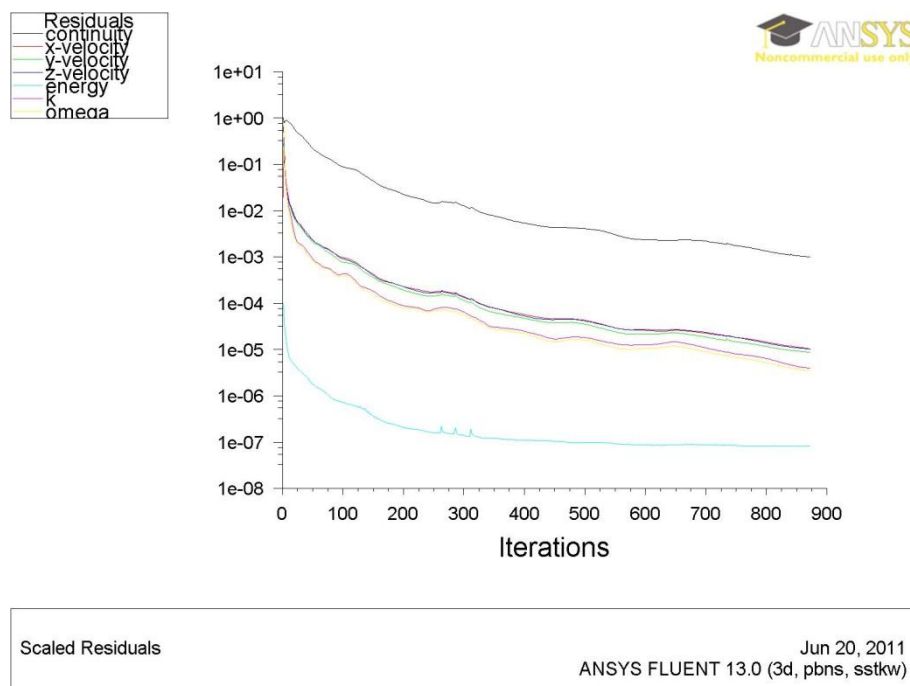


Figura 75 - Resíduos para situação de Verão e sala semi-lotada segundo o modelo *SST k- ω*

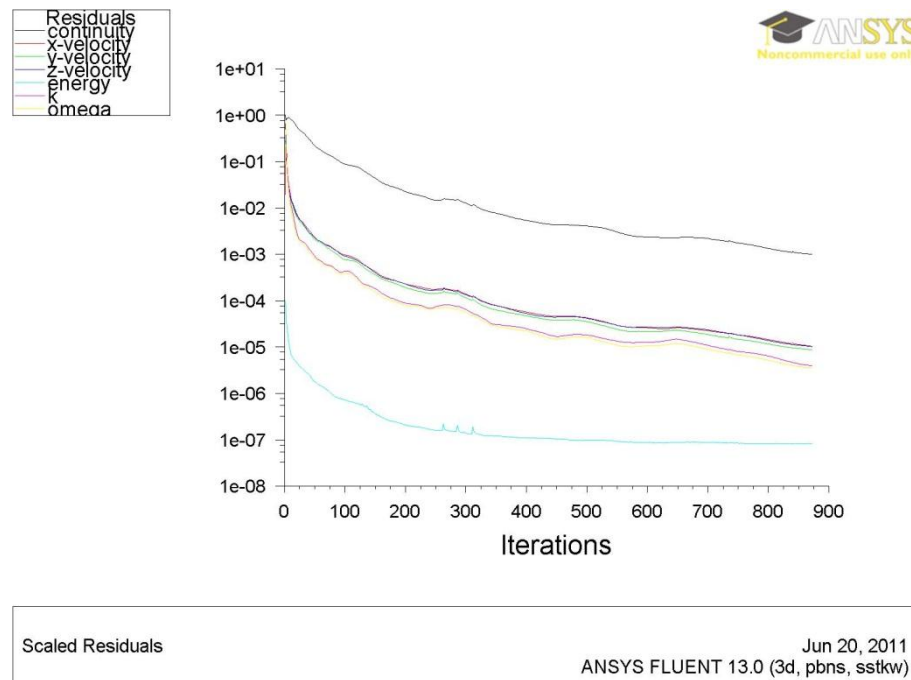


Figura 76 - Resíduos para situação de Inverno e sala semi-lotada segundo o modelo *Standard k-ε*.

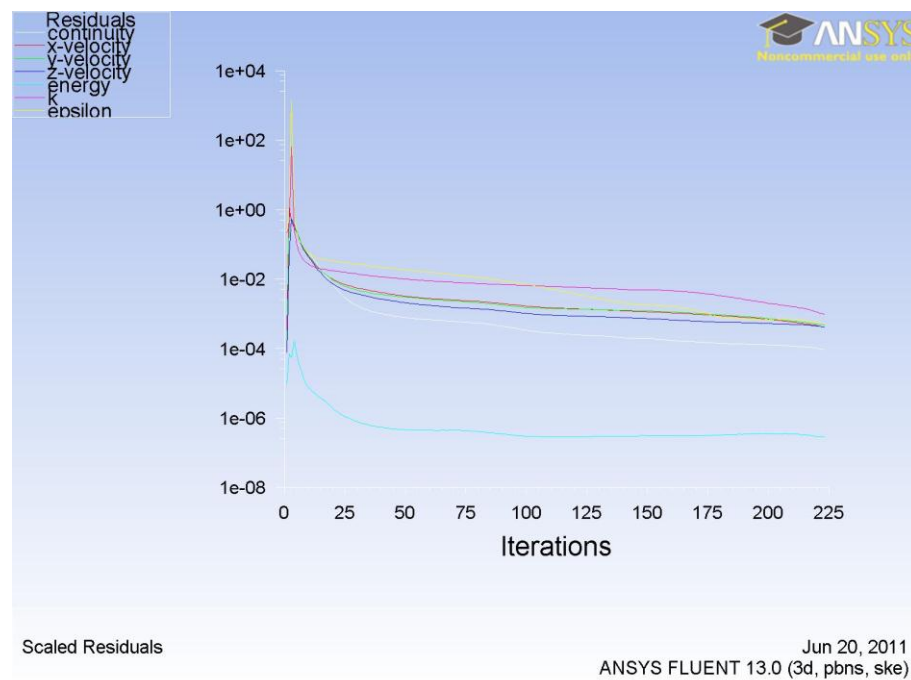


Figura 77 - Resíduos para situação de Inverno e sala semi-lotada segundo o modelo *SST k-ω*.

Anexo C - Resultados gráficos segundo o modelo $SST\ k-\omega$

Situação de Verão, Sala Lotada

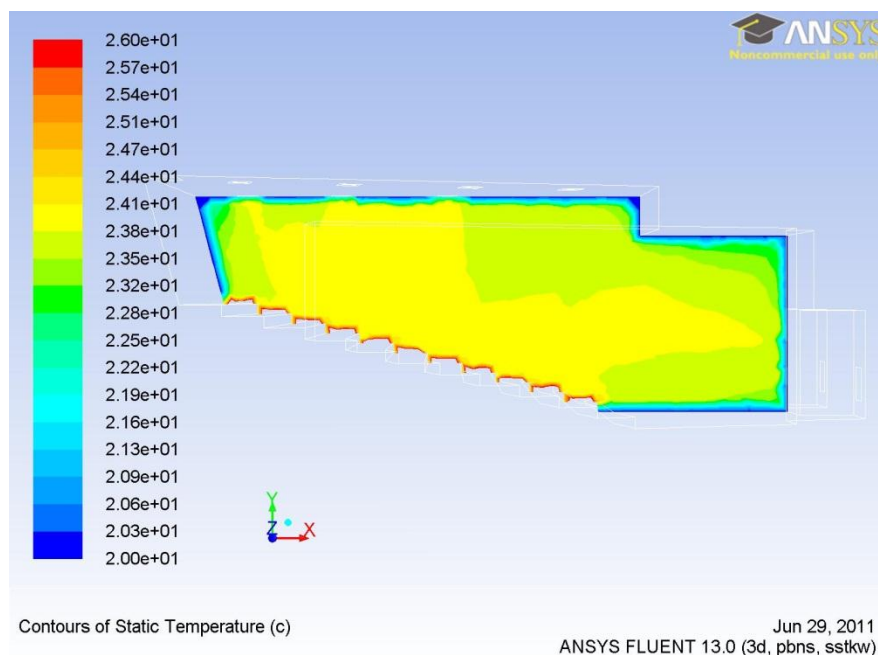


Figura 78 – Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo $SST\ k-\omega$.

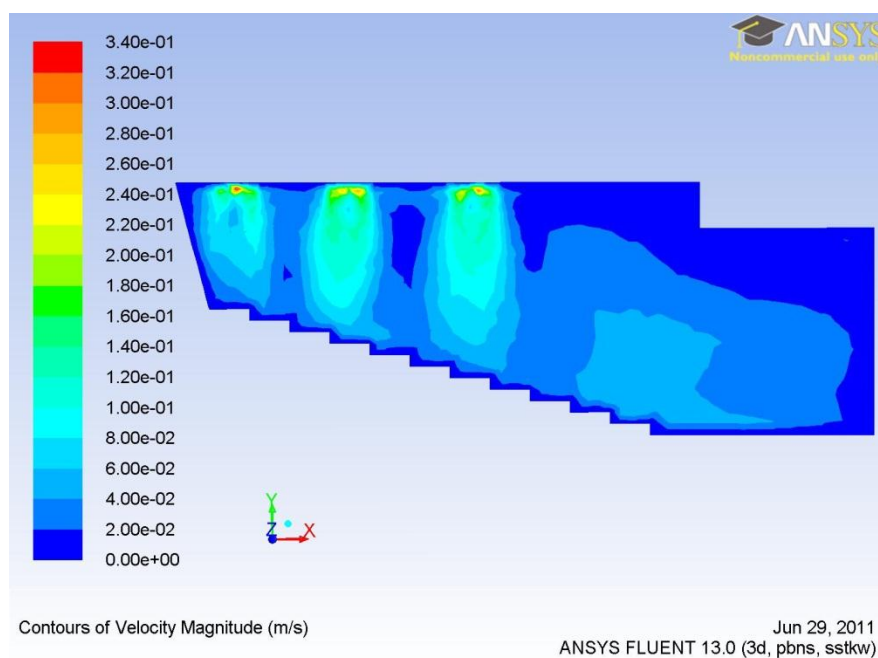


Figura 79 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo $SST\ k-\omega$.

