

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num ciclo de compressão de vapor

Carlos Oliveira Miranda de Sousa Leite

Relatório final da dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Óscar Mota



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro 2010

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num
sistema de compressão de vapor

Aos Meus Pais e à Leonor que sempre me apoiaram

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Resumo

As caravanas quando expostas a situações meteorológicas adversas atingem níveis de desconforto térmico elevadíssimos. O presente estudo tem por objectivo seleccionar um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor.

Mediu-se a temperatura do ar interior da caravana, situada no Porto e mediram-se as infiltrações de ar.

Pelo facto de uma caravana não ter uma localização fixa, o sistema de refrigeração foi dimensionado para a região de Moura, no Alentejo, que se considerou ser a região mais desfavorável em termos energéticos em Portugal. Foram então calculadas as cargas térmicas. Uma vez que as caravanas não são energeticamente autónomas, foi estudado um sistema fotovoltaico para a caravana, que fornecesse energia eléctrica ao sistema de refrigeração. O sistema fotovoltaico foi dimensionado para um consumo no arrefecimento contabilizado para a região de Moura.

Desenvolveu-se um modelo em "Computational Fluid Dynamics", CFD, no software Fluent, com o objectivo de prever o campo de temperaturas do ar interior da caravana, na ausência de sistema de refrigeração e na presença de uma máquina frigorífica seleccionada. As simulações vieram demonstrar que se torna imprescindível a introdução de um sistema de refrigeração na caravana para que se atinja o conforto térmico.

Finalmente foi efectuada uma análise económica, em que ficou demonstrado, que a hipótese de se vender energia à rede durante o tempo em que a caravana não se encontra alugada, torna o sistema de refrigeração assistido por painéis fotovoltaicos, uma solução competitiva do ponto de vista económico

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Development of a vapor-compression refrigerating system for a caravan

Abstract

Caravans, when exposed to adverse weather conditions, become unacceptably uncomfortable, due to high temperature. The aim of this thesis is to develop a vapor compressor refrigeration system for a caravan.

The air temperature inside the caravan was measured and the infiltrations for the Oporto region.

Because caravan's don't have an exact location, the system was designed for Moura's Region, Alentejo, which has the worst heating season in Portugal. The thermal loads were then calculated. Since caravans are not energy-independent, a photovoltaic System was also designed. The system was designed for a cooling load in Moura,

A computational fluid dynamic model was developed using the Fluent software with the objective of predicting the temperature field of the air inside the caravan, with and without a refrigerating system. The simulations have shown that it is essential to use a cooling system for achieving thermal comfort.

An economical approach was done at the end, were it was proved that the photovoltaic-assisted cooling system is an economical competitive solution.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração de diversas pessoas, a quem eu gostaria de agradecer.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu Orientador neste trabalho, o Professor Óscar Mota, pela disponibilidade e ajuda que me deu.

Gostaria também de agradecer ao Professor Clito Afonso que proporcionou a realização deste trabalho e esteve sempre disponível para esclarecer dúvidas relacionadas com este projecto, ao Professor Szabolcs Varga cuja ajuda foi preciosa para uma melhor compreensão do software Fluent, ao professor Armando Oliveira pela ajuda prestada na análise do sistema fotovoltaico.

Devo também agradecimentos ao professor Mário Guindeira e à Eng.^a Isabel Martins pela ajuda prestada aquando das medições experimentais.

Por fim gostaria de agradecer aos meus amigos Marco Silva e Márcio Castro pela ajuda prestada ao longo deste trajecto.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
A	Área	m^2
A_c	Área colectora	m^2
C	Concentração do gás	p.p.m
C_0	Concentração inicial do gás	p.p.m
COP	Coeficiente de performance	-
C_p	Calor específico	Kj/(kgK)
$C_{p_{eq}}$	Calor específico equivalente	Kj/(kgK)
$C_{p_{mod}}$	Calor específico do modelo	Kj/(kgK)
$\dot{E}_{pv}$	Produção eléctrica do sistema fotovoltaico	W
$\dot{E}_{scv}$	Consumo eléctrico do sistema de compressão de vapor	W
I	Número de infiltrações de ar	rph
$\dot{I}$	Intensidade da radiação solar incidente	W/m ²
K	Coeficiente de perdas do módulo fotovoltaico	W/(m ² K)
$\dot{m}$	Caudal mássico	kg/s
NOCT	Temperatura nominal de funcionamento da célula	°C
$\dot{Q}_{envidraçado}$	Ganho de calor pelos vãos envidraçados	W
$\dot{Q}_{infiltrações}$	Ganho de calor associado às infiltrações de ar	W
$\dot{Q}_{interno}$	Ganhos internos	W
$\dot{Q}_{opaco}$	Ganho de calor pela envolvente opaca	W
$\dot{Q}_{refrig}$	Efeito frigorífico	W
$\dot{Q}_{total}$	Carga térmica total	W
Q_h	Calor cedido à fonte quente	W
Q_l	Calor absorvido à fonte fria	W
R	Resistência térmica da parede	m ² °C /W
$R_{equivalente}$	Resistência térmica equivalente da parede	m ² °C /W
i	Resistência térmica da camada i da parede	m ² °C /W
t	Constante de tempo	h

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{ar-sol}}$	Temperatura ar- sol	K
T_{ext}	Temperatura do ar exterior	K
t_f	Instante final	s
t_i	Instante inicial	s
t_{int}	Temperatura do ar interior	K
U	Coeficiente de transmissão térmico	$\text{W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$
$\dot{V}$	Caudal volúmico	m^3/s
W_c	Trabalho de compressão	W

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidades
α	Coeficiente de absorção	-
α_{ext}	Coeficiente de convecção da parede exterior	-
α_{int}	Coeficiente de convecção da parede interior	-
β	Coeficiente de temperatura	K ⁻¹
ΔE	Balanço de energia eléctrica	W
Δt_i	Intervalo de tempo no instante i	s
η_{ci}	Rendimento do controlador/inversor	-
η_{pv}	Rendimento do modulo fotovoltaico	-
η_{ref}	Rendimento de referência do modulo fotovoltaico	-
λ	Condutibilidade térmica	W/(m.K)
λ_{eq}	Condutibilidade térmica equivalente	W/(m.K)
λ_{mod}	Condutibilidade térmica do modelo	W/(m.K)
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
ρ_{eq}	Massa volúmica equivalente	
ρ_{mod}	Massa volúmica do modelo	
τ	transmissividade	-