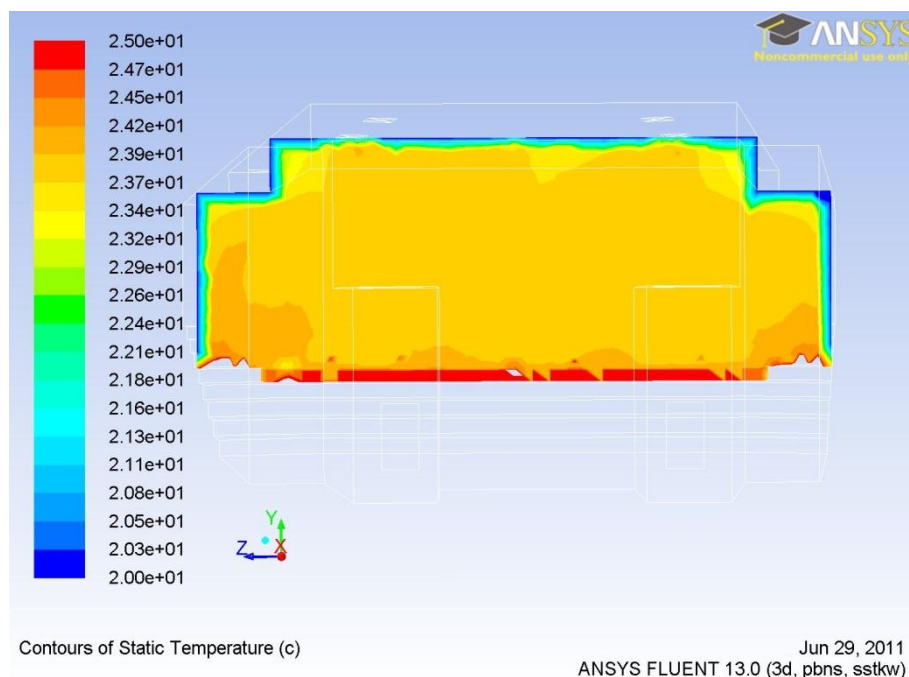


Figura 80 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

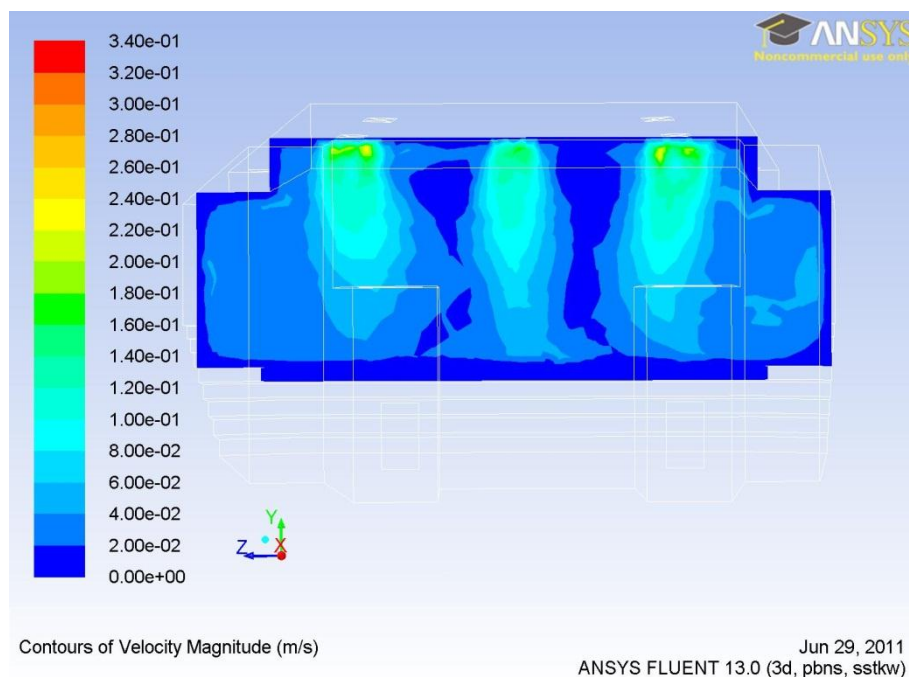


Figura 81 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

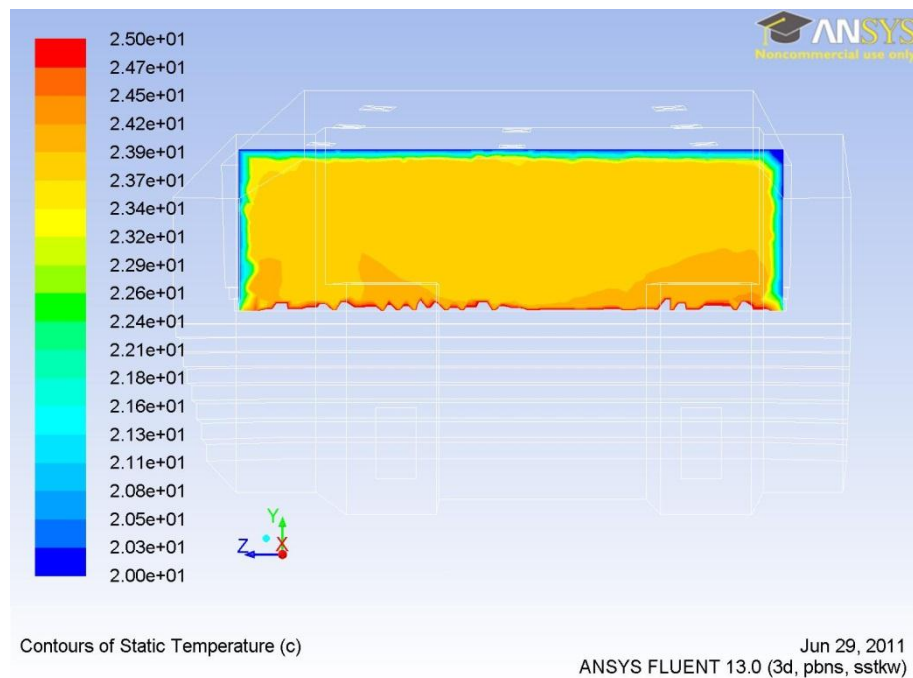


Figura 82 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

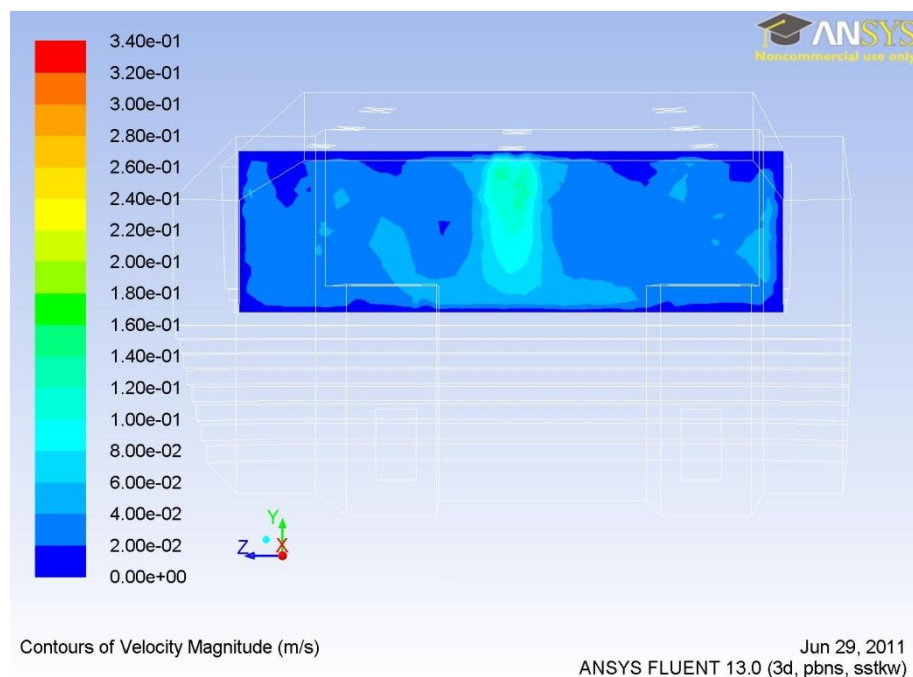


Figura 83 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

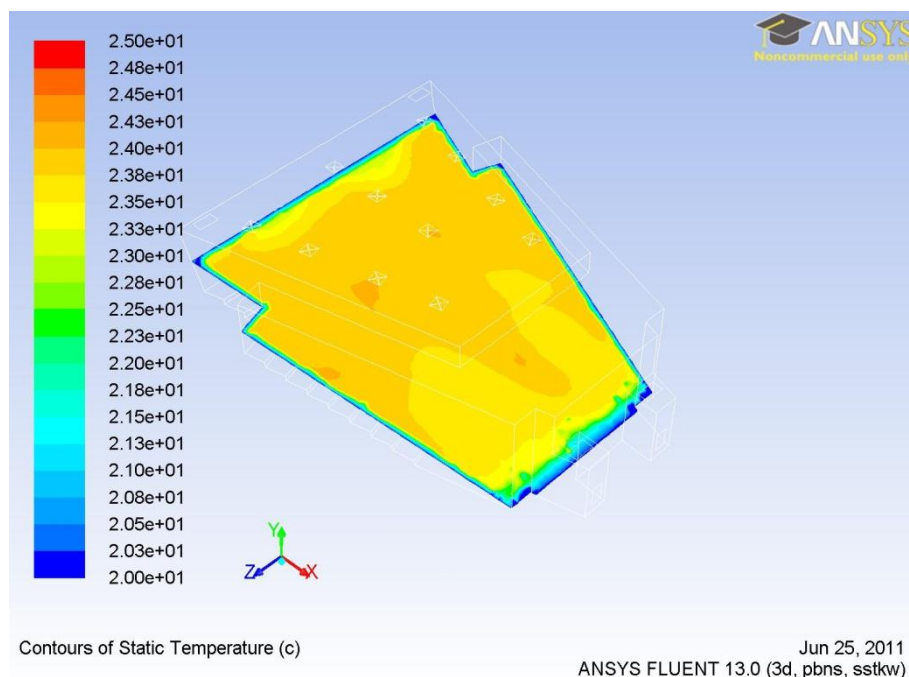


Figura 84 – Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

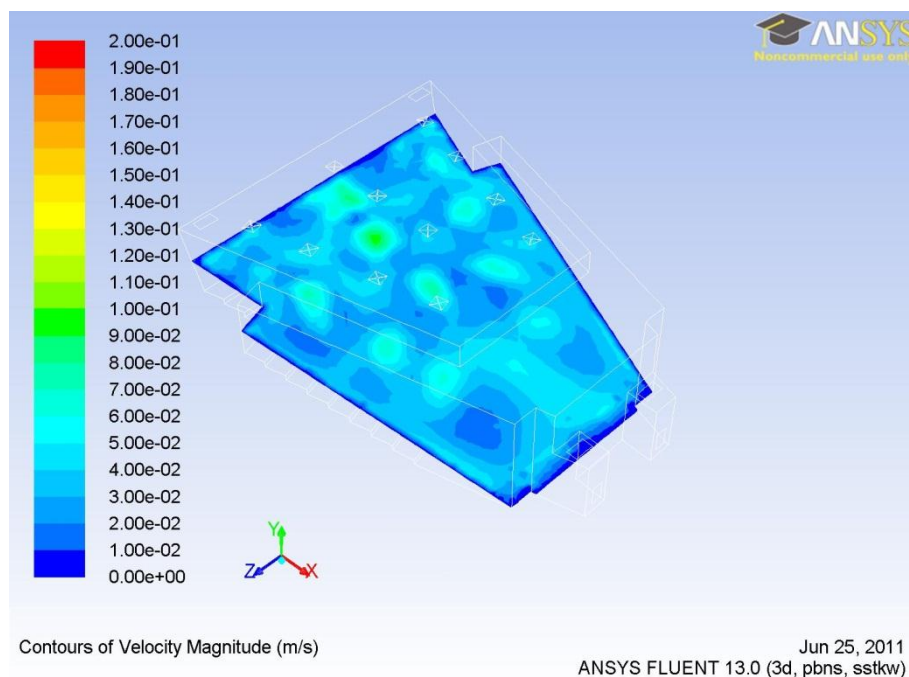


Figura 85 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Verão e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

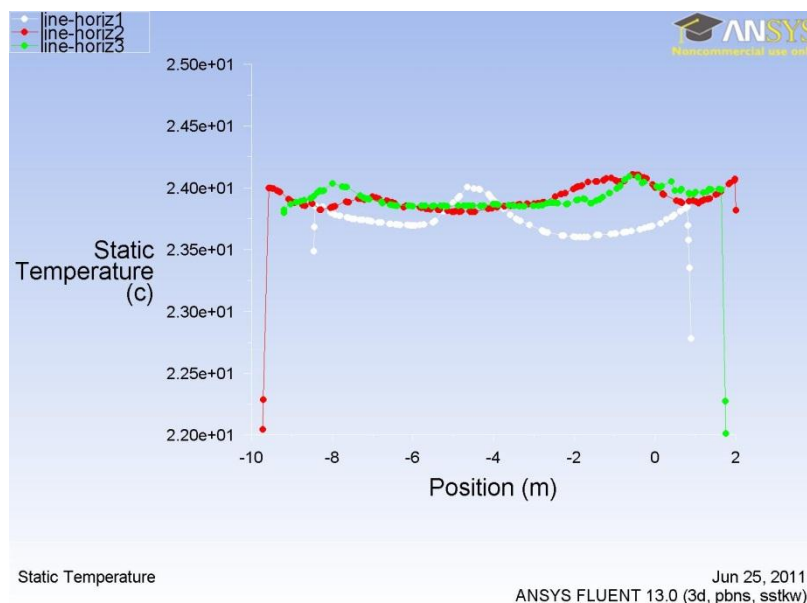


Figura 86 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

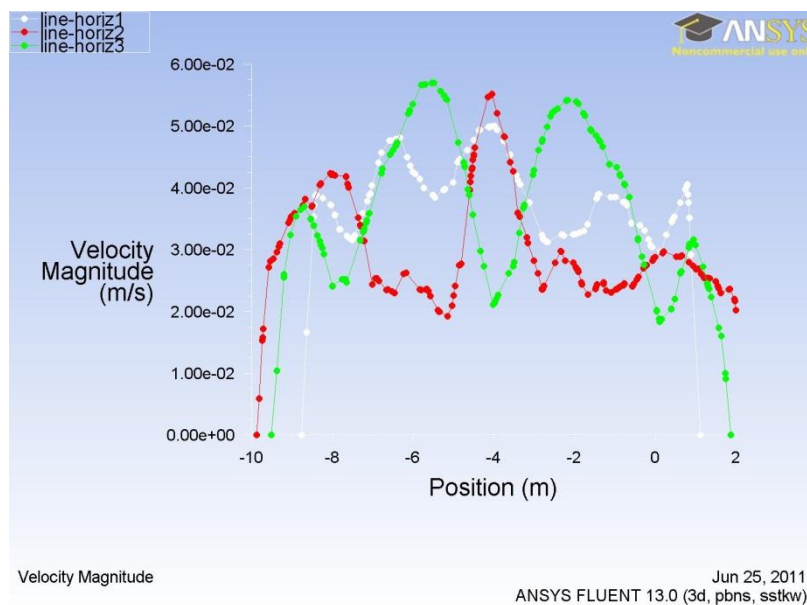


Figura 87 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

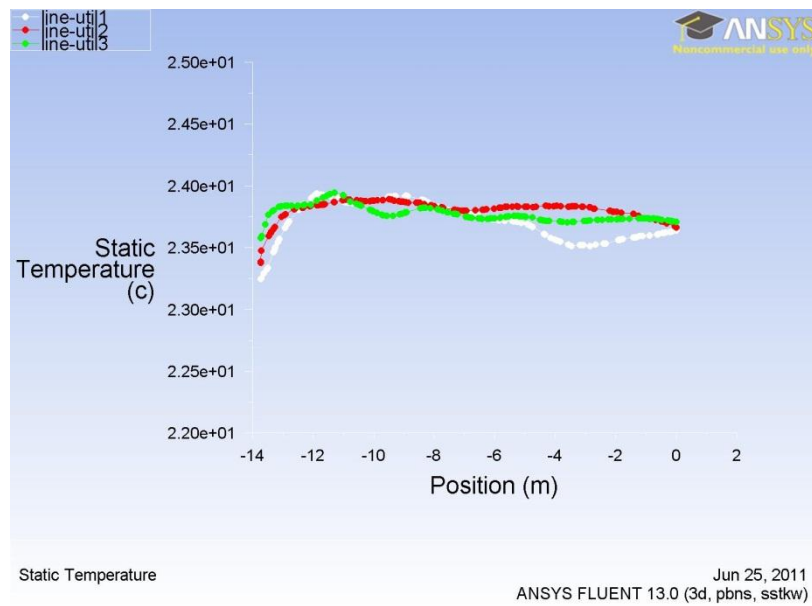


Figura 88 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo $SST k-\omega$.

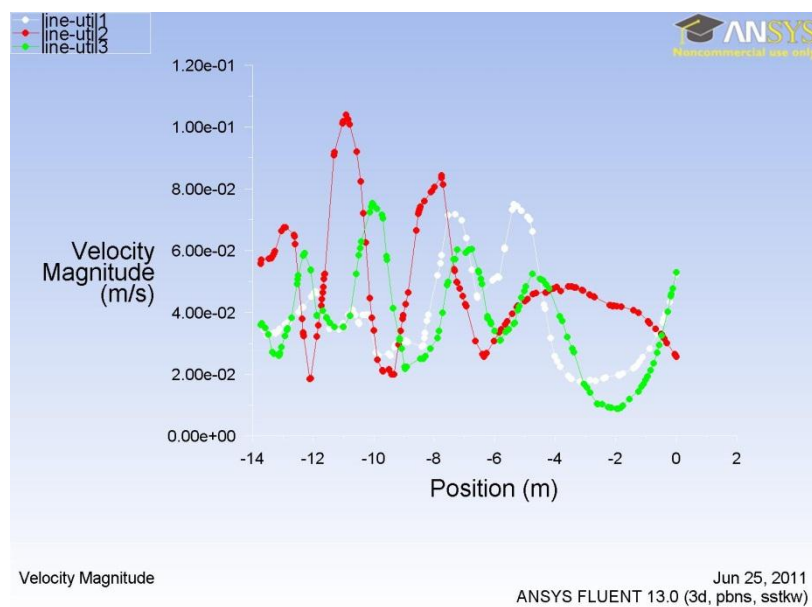


Figura 89 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala lotada no Verão com resolução pelo modelo $SST k-\omega$.

Situação de Inverno, Sala Lotada

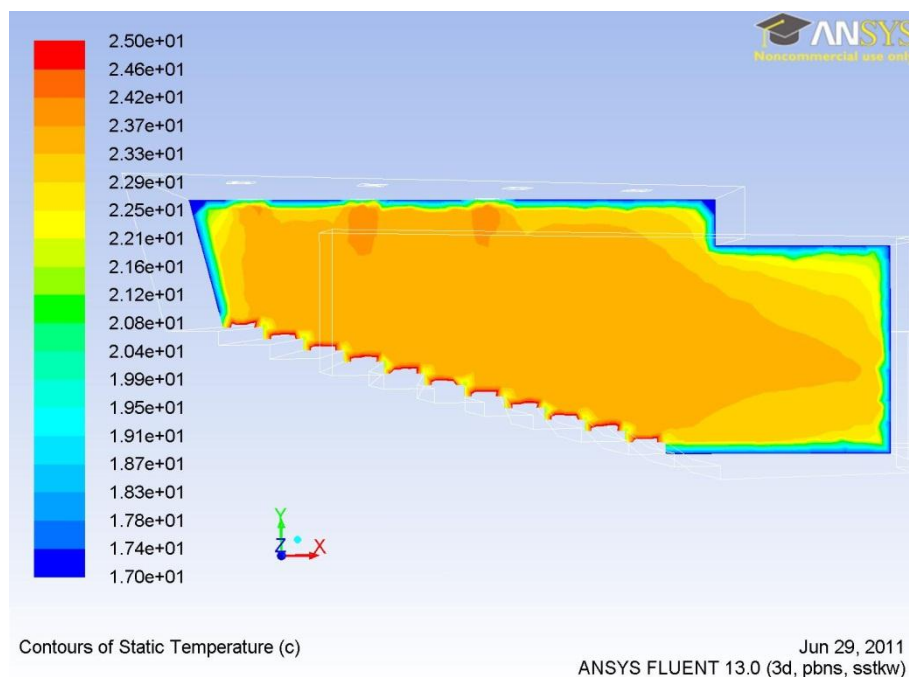


Figura 90 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

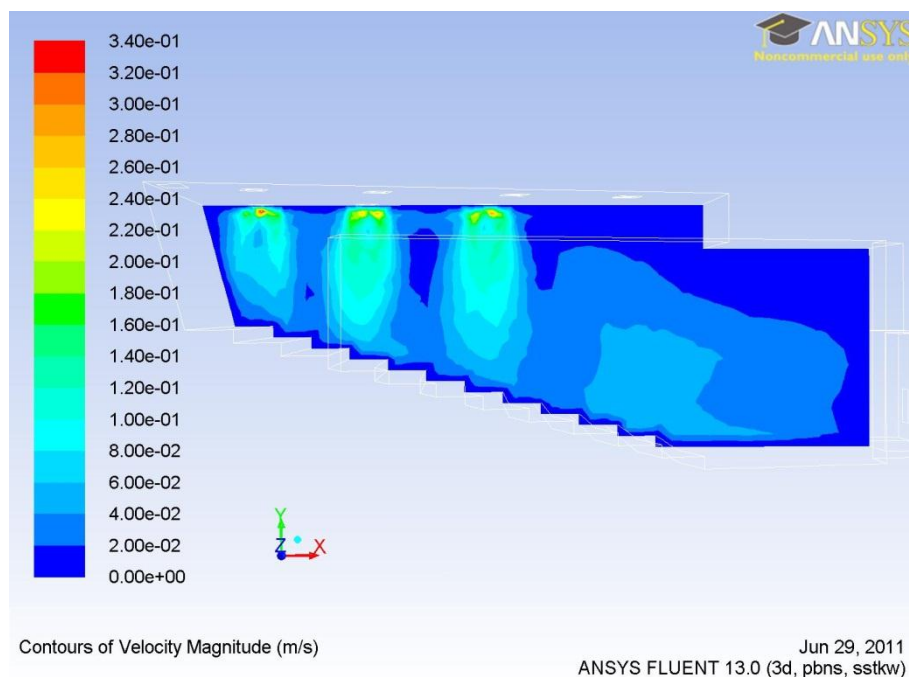


Figura 91 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

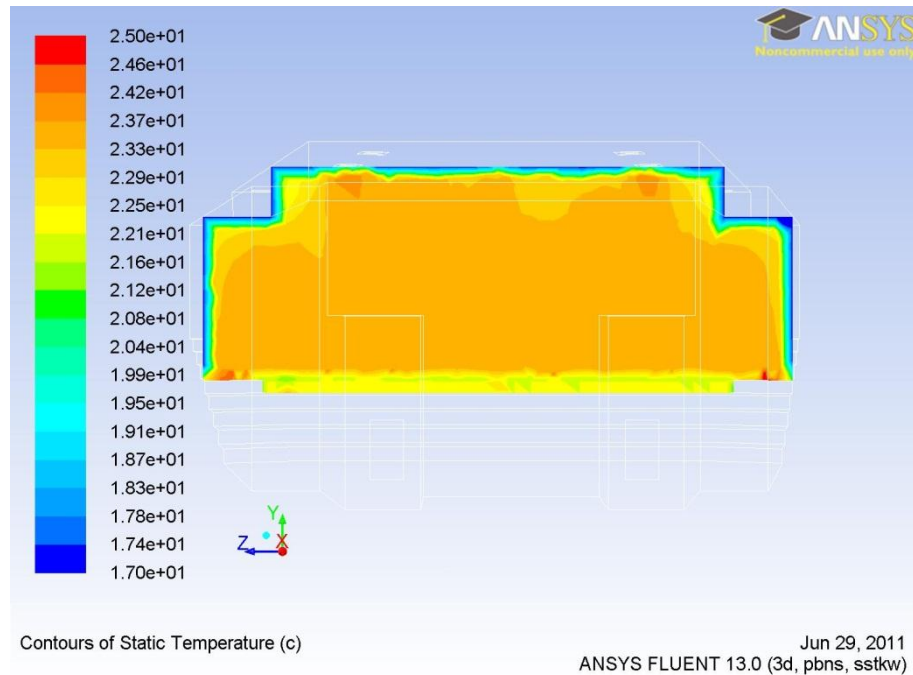


Figura 92 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

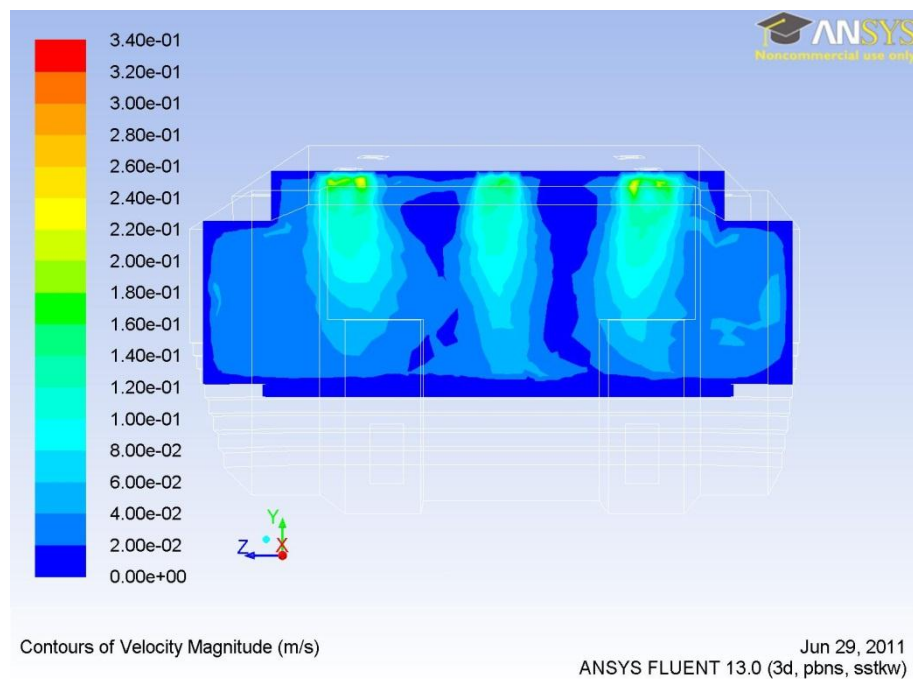


Figura 93 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

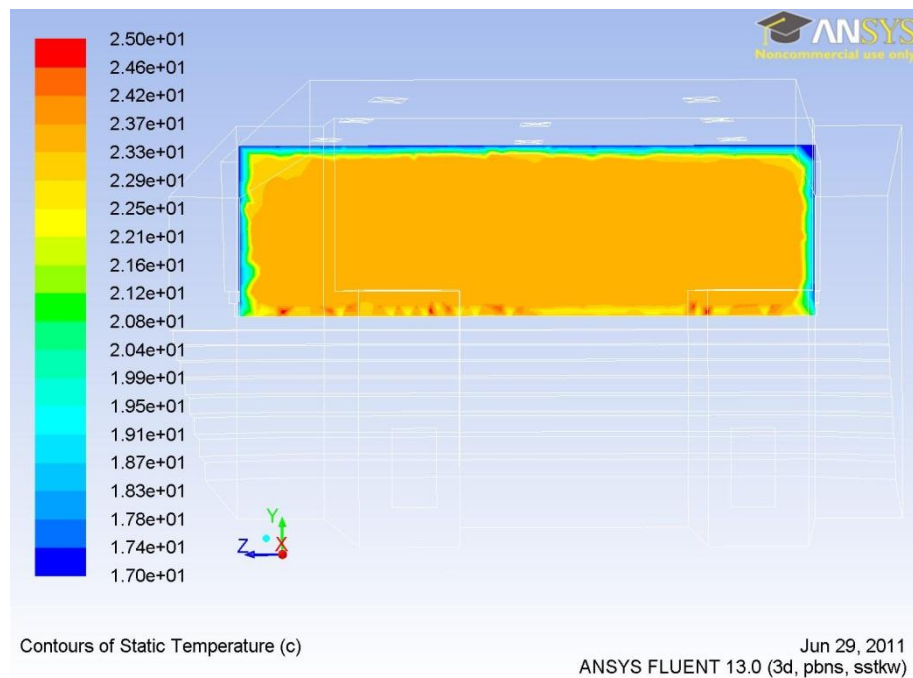


Figura 94 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo $SST k-\omega$.