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Índice de conteúdos

1.	Introdução	1
1.1.	Campismo e Caravanismo	2
1.2.	Enquadramento energético.....	2
1.3.	Objectivos do projecto	9
2.	Sistemas fotovoltaicos	11
2.1.	Componentes de um sistema fotovoltaico	11
2.3.1.	Módulo fotovoltaico	12
2.2.	Princípios funcionais de uma célula fotovoltaica	14
2.4.	Tipos de Sistemas fotovoltaicos	20
2.5.	Curvas características I-V das células fotovoltaicas.....	22
3.	Sistema de refrigeração	25
3.1.	Ciclo de Carnot inverso	26
3.2.	Ciclo simples de compressão de vapor	28
3.3.	Ciclo real de compressão de vapor	29
3.4.	Componentes dos sistemas de refrigeração	30
3.4.1.	Compressores	30
3.4.2.	Válvulas de expansão.....	31
3.4.3.	Condensadores	32
3.4.4.	Evaporadores.....	32
4.	Trabalho experimental.....	33
4.1.	Medição das infiltrações na caravana	33
5.	Cargas térmicas de arrefecimento.....	37
5.1.	Coeficientes de transmissão térmica da caravana.....	37
5.2.	Ganhos Solares pela envolvente Opaca	40
5.3.	Ganhos associados aos envidraçados exteriores	41
5.4.	Ganhos associados às Infiltrações.....	41
5.5.	Ganhos Internos	41
5.6.	Cálculo das cargas Térmicas de arrefecimento na caravana.....	42
6.	Seleccção do equipamento	45

6.1. Selecção do Sistema de refrigeração	45
7. Modelo de simulação e resultados obtidos	55
7.1. Introdução à Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD).....	55
7.2. Propriedades dos materiais da caravana	58
7.3. Desenvolvimento do modelo.....	61
7.4. Validação do Modelo	75
7.5. Resultados do modelo sem sistema de refrigeração	80
7.6. Simulação do modelo com sistema de refrigeração	82
8. Análise económica	87
9. Conclusões	91
Bibliografia.....	95
Anexo A: Resultados dos testes de Gás traçador	97
Anexo B: Ficha técnica do aparelho de ar condicionado	99
Anexo C: Características dos módulos fotovoltaicos consultados.....	101
Anexo D: Ficha técnica do modelo STP190-18/UD da SUNTECH.....	103
Anexo E: Cálculo da capacidade da bateria	105
Anexo F: Resultados das medições de temperatura no interior da caravana	111
Anexo G: Parâmetros das simulações	113

Índice de figuras

Figura 1.1: Representação de uma Caravana do tipo Caravelair Antares400 [1].....	2
Figura 1.2- Matriz energética mundial até 2008 e projecção até 2030 [3].....	3
Figura 1.3- Evolução do preço do Petróleo de 1946 até Novembro de 2009 [5]	4
Figura 1.4- Reservas mundias de petróleo já descobertas e projecção até 2050 [2]	4
Figura 1.5- Número e volume de "giant fields" descobertos [2]	5
Figura 1.6- Produção mundial de gás e petróleo desde 1930 até 2007 e projecção até 2050 [6] ..	5
Figura 1.7- Emissões mundiais de CO ₂ entre 1980 e 2007 e projecção até 2030 [3].....	6
Figura 1.8- Consumo de Energia primária em Portugal [10]	7
Figura 1.9 – Produção de energia eléctrica fotovoltaica em Portugal [8]	8
Figura 1.10 – Potência foto voltaica instalada em Portugal [8]	8
Figura 2.1: Representação de um sistema fotovoltaico [12]	11
Figura 2.2: Representação das curvas IV para ligação de células em série (b) e em paralelo (a) [4]	12
Figura 2.3 Representação de uma junção p-n [14]	15
Figura 2.4: Células fotovoltaicas de Silício.....	16
Figura 2.5:-Eficiência das células solares em Laboratório de 1975 até 2009 [15].....	19
Figura 2.6: Exemplos de aplicações se sistemas fotovoltaicos autónomos [16,17,18]	20
Figura 2.7: Central fotovoltaica de Moura [19],[20].	21
Figura 2.8: curva característica corrente- tensão de uma célula fotovoltaica [21]	22
Figura 2.9: curva característica corrente- tensão e corrente-potência de uma célula fotovoltaica [21]	22
Figura 2.10: Influência da temperatura e da radiação incidente na curva tensão-corrente de uma célula fotovoltaica [4]	23
Figura 3.1: Representação de um ciclo de compressão de vapor [23]	25
Figura 3.2: Representação do ciclo frigorífico de Carnot [22].....	27
Figura 3.3: Representação do ciclo simples de compressão de vapor [24]	28
Figura 3.4: Representação do ciclo real de compressão de vapor [22]	29
Figura 4.1: - Evolução da concentração de gás traçador no interior da caravana Respiros abertos.....	34
Figura 4.2 - Evolução da concentração de gás traçador no interior da caravana Respiros fechados.....	34
Figura 4.3: Evolução da temperatura do ar no interior da caravana de 15-09-09 a 01-10-09..	35