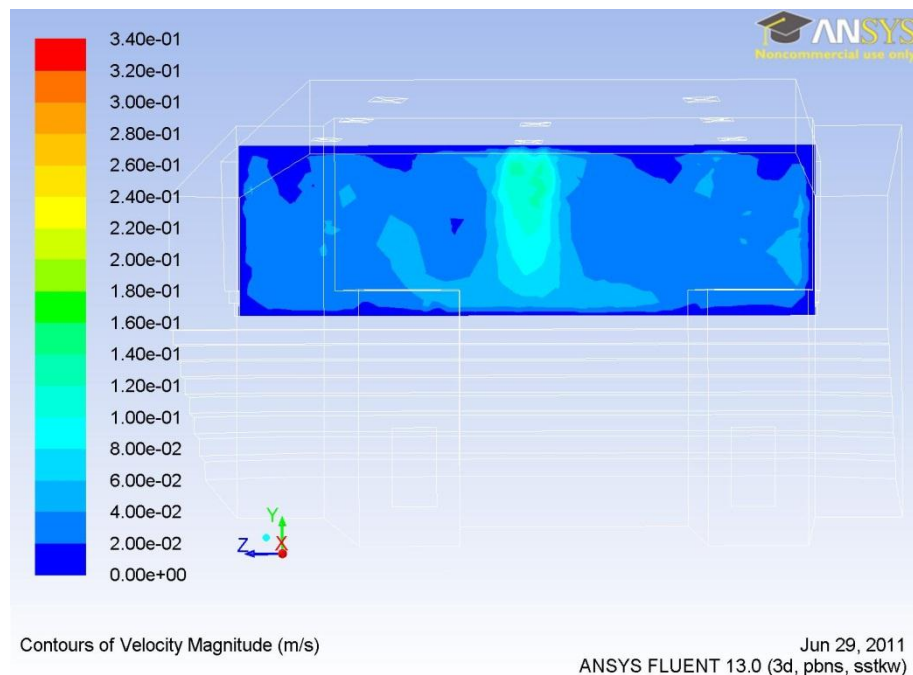


Figura 95 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo $SST k-\omega$.

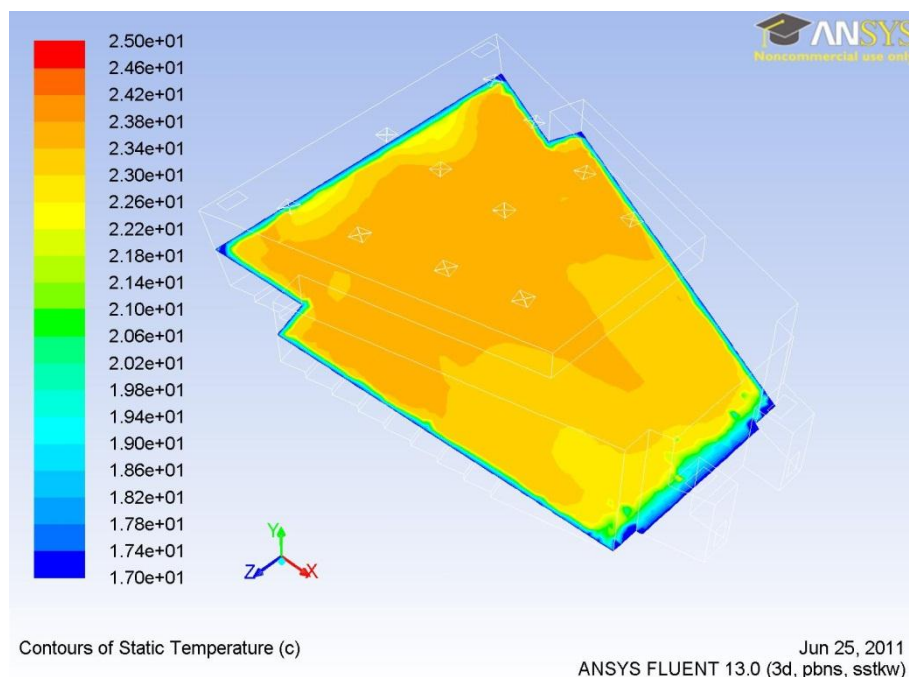


Figura 96 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo $SST k-\omega$.

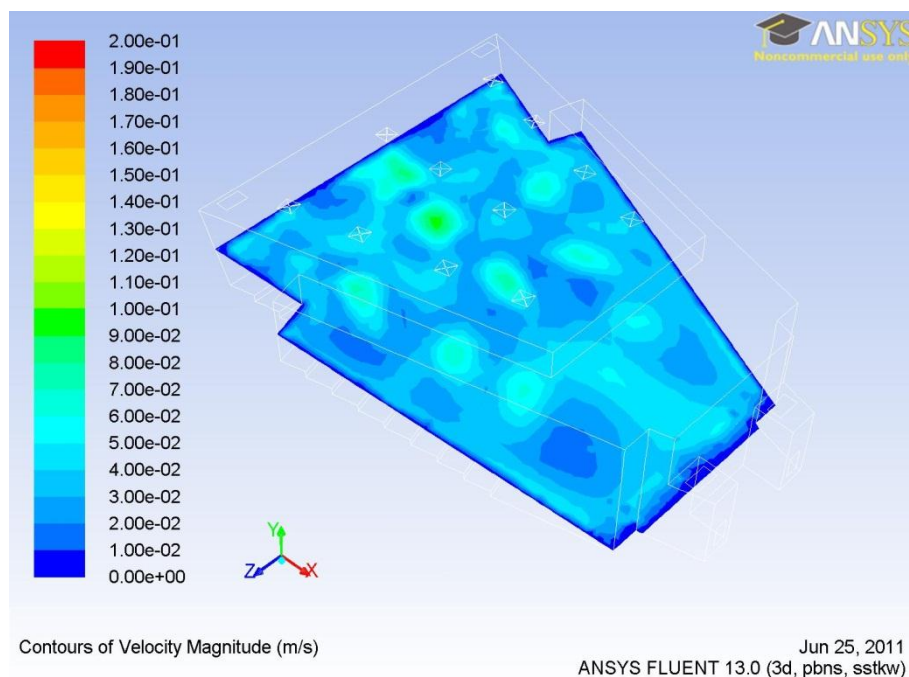


Figura 97 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala lotada por resolução através do modelo $SST k-\omega$.

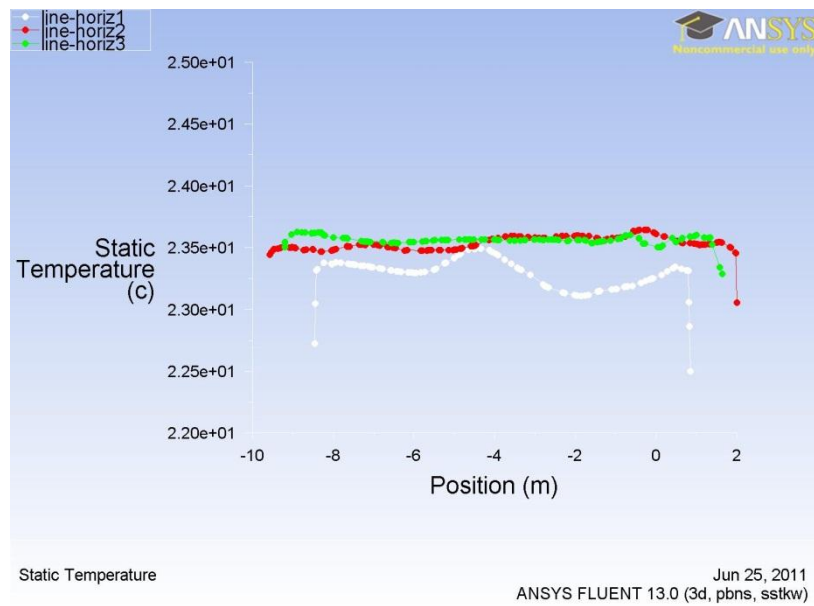


Figura 98 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

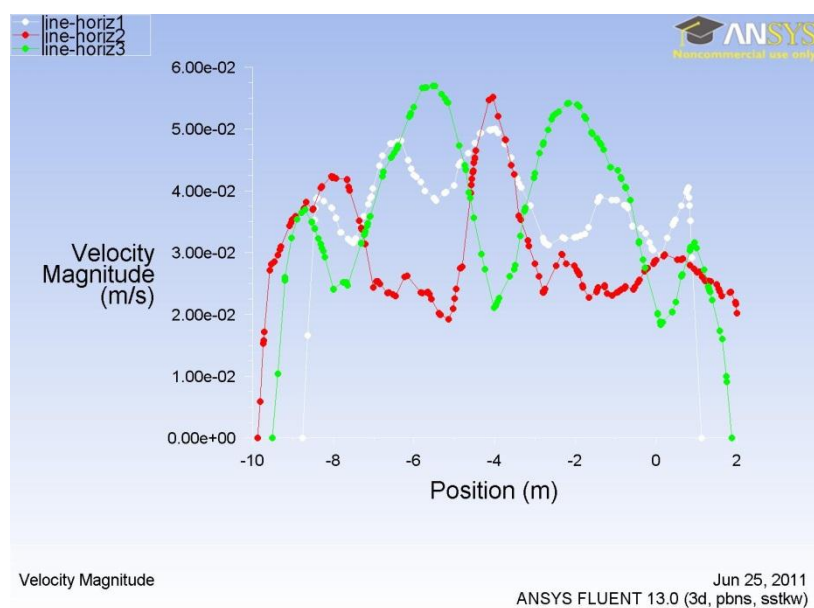


Figura 99 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

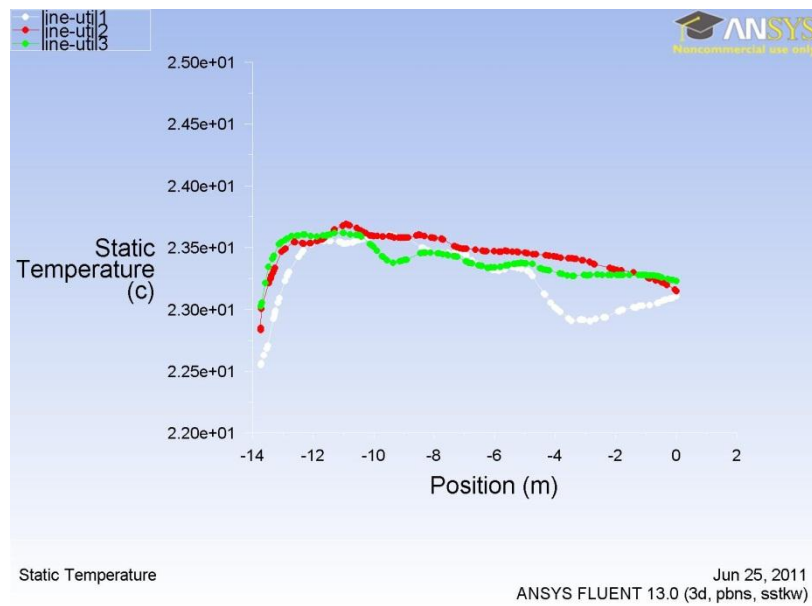


Figura 100 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas segundo o plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

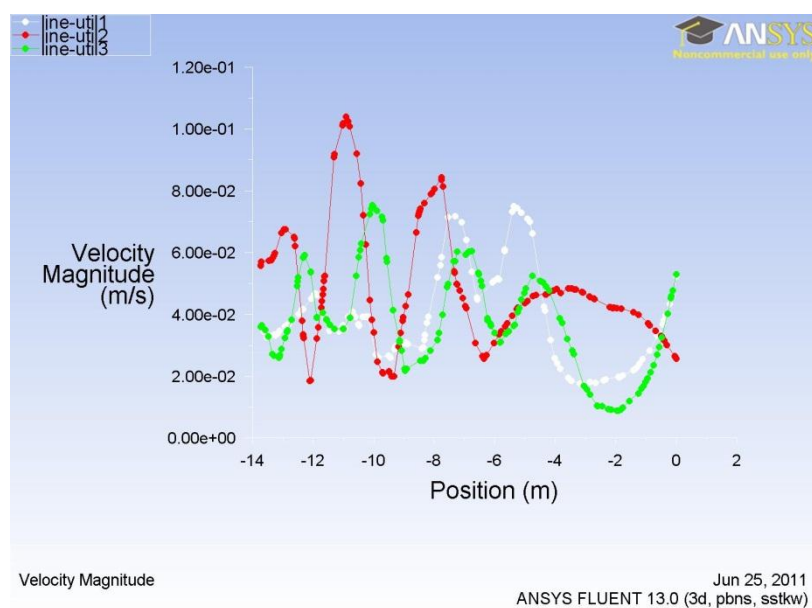


Figura 101 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas segundo o plano útil para uma situação de sala lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