Figura 4.4: Evolução da temperatura do ar no interior da caravana de 02-10-09 a 23-10-09 .	35
Figura 5.1: Balanço de energia eléctrica em Moura para $\eta_{ref}=0,11$	47
Figura 5.2: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura para $\eta_{ref}=0,12$	48
Figura 5.3: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura - $P_{mp}=180W$	50
Figura 5.4: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura - $P_{mp}=200W$	50
Figura 5.5: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura – $P_{mp}= 210W$	50
Figura 5.6: balanço de energia eléctrica na caravana entre 1 de Maio e 31 de Setembro	51
Figura 7.1: Modelo 1 com malha	62
Figura 7.2: Fluxo de calor solar incidente nas superfícies às 8h00 de 1 de Junho, obtido com o Modelo 1 – modelo simples	63
Figura 7.3: Modelo 2- modelo com ar envolvente	64
Figura 7.4: Pormenor da ligação entre vértices das paredes	64
Figura 7.5: Pormenor da ligação entre vértice da parede e vértice do ar exterior	65
Figura 7.6: Análise da malha do modelo 2	66
Figura 7.7: Fluxo de calor solar incidente na caravana às 15h00, obtido com o modelo 2	67
Figura 7.8: Perfil de temperaturas no interior às 15h00, obtido com o modelo 2	67
Figura 7.9: Representação da janela e volumes adjacentes numa das paredes do modelo 3	68
Figura 7.10: Malha estruturada utilizada no modelo 3	68
Figura 7.11: Fluxo de calor solar incidente na caravana às 15h obtido com o modelo 3	69
Figura 7.12: Temperatura do ar no interior da caravana às 15h, obtida com o modelo 3	70
Figura 7.13: Temperatura na caravana para o modelo 3- caso 2	70
Figura 7.14: Modelo final da caravana	71
Figura 7.15: Modelo final com malha	72
Figura 7.16: Evolução da temperatura para o dia 23 de Setembro	73
Figura 7.17: Temperaturas na caravana às 15h00 num plano xoy para a simulação com $\alpha_{ext}=6W/m^2K$ Resultados obtidos com o modelo 4	74
Figura 7.18: Temperaturas na caravana às 15h00 num plano xoy para a simulação com $\alpha_{ext}=12W/m^2K$ Resultados obtidos com o modelo 4	74
Figura 7.19: Temperaturas medidas no exterior e interior da caravana no dia 14 de Outubro de 2009	75
Figura 7.20: Radiação global horizontal para o dia 14 de Outubro na cidade do Porto	76
Figura 7.21 – Temperaturas no interior da caravana calculadas por simulação e temperaturas experimentais	76
Figura 7.22: Perfil de temperaturas para o Porto - $\alpha=6 W/m^2K$ às 15h00 Resultados do modelo 4 - caravana	78

Figura 7.23: Perfil de temperaturas para o Porto - $\alpha=10$ W/m ² K às 15h00 Resultados do modelo 4 - caravana.....	78
Figura 7.24: Perfil de temperaturas para o Porto - $\alpha=25$ W/m ² K às 15h00 Resultado do Modelo 4 - caravana	79
Figura 7.25 Radiação Global horizontal para o dia 24 de Julho em Moura	80
Figura 7.26: Temperaturas em Moura	81
Figura 7.27: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=25$ W/m ² K às 15h00 Resultados do modelo	81
Figura 7.28: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=25$ W/m ² K às 15h00 Resultados do modelo	82
Figura 7.29: Modelo final com sistema de refrigeração	83
Figura 7.30: Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 30s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.....	84
Figura 7.31: Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 120s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.....	85
Figura 7.32: Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 480s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.....	85
Figura 7.33 Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 750s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.....	85
Figura 8.1: Produção eléctrica mensal do sistema no Porto	88
Figura 8.2: Evolução do retorno nos primeiros 15 anos.....	88
Figura 8.3: Saldo médio diário mensal para venda de energia eléctrica à rede.....	89
Figura G.0.1: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10$ W/m ² K às 11h00 Resultados do modelo	114
Figura G.0.2: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10$ W/m ² K às 13h00 Resultados do modelo	114
Figura G.0.3: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10$ W/m ² K às 17h00 Resultados do modelo	114
Figura G.0.4: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10$ W/m ² K às 11h00 Resultados do modelo	114
Figura G.0.5: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10$ W/m ² K às 11h00 Resultados do modelo	114
Figura G.0.6: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10$ W/m ² K às 11h00 Resultados do modelo	114
Figura G.0.7 Perfil de temperaturas passados 10s. Resultados do modelo com sistema de refrigeração.....	114

Figura G.0.8: Perfil de temperaturas passados 15s. Resultados do modelo com sistema de refrigeração 114

Índice de tabelas

Tabela 3.1: Tipos de compressores.....	30
Tabela 5.1: Coeficientes de convecção do ar exterior e interior da caravana [25].....	38
Tabela 5.2-Dimensões da caravana	38
Tabela 5.3 - Materiais das superfícies e respectivas dimensões.....	39
Tabela 5.4-Materiais da caravana e respectivas propriedades.....	39
Tabela 5.5 – Coeficientes de transmissão térmica das paredes	40
Tabela 5.6 – Coeficientes de transmissão térmica das janelas	40
Tabela 5.7: Radiação global incidente nas paredes da caravana	42
Tabela 5.8: Ganhos Pela envolvente Opaca	43
Tabela 5.9: Ganhos pelos envidraçados	43
Tabela 5.10: Ganhos associados às infiltrações de ar no interior da caravana.....	43
5.11: Comparação entre Sistemas de refrigeração de diversos fabricantes[34]	45
Tabela 5.12:Características dos módulos fotovoltaicos[36].....	48
Tabela 5.13:Propriedades eléctricas dos módulos fotovoltaicos[36]	49
Tabela 5.14: Coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos[36].....	49
Tabela 7.1: Dimensões da caravana reais e do modelo	58
Tabela 7.2: Propriedades equivalentes dos materiais das paredes do modelo da caravana.....	61
Tabela 7.3: Propriedades equivalentes dos materiais das janelas do modelo da caravana.....	61
Tabela 8.1:Tarifa para o regime bonificado	87

1. Introdução

O presente estudo, faz parte de um ambicioso plano traçado para a empresa Campinanda para o desenvolvimento das suas caravanas e autocaravanas.

Este plano tem como objectivo uma revolução no actual conceito de caravanismo, e passa por uma remodelação completa das caravanas ao nível da electrónica, da mecânica, do design, e também do ponto de vista energético, que se possa traduzir numa vantagem competitiva face às caravanas convencionais.