Situação de Verão, Sala Semi-Lotada

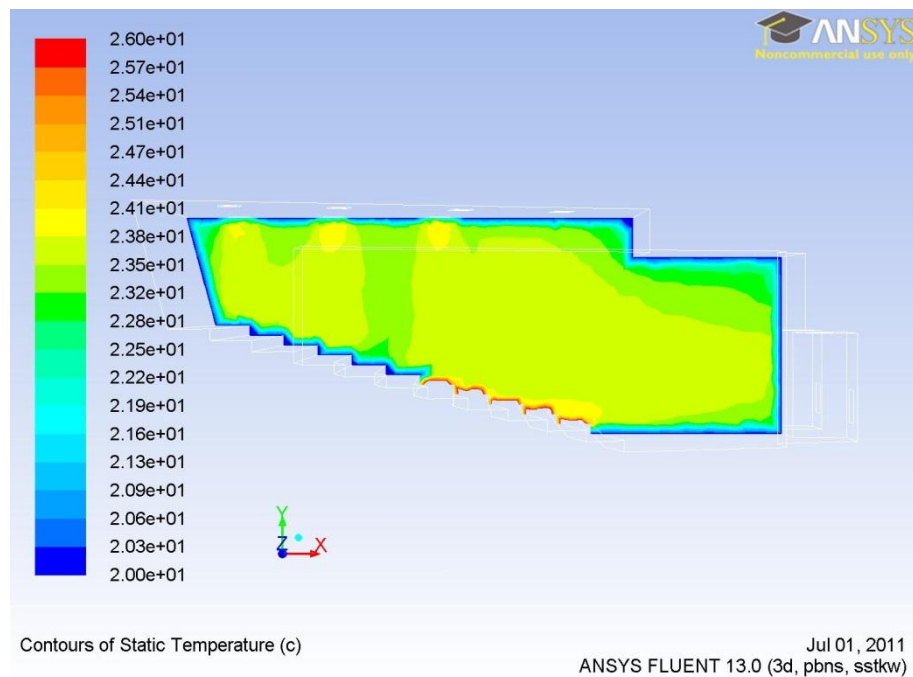


Figura 102 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

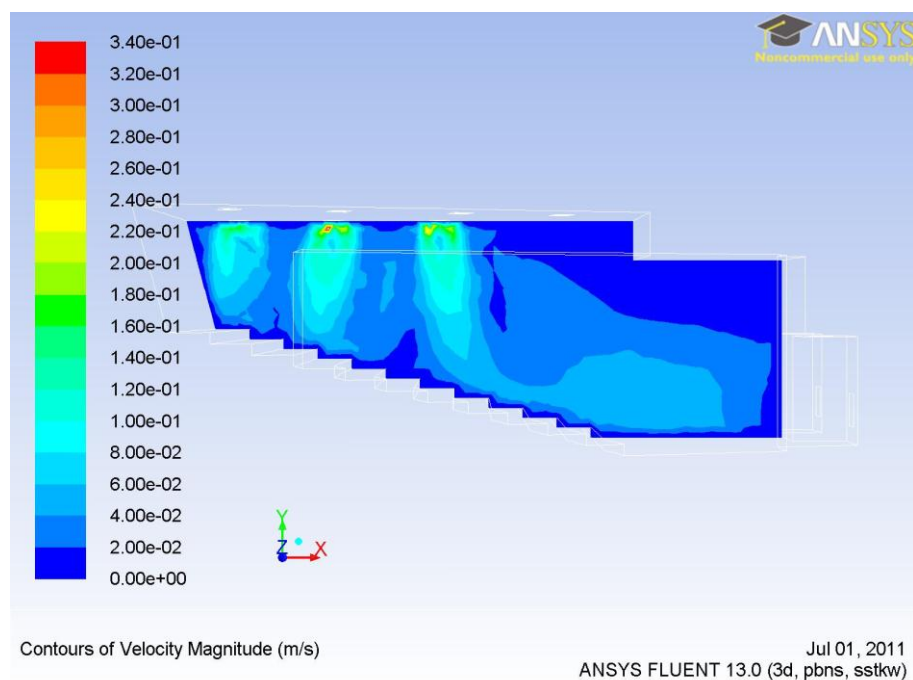


Figura 103 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

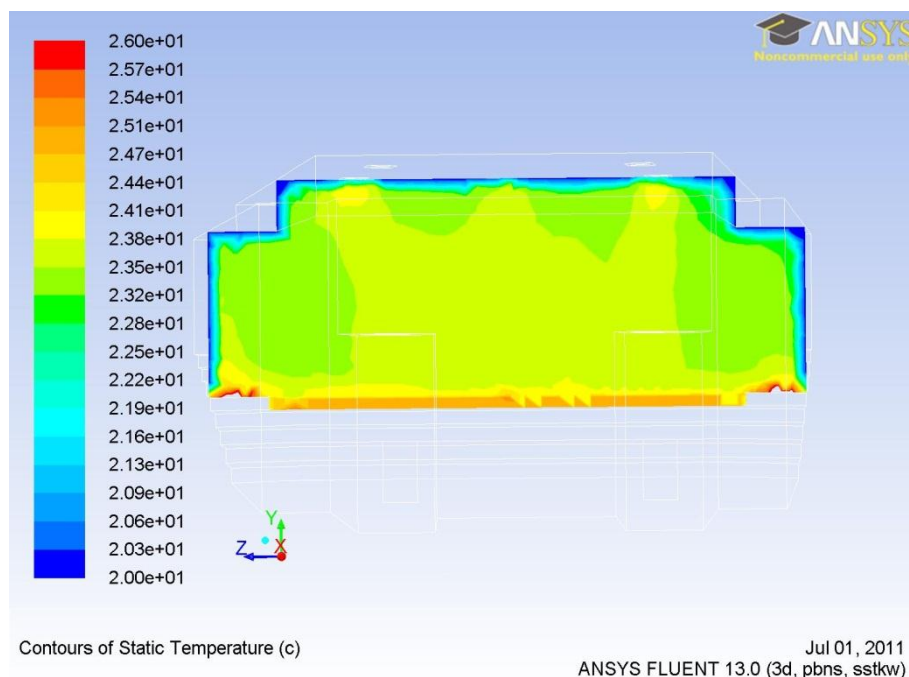


Figura 104 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

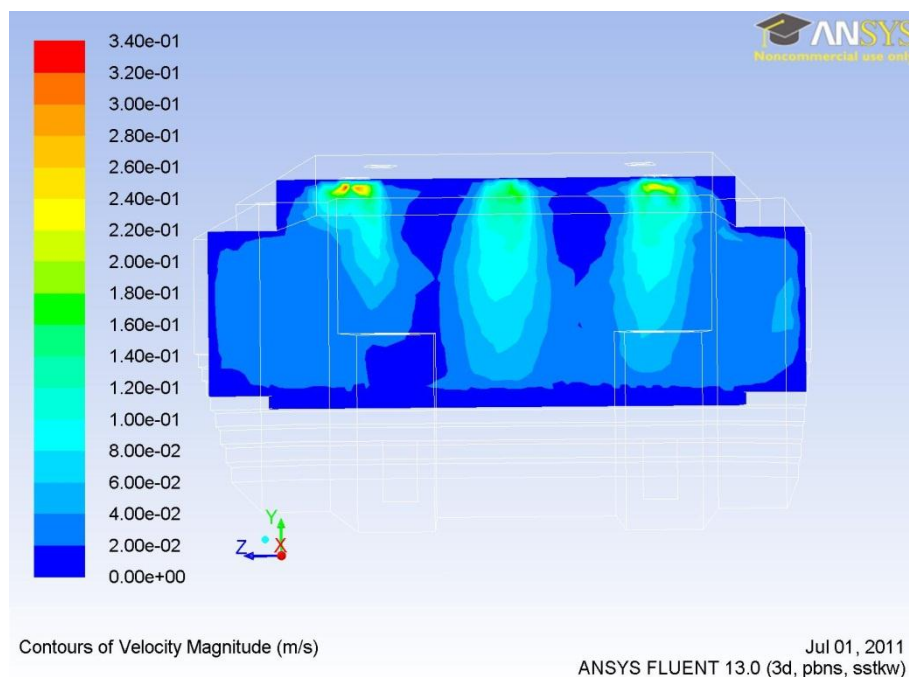


Figura 105 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

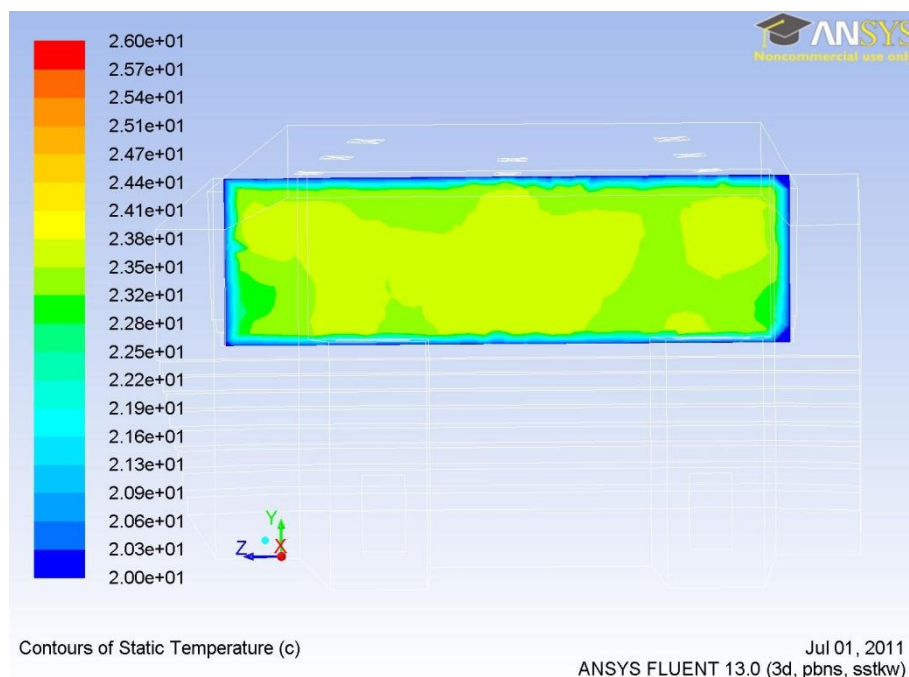


Figura 106 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

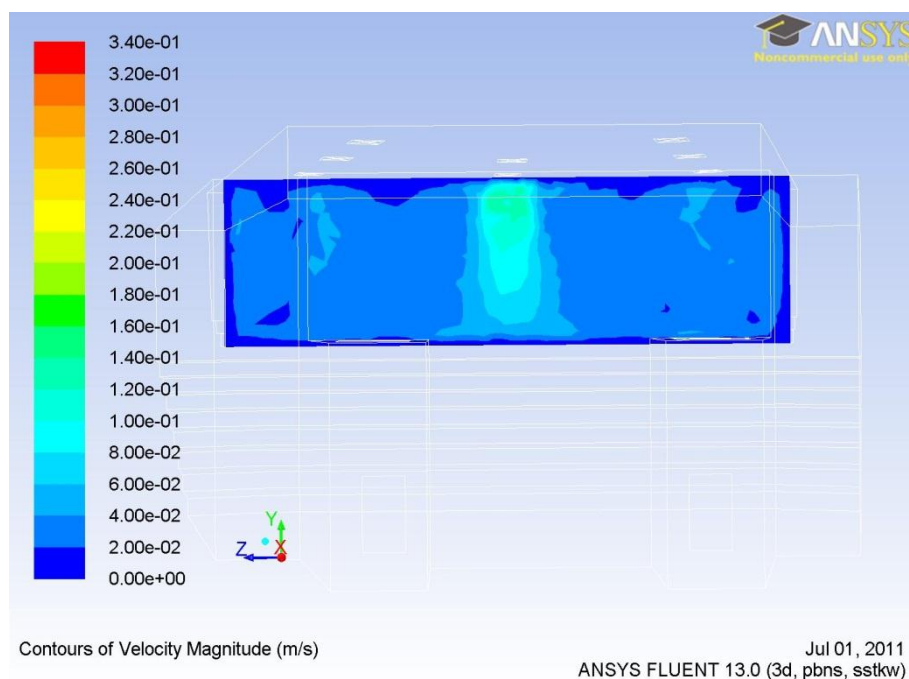


Figura 107 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

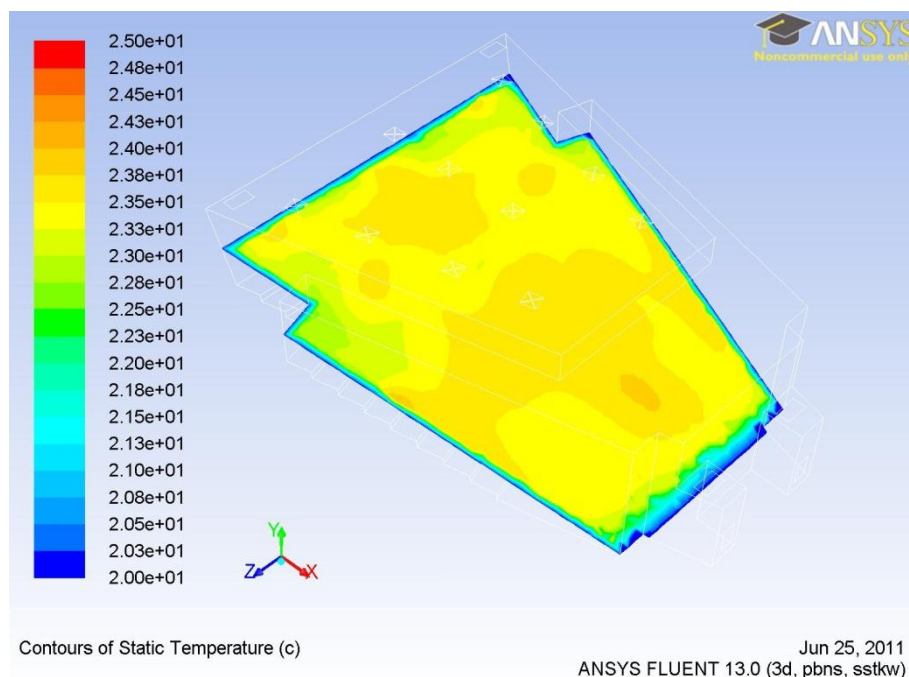


Figura 108 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

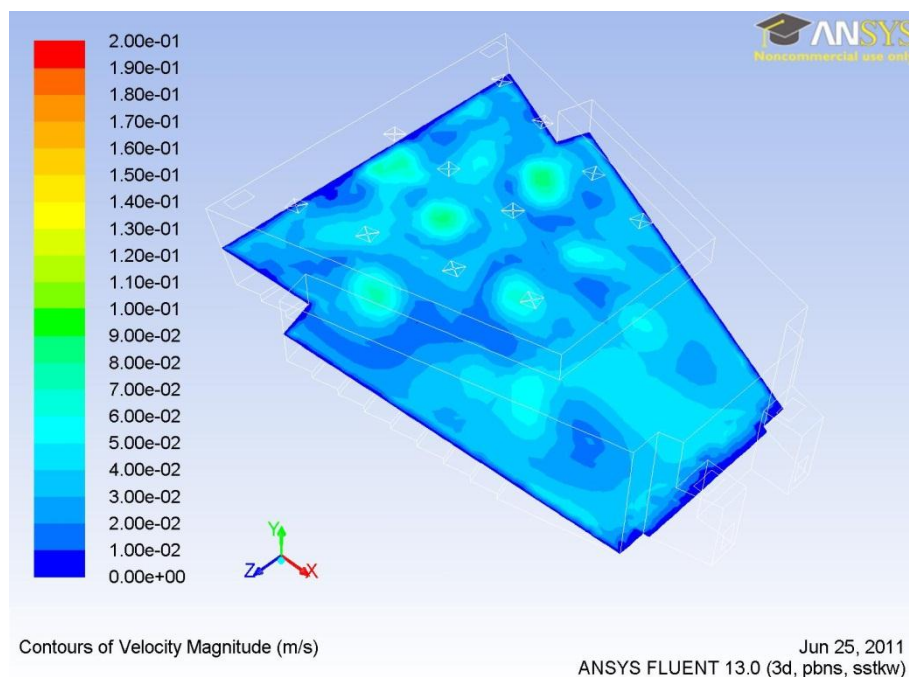


Figura 109 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Verão e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

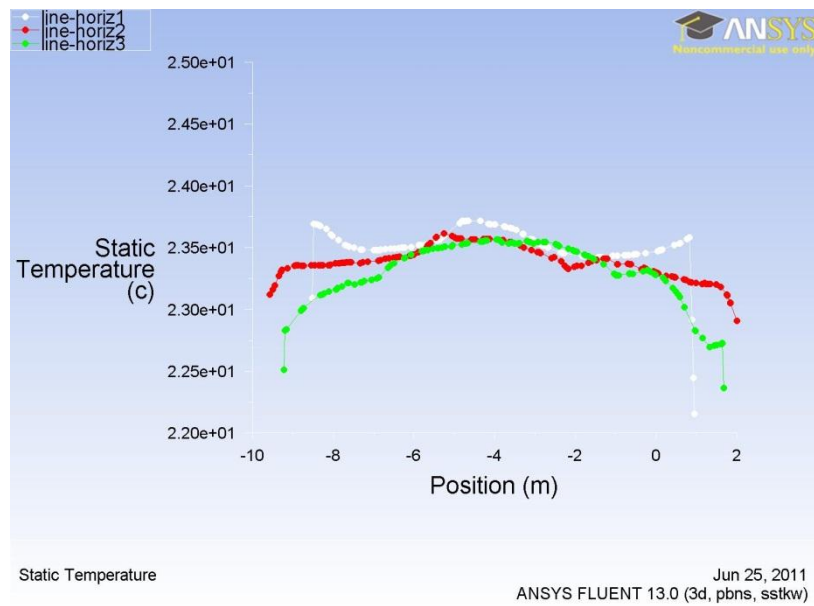


Figura 110 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

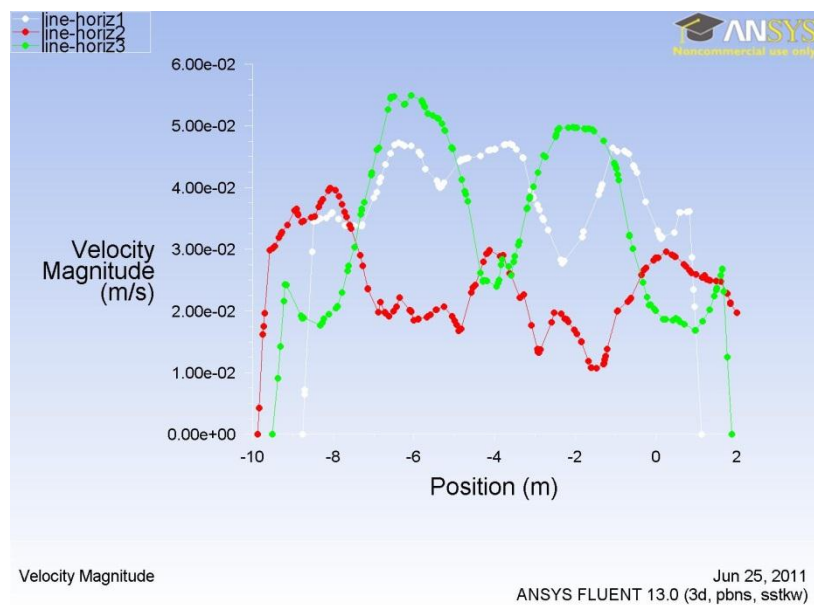


Figura 111 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

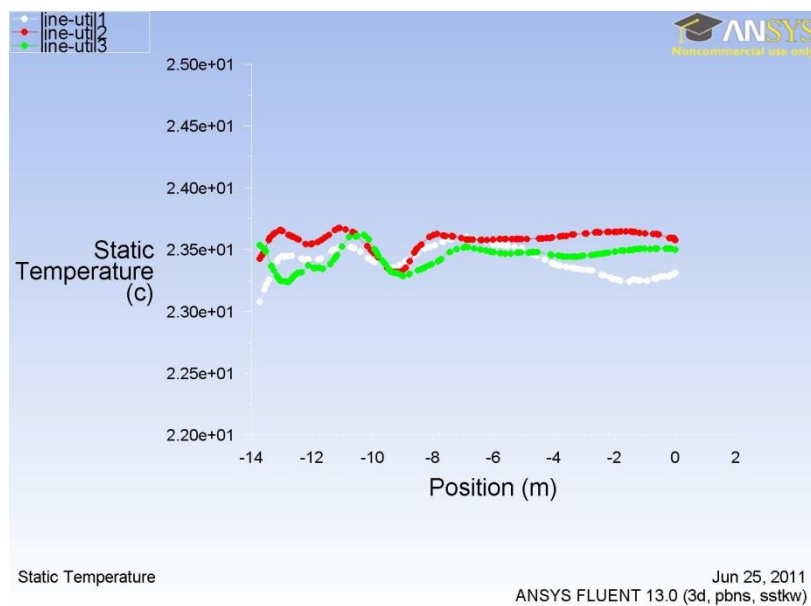


Figura 112 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

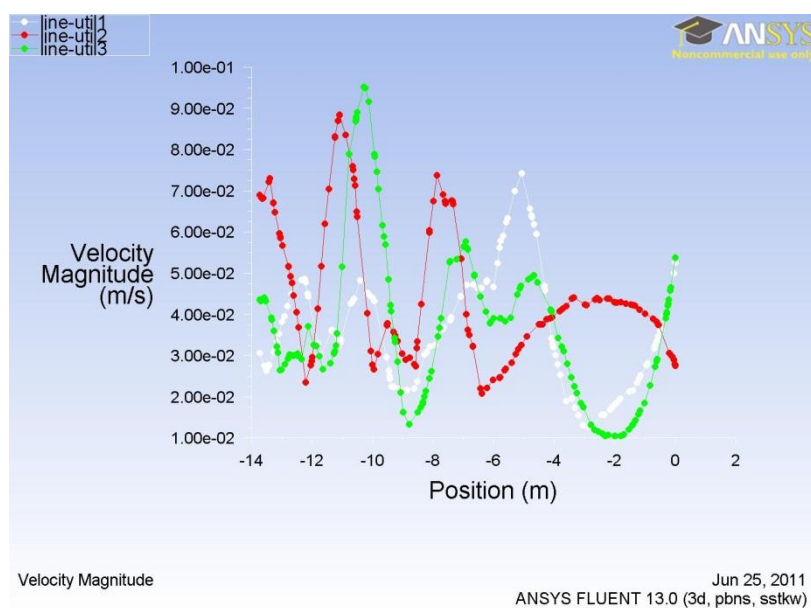


Figura 113 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Verão com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