Desse ambicioso plano, traçado para as caravanas da empresa, foi objecto de estudo no presente trabalho, o desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana, capaz de a dotar de níveis de conforto térmico elevados, mesmo em situações de calor extremo. Pretendia-se ainda, estudar a possibilidade de tornar a caravana independente, do ponto de vista energético, recorrendo para o efeito a um sistema fotovoltaico.

A Campinanda é uma empresa fundada em 1988, que se dedica ao comércio de caravanas e autocaravanas, assim como outros produtos relacionados com o caravanismo e turismo de ar livre.

Desde a fundação, a Campinanda, é representante oficial e em exclusivo em Portugal das marcas do prestigiado Grupo de Lazer Francês “TRIGANO”:

- Caravanas CARAVELAIR;
- Autocaravanas CHALLENGER;
- Autocaravanas EUROMOBIL.

A empresa, com sede em Leça da Palmeira é neste momento líder no mercado Nacional e tornou-se em 2005 a única empresa no sector com certificação ISO 9001.

Para garantir o seu estatuto e com o objectivo de aumentar sempre a cota de mercado, a Campinanda sempre investiu em soluções inovadoras, que a caracterizam como marca de excelência do sector. Esta busca pela novidade levou a Campinanda a estabelecer algumas parcerias de modo a tornar o crescimento sustentável sempre com base nas novas tecnologias.

Para o desenvolvimento do projecto, de que faz parte o presente estudo, a Campinanda cedeu à FEUP uma caravana, para que servisse de modelo-padrão. Trata-se de uma caravana Caravelair Antares 400, representada na Figura 1.1

Trata-se de uma caravana de gama média-baixa com capacidade para albergar 4 pessoas. Possui para esse efeito uma cama de casal assim como um sofá cama, também este de casal. A caravana está equipada com equipamento de cozinha, nomeadamente um fogão a gás e um frigorífico que permite um funcionamento a gás, ou eléctrico. A caravana está ainda equipada com um quarto de banho.



Figura 1.1: Representação de uma Caravana do tipo Caravelair Antares 400 [1]

1.1. Campismo e Caravanismo

O campismo e caravanismo são encarados, como um modo económico de passar férias. Assim, a economia e a independência são as principais motivações dos clientes do chamado “turismo de ar livre”.

O caravanismo, é como que uma evolução do campismo, face à procura crescente de se conjugar, o turismo da natureza e a mobilidade, mantendo preservado o conforto de uma casa. Deste modo, a instalação de aparelhos eléctricos que permitam tornar a estadia numa caravana mais agradável e confortável tem sido constante.

Apesar de as Caravanas terem uma enorme mobilidade, a estadia tem de ser feita num parque de campismo, ou outro parque preparado para o efeito, pois as caravanas, ao contrário das auto-caravanas, não são independentes do ponto de vista energético. As caravanas precisam de estar ligadas à rede, para suprir as necessidades energéticas básicas dos seus habitantes. Assim, a tão desejada independência dos campistas, torna-se de certo modo condicionada pela sua insuficiência energética.

1.2. Enquadramento energético

Desde que há cerca de 500000 anos, o homem descobriu o fogo a sua busca pelo domínio das mais diferentes formas de energia foi incessante.

Ao longo da história, a expansão da civilização humana tem sido apoiada por um crescimento na utilização de energia exosomática. À medida que o homem foi aprendendo a dominar as diferentes formas de energia que o rodeiam, progrediu de arados puxados à mão, forjas manuais e fogões a lenha para o actual nível de mecanização [2], em que uma grande

parte das suas actividades é passível de ser substituída por dispositivos mecânicos alimentados por fontes energéticas construídas pelo homem.

A Revolução Industrial em finais do século XVIII foi sobretudo assente no recurso a energia proveniente de combustíveis fósseis, especialmente o carvão e o petróleo. Os combustíveis fósseis são formados pela decomposição da matéria orgânica através de um processo que demora milhares de anos e não sendo por isso considerados renováveis humana; A Figura 1.2 representa a matriz energética mundial desde 1980 até 2008 e apresenta também uma projecção até 2030.

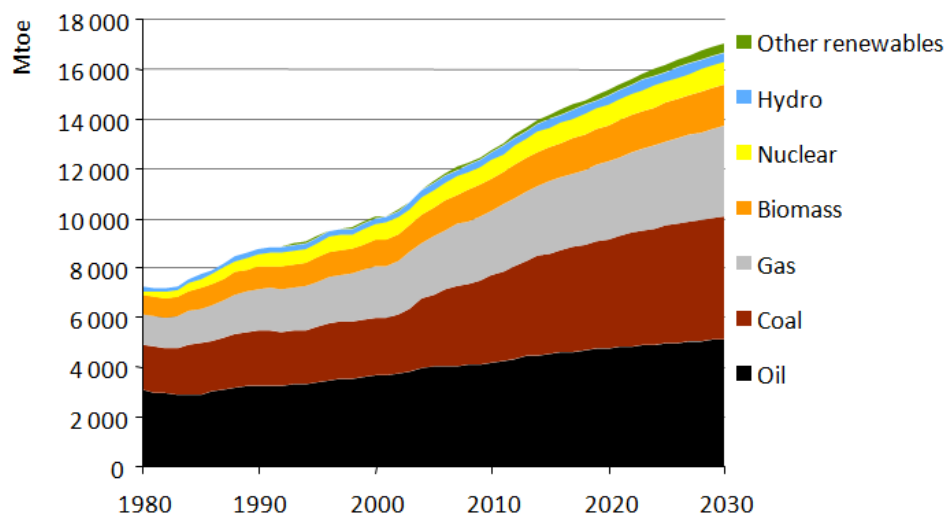


Figura 1.2- Matriz energética mundial até 2008 e projecção até 2030 [3]

A energia é hoje considerada um elemento primordial quer do ponto de vista social, quer do ponto de vista económico. A importância da energia no desenvolvimento económico é reconhecida universalmente e a história permite que se verifique uma enorme relação entre a actividade económica e a disponibilidade energética [4]. Esta forte relação faz com que a indisponibilidade energética tenha enormes reflexos na economia global. A crise do Suez em 1979 foi disso primeiro sinal, que a História veio repetir em 1990 na primeira guerra do Golfo. Mais tarde, com a invasão do Iraque, em 2003, e resultante tensão no médio oriente, o crescimento económico nos países desenvolvidos, a especulação, e sobretudo o aumento da procura de petróleo pela China, e demais países do sudoeste asiático, a par com a especulação deu em 2008 origem a uma “crise de petróleo”, em que os preços subiram cerca de 100% num ano. Esta crise de 2008, interrompida pela grande recessão económica, veio mais uma vez mostrar que a enorme dependência energética do petróleo, põe em causa a sustentabilidade económica a nível global. A Figura 1.3 ilustra a evolução do preço do petróleo desde 1946 até 2009, onde é visível a subida dos preços do petróleo, assim como os picos correspondentes às crises de 1979 1990 e 2008.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

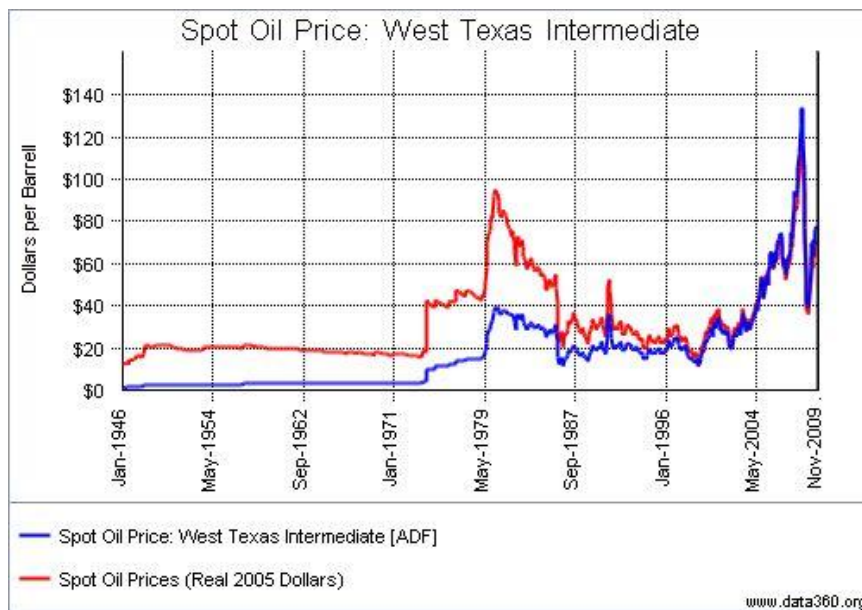


Figura 1.3- Evolução do preço do Petróleo de 1946 até Novembro de 2009 [5]

A crise do Suez forçou o mundo a reflectir sobre a enorme dependência de um recurso com reservas limitadas (estima-se que as reservas de petróleo e gás natural durem mais 39 e 65, respectivamente. As reservas de carvão durarão mais 230 anos) [4], um aumento enorme no consumo de energia, gerada a partir de um recurso limitado, disponível em escassas zonas do globo, sendo que a maioria da produção se localizava em zonas de grande instabilidade política, punha em causa a sustentabilidade económica.

Como se pode verificar na Figura 4, enquanto a produção de petróleo tem aumentado continuamente, a descoberta de novas reservas de petróleo, tem vindo sistematicamente a diminuir. Para além disso, a grande maioria dos campos de petróleo descobertos recentemente, são mais pequenos, o que acarretará custos muito maiores.

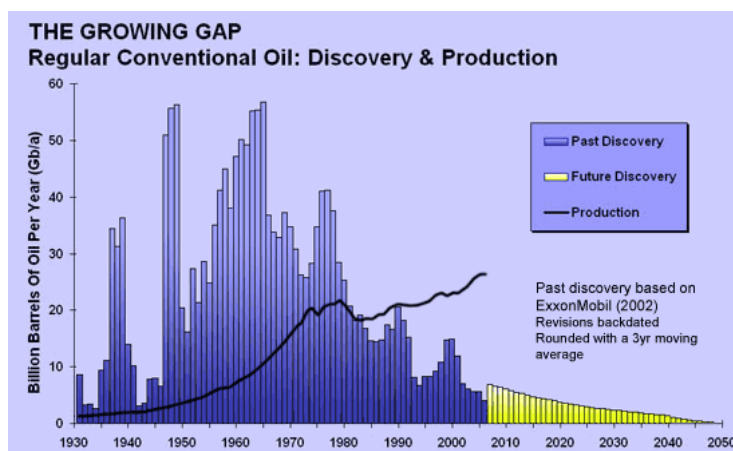


Figura 1.4- Reservas mundias de petróleo já descobertas e projecção até 2050 [2]

Actualmente 65% da produção de petróleo mundial provém dos chamados “giant fields”, que correspondem a 1 % das reservas mundiais de petróleo [2]. A maioria destes campos já atingiu, ou está prestes a atingir o pico de exploração. A descoberta de novos “giant fields”, tem vindo a diminuir drasticamente desde os anos 60, como se pode ver na Figura 1.5, o que acarretará a um aumento dos custos de exploração e, conseqüentemente do preço de petróleo.

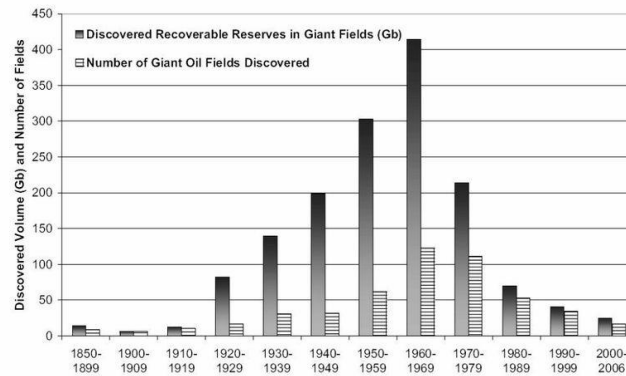


Figura 1.5- Número e volume de "giant fields" descobertos [2]

Assim é de esperar que a produção de petróleo atinja um pico de produção dentre de algumas décadas, como se pode ver na Figura 1.6. sendo progressivamente substituída por outros recursos. Situação semelhante ocorre também para outros combustíveis de origem “fóssil”, como o carvão e o gás natural que (se bem que num prazo mais alargado) irão inevitavelmente, ter o mesmo destino do petróleo e seus derivados.