Situação de Inverno, Sala Semi-Lotada

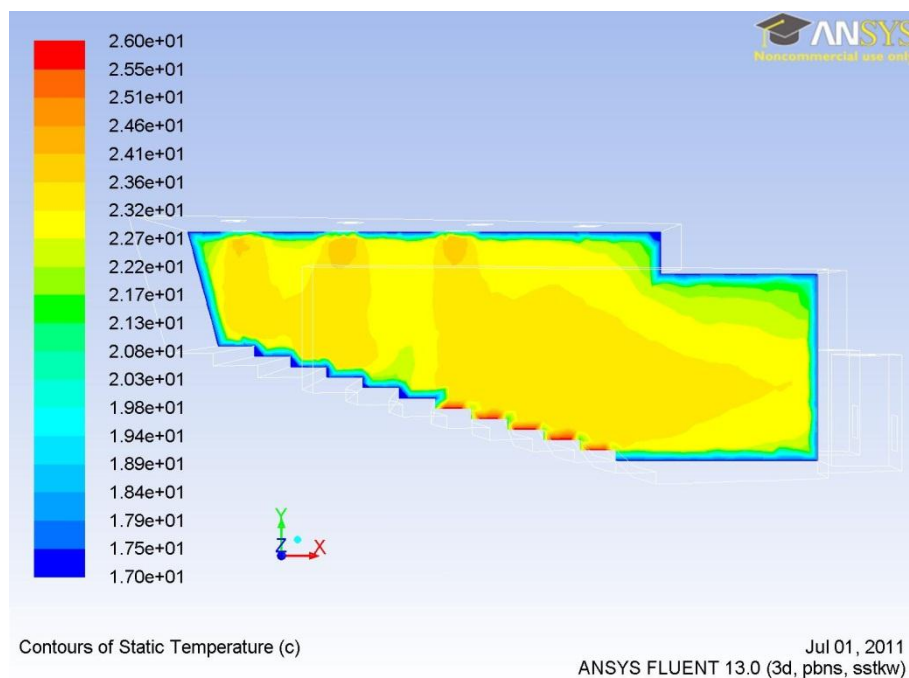


Figura 114 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo $SST k-\omega$.

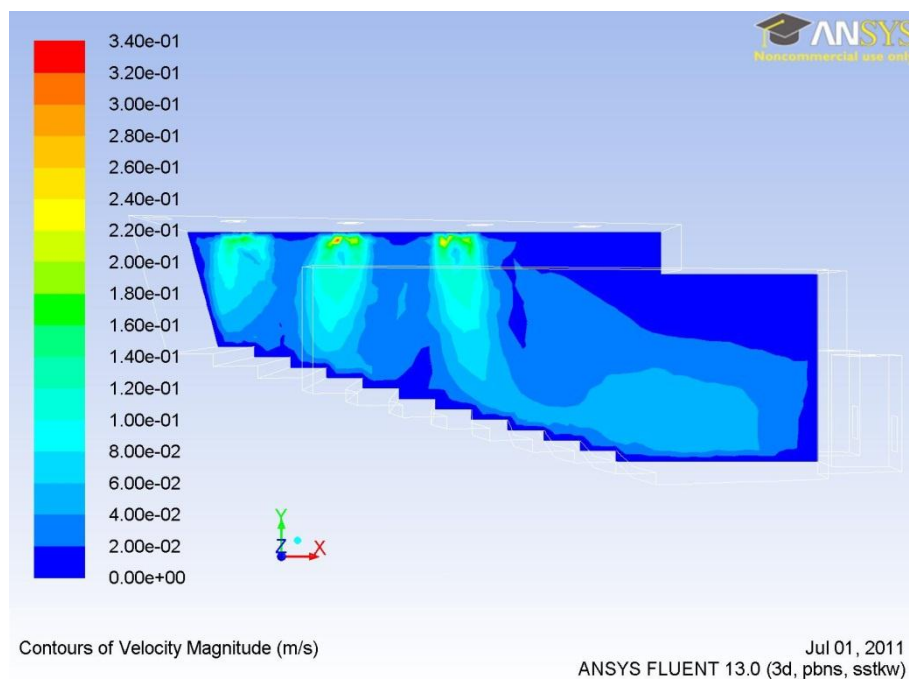


Figura 115 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de simetria para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo $SST k-\omega$.

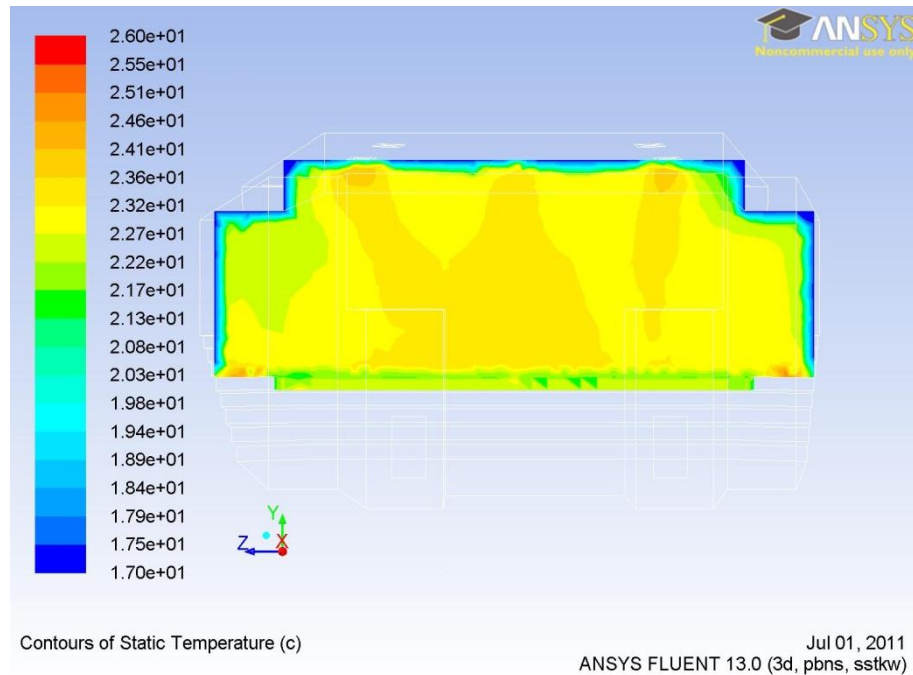


Figura 116 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

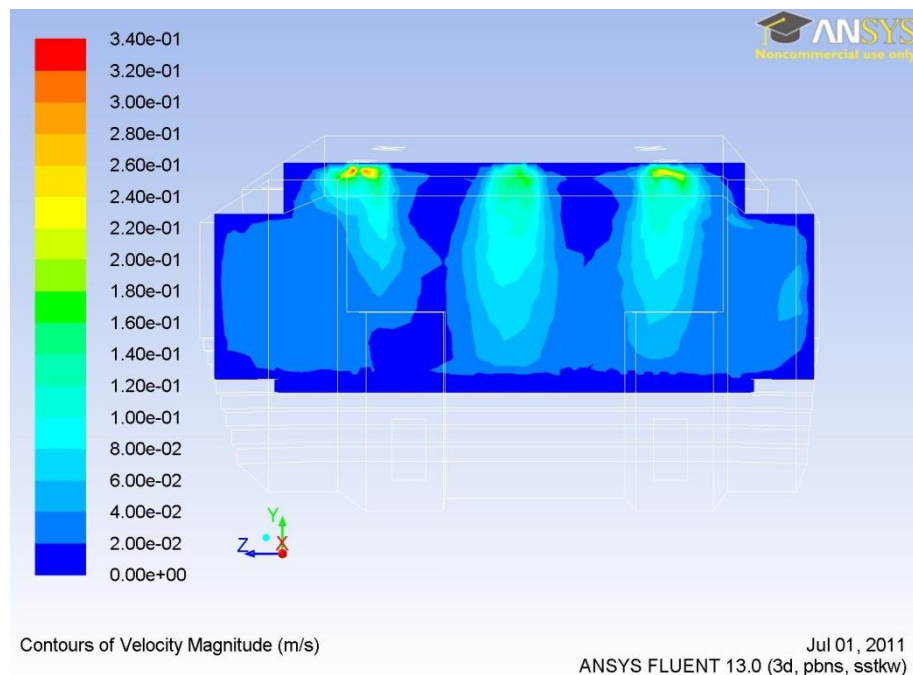


Figura 117 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona do meio da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

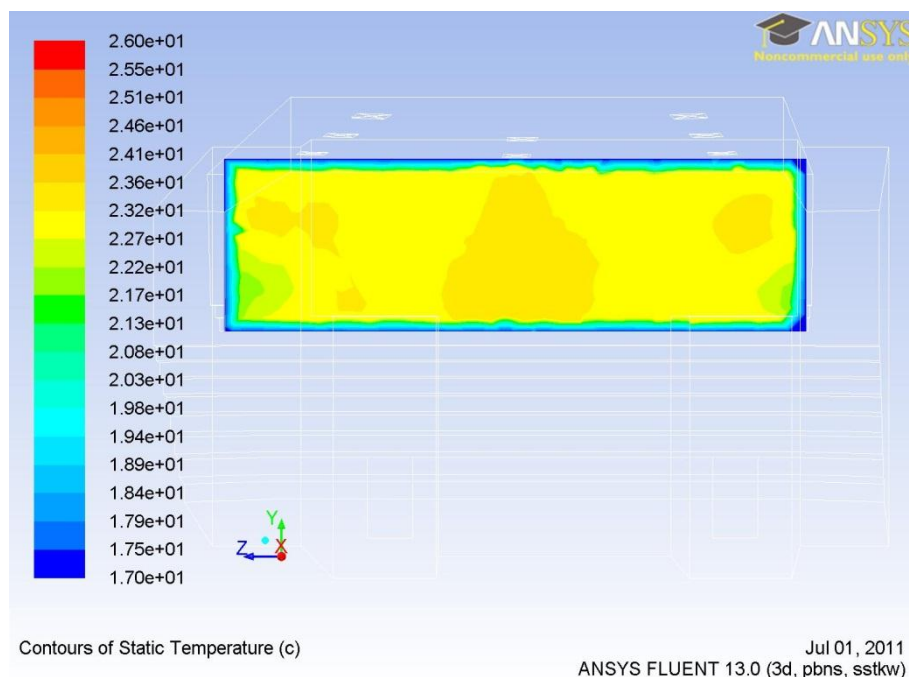


Figura 118 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

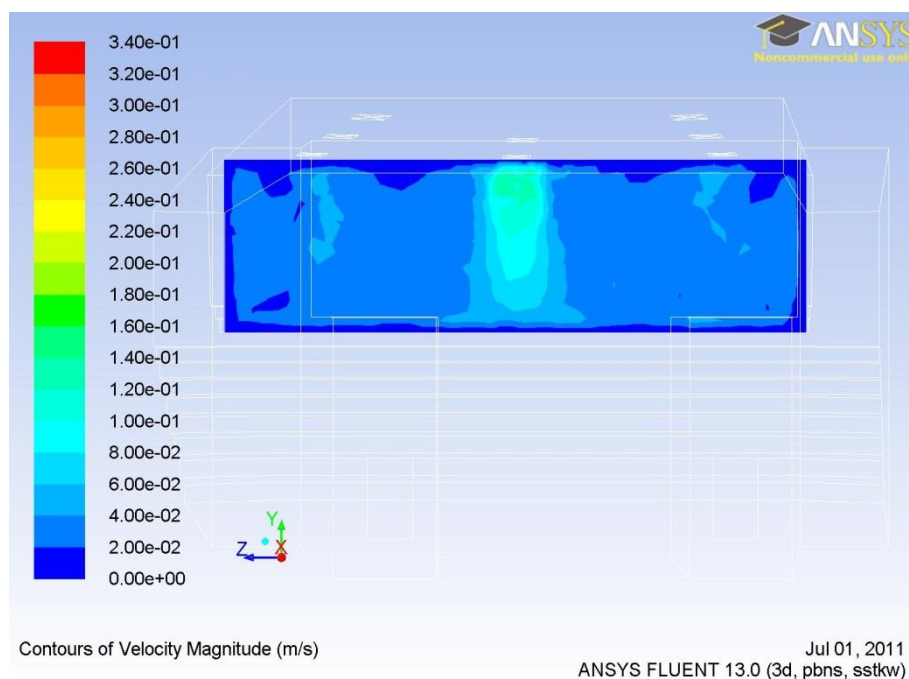


Figura 119 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano de frente na zona traseira da sala para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

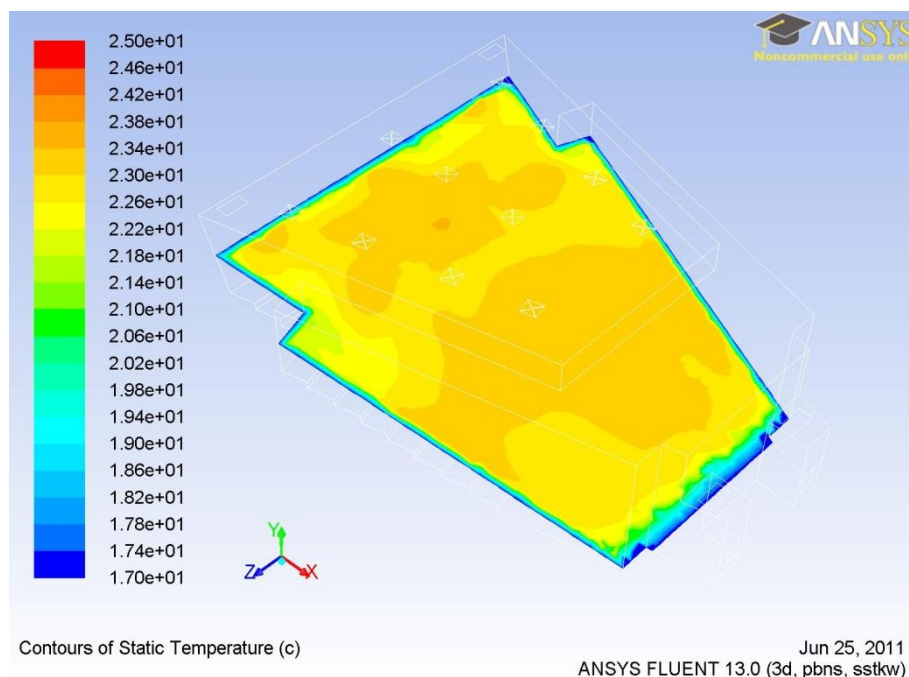


Figura 120 - Representação dos contornos de temperaturas segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

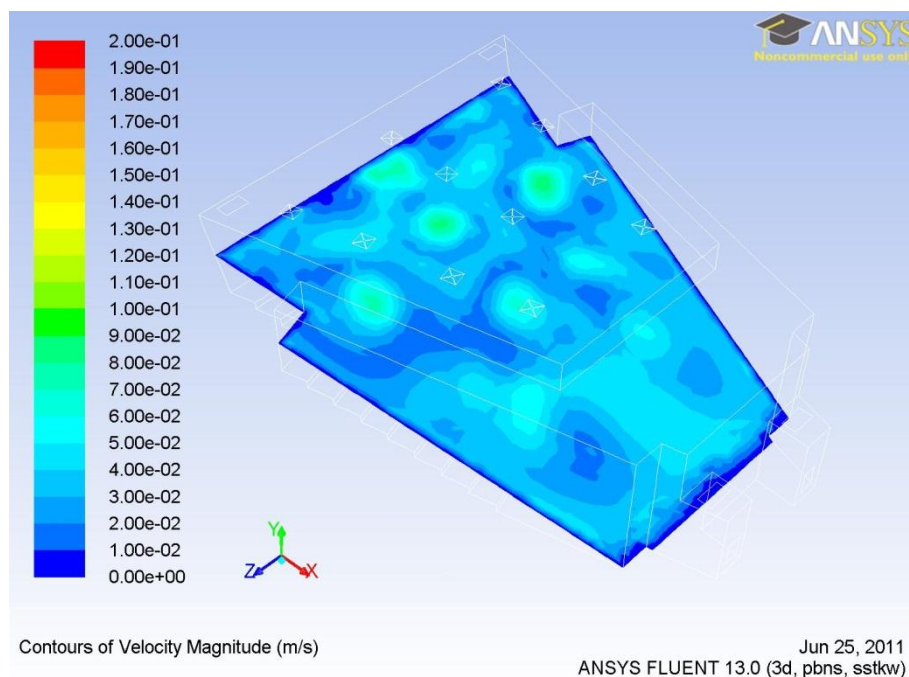


Figura 121 - Representação dos contornos de velocidades segundo o plano útil para a situação de Inverno e sala semi-lotada por resolução através do modelo SST $k-\omega$.

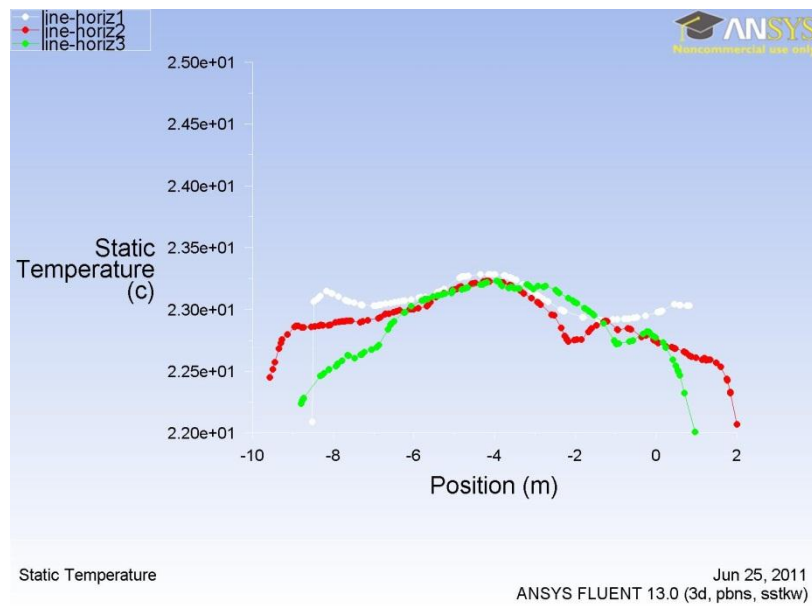


Figura 122 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

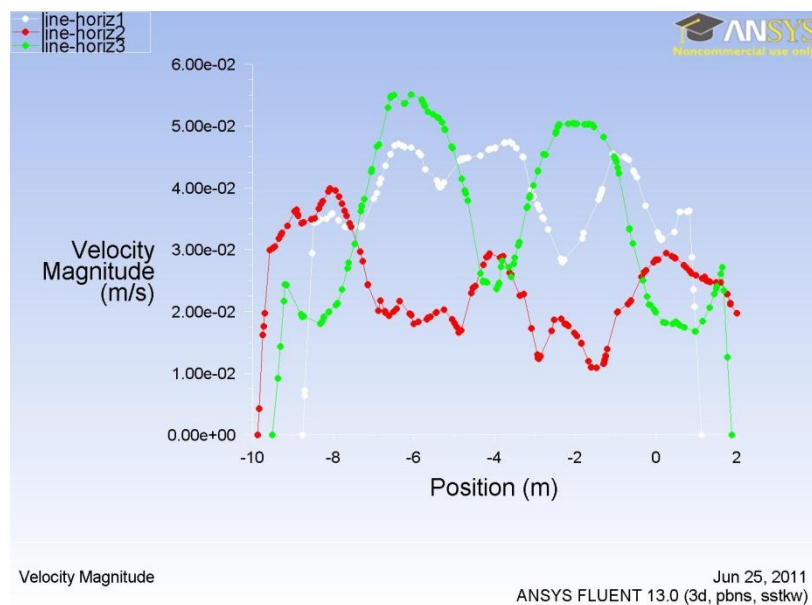


Figura 123 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas horizontais para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo SST $k-\omega$.

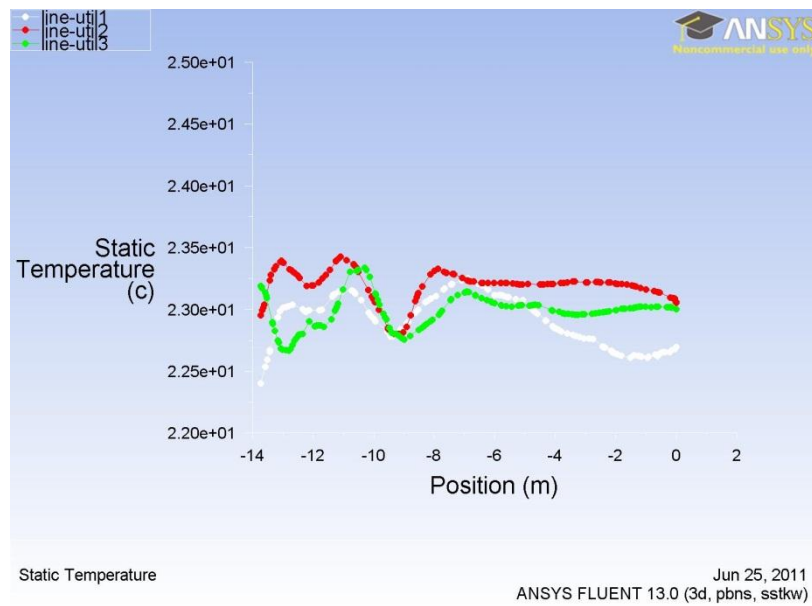


Figura 124 - Representação dos valores das temperaturas ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo $SST k-\omega$.

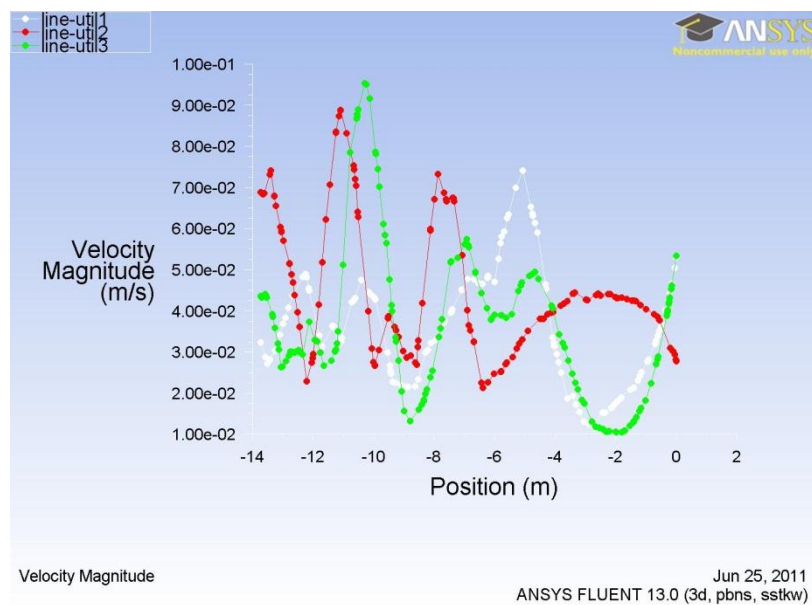


Figura 125 - Representação dos valores das velocidades ao longo das linhas do plano útil para uma situação de sala semi-lotada no Inverno com resolução pelo modelo $SST k-\omega$.

Anexo D - Valores das velocidades e temperaturas nos pontos de extracção

Tabela 7 – Valores das velocidades e temperaturas em vários pontos da sala e para várias situações e com resolução segundo os dois modelos considerados.

VALORES DAS TEMPERATURAS E VELOCIDADES NAS EXTRACÇÕES											
SITUAÇÃO	SALA LOTADA VERÃO		SALA LOTADA INVERNO		SALA SEMI-LOTADA VERÃO		SALA SEMI-LOTADA INVERNO				
STANDARD K-e											
PONTO	TEMP.	VELOC.		TEMP.	VELOC.		TEMP.	VELOC.		TEMP.	VELOC.
	[C]	[m/s]		[C]	[m/s]		[C]	[m/s]		[C]	[m/s]
1	23,8	0,18		23,4	0,18		23,5	0,15		23,0	0,17
2	23,4	0,18		22,8	0,18		23,3	0,16		22,7	0,14
3	23,2	0,20		22,3	0,20		23,0	0,19		22,0	0,19
4	23,3	0,11		22,5	0,11		23,2	0,10		22,4	0,11
5	23,3	0,49		22,4	0,49		23,2	0,51		22,4	0,48
6	23,6	0,47		23,0	0,47		23,4	0,47		22,8	0,47
SST K-w											
	TEMP.	VELOC.		TEMP.	VELOC.		TEMP.	VELOC.		TEMP.	VELOC.
	[C]	[m/s]		[C]	[m/s]		[C]	[m/s]		[C]	[m/s]
1	23,7	0,17		23,2	0,17		23,4	0,15		22,9	0,17
2	23,3	0,18		22,6	0,18		23,2	0,16		22,6	0,14
3	23,0	0,20		22,1	0,20		22,8	0,20		21,8	0,20
4	23,2	0,11		22,4	0,11		23,1	0,11		22,2	0,11
5	23,2	0,49		22,3	0,49		23,0	0,52		22,2	0,49
6	23,6	0,48		23,0	0,48		23,4	0,49		22,8	0,47