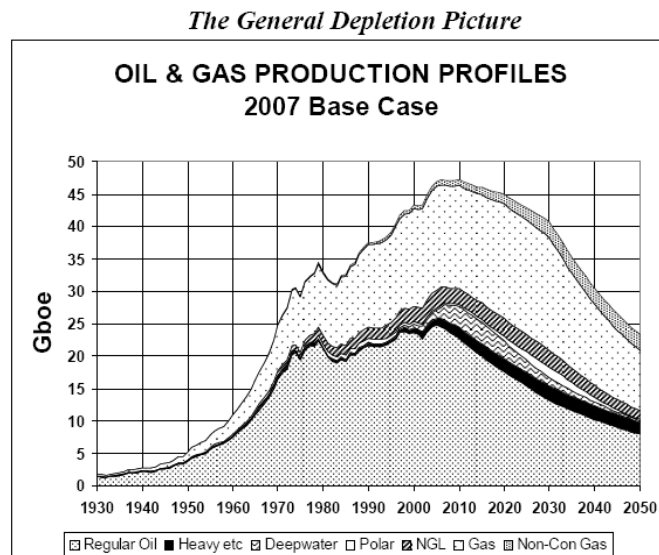


Figura 1.6-Produção mundial de gás e petróleo desde 1930 até 2007 e projecção até 2050 [6]

Apesar de, num cenário pós- crise de 1979, a grande preocupação ser o preço do petróleo, foi surgindo uma outra preocupação: a dependência enorme do petróleo, e outros combustíveis fósseis, punha não só em risco a sustentabilidade económica, mas também

acatava consigo enorme risco do ponto de vista ambiental. A queima de combustíveis fósseis liberta gases e partículas poluentes que põem em risco a sustentabilidade ambiental. O SO_2 e o NO_x provocam a ocorrência de chuvas ácidas, e a libertação do CO_2 , provoca o chamado efeito de estufa e é o efeito do recurso generalizado aos combustíveis fósseis que gera mais preocupação a nível global. A Figura 1.7 mostra a quantidade de CO_2 emitido anualmente, em questões relacionadas directa ou indirectamente com a energia.

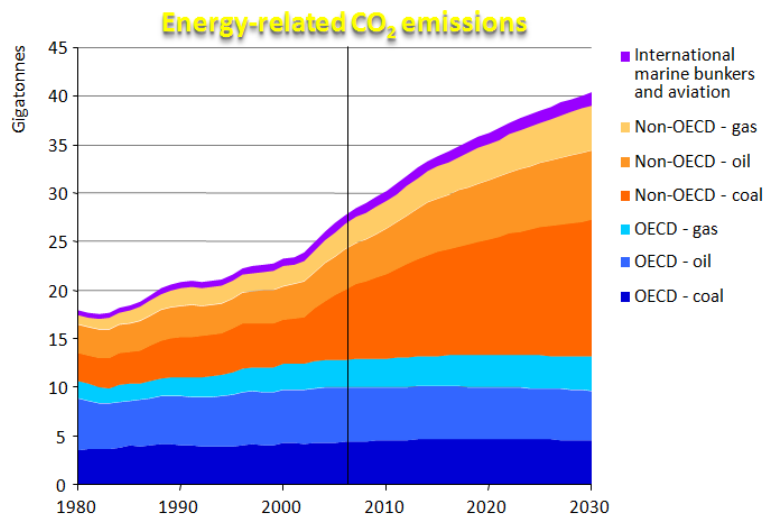


Figura 1.7- Emissões mundiais de CO_2 entre 1980 e 2007 e projecção até 2030 [3]

A crescente evidência dos problemas ambientais deve-se a uma combinação de factores, que potenciam o recurso a energias que provocam os efeitos supracitados: aumento da população, aumento do consumo energético, aumento da actividade industrial,....

No relatório Brundtland das Nações Unidas é definido o desenvolvimento sustentável “se resolve as necessidades do presente sem comprometer o futuro”. [7]

Se a economia crescer de acordo com as expectativas, mesmo que sejam feitos esforços no sentido de melhorar a eficiência energética, é de esperar que haja um aumento significativo no consumo energético. É hoje geralmente aceite que o recurso a fontes de energias renováveis consegue satisfazer grande parte da procura energética, a preços que são iguais, ou até mesmo inferiores, àqueles que se perspectivam para a energia convencional, à base de combustíveis fósseis.

Estima-se que a meio do século XXI, três quintos das necessidades energéticas mundiais, sejam satisfeitos à custa de fontes de energia renováveis. A transição para fontes de energia renováveis permitiria ainda que se obtivesse benefícios ambientais e outros benefícios, que não podem ser avaliados numa simples análise económica. [4]

Portugal é um país altamente dependente do exterior do ponto de vista energético. O País importa cerca de 85% da energia que consome [8], valor que em 2008 representou 4,9% do PIB Nacional [9], tendo implicações enormes ao nível do desenvolvimento económico Nacional. A esse valor acresce ainda o facto de 81% dessa energia ter origem nos chamados combustíveis fósseis, como se pode verificar na Figura 1.8, que provoca importantes impactos ambientais. Esta situação torna Portugal num dos Países mais vulneráveis da Europa em termos de abastecimento Energético.

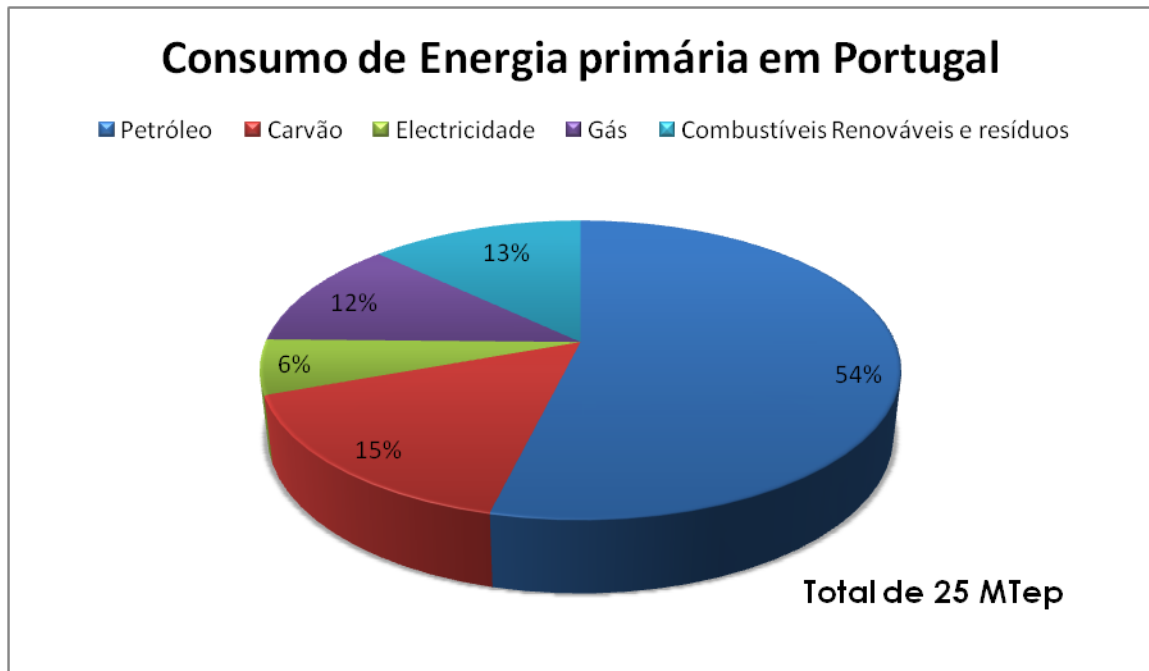


Figura 1.8-Consumo de Energia primária em Portugal [10]

Portugal possui vastos recursos energéticos renováveis, que poderão vir a ser essenciais para superar qualquer crise energética que possa vir a acontecer no futuro. Um investimento na área das fontes de energia renovável, assim como uma melhoria na eficiência energética, evitando o desperdício, podem vir a ser cruciais para um crescimento sustentável da economia portuguesa.

Apesar de a localização de Portugal ser propícia à produção de energia a partir de sistemas fotovoltaicos, a produção energética é insignificante, face à demanda energética Nacional, como se pode verificar na Figura 1.9, a produção energética Nacional de origem fotovoltaica rondou os 0,35% da energia eléctrica total produzida em Portugal no Ano de 2008.

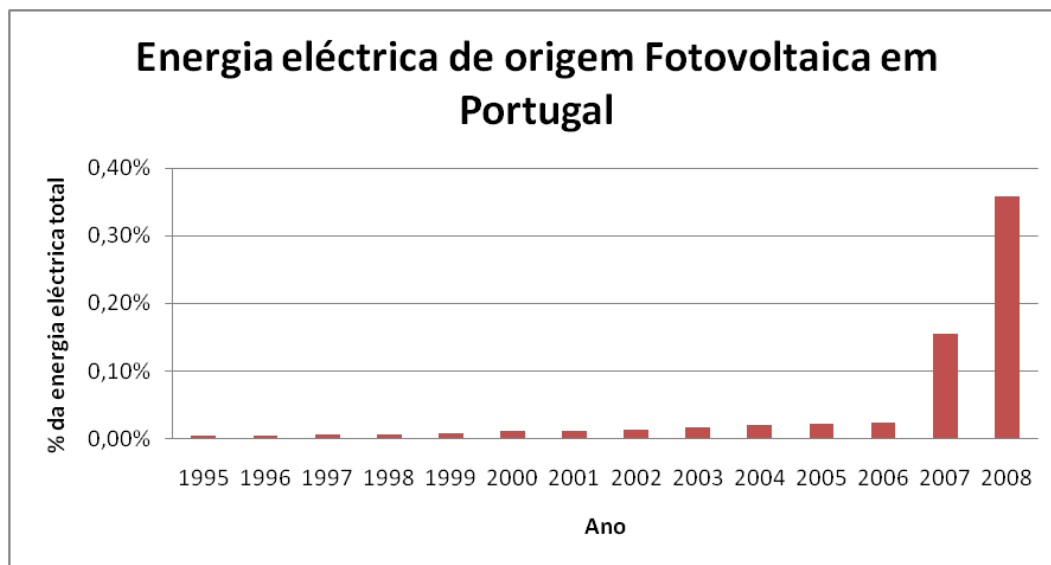
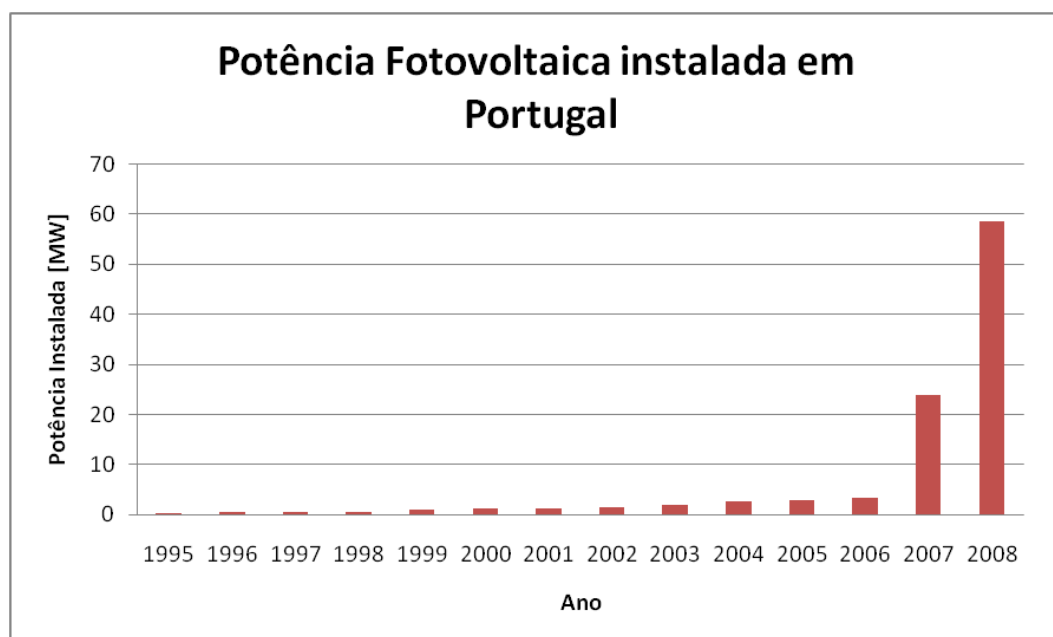


Figura 1.9 – Produção de energia eléctrica fotovoltaica em Portugal [8]

Apesar de tudo, a produção tem vindo a aumentar de um modo exponencial, tendo a potência instalada, atingido o valor de 58,5 MW em 2008, um valor duas vezes e meio superior à potência instalada em 2007 e cerca de 17 vezes superior à de 2006, como é visível na figura 1.10 é também de esperar que a potência instalada continue a aumentar, de um modo significativo nos próximos anos. Tem contribuído para este aumento, sobretudo, uma descida significativa do preço dos módulos fotovoltaicos e, por outro lado um aumento do preço das formas de energia convencional, à base de combustíveis fósseis.



3

Figura 1.10 – Potência foto voltaica instalada em Portugal [8]

1.3. Objectivos do projecto

O objectivo deste projecto é estudar a implementação de um sistema de refrigeração do ar ambiente no interior de uma caravana de modo a que esta possa funcionar de um modo autónomo. Pretende-se um sistema de climatização ambiente baseado num ciclo de compressão de vapor, accionado por um sistema fotovoltaico.

São objectivos deste projecto:

- Estudo e classificação das tecnologias de produção de energia eléctrica de origem fotovoltaica;
- Estudo e classificação de um sistema de climatização baseado num sistema de compressão de vapor
 - Cálculo das cargas térmicas de arrefecimento da caravana
 - Selecção de um aparelho de climatização baseado num ciclo de compressão de vapor, para a caravana;
 - Selecção de um sistema fotovoltaico para a caravana
 - Simulação em Fluent da evolução da temperatura do ar no interior da caravana, na ausência de um sistema de arrefecimento;
- Simulação da evolução em Fluent da evolução da temperatura do ar no interior da caravana, para a carga de arrefecimento considerada;

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

2. Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos têm como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico que consiste na conversão directa da radiação solar em electricidade utilizando semicondutores. À energia eléctrica gerada é comum chamar-se energia fotovoltaica

A energia gerada por conversão fotovoltaica satisfaz os requisitos necessários para tornarem esta tecnologia sustentável a longo prazo. Durante a conversão fotovoltaica não há qualquer transformação química e, consequentemente, libertação de qualquer tipo de gás que possa ser prejudicial. Também não emite qualquer tipo de ruído.

A energia fotovoltaica é altamente modular. As suas instalações podem variar entre alguns miliWatt, para produtos consumíveis, até vários megaWatt, para grandes centrais eléctricas. Por este facto, a sua energia gerada, pode ser facilmente adaptada, de acordo com a necessidade energética, ou disponibilidade financeira que haja no momento [11].

2.1. Componentes de um sistema fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos necessitam de vários equipamentos para funcionarem em pleno. Para além dos módulos fotovoltaicos, necessitam ainda de um inversor, no caso de se pretender corrente alternada, e no caso dos sistemas autónomos torna-se indispensável a utilização de um acumulador e de um controlador de carga.

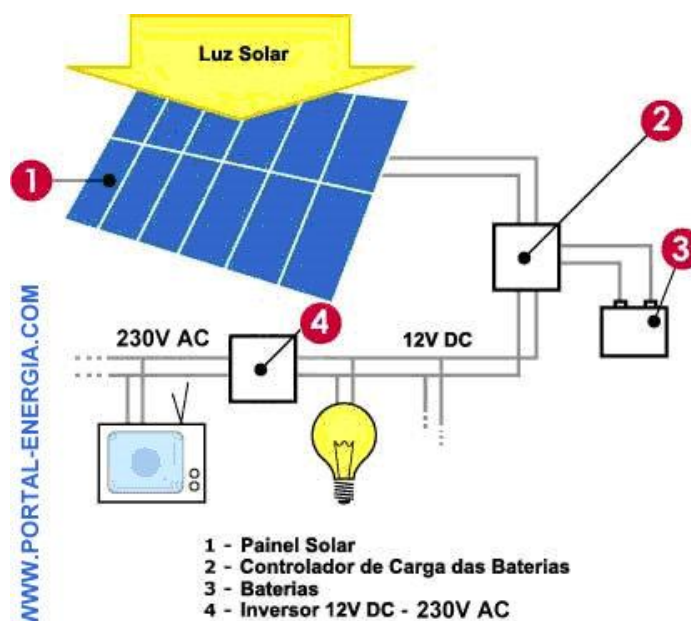


Figura 2.1: Representação de um sistema fotovoltaico [12]

2.3.1.Módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas, ligadas de tal modo que satisfaçam a necessidade eléctrica pretendida (Uma única célula fotovoltaica tem uma potência extremamente reduzida, pelo que estas são ligadas em série, ou paralelo), assim como o material de encapsulamento das mesmas de forma a garantir o isolamento, estanquicidade, assim como transparência à radiação exterior de forma a garantir o bom funcionamento das células.

Os módulos fotovoltaicos são usualmente classificados do seguinte modo: Quanto ao material celular utilizado podem ser módulos monocristalinos, policristalinos, de película fina, híbridos, ..., quanto ao material de encapsulamento (módulos Teflon, módulos de resina fundida), quanto à tecnologia de encapsulamento (laminagem), quanto à tecnologia do substrato (módulos de película fina, módulos vidro-película, módulos metal-película, módulos de plástico-acrílico, módulos vidro-vidro), quanto à estrutura de armação (módulos com armação, módulos sem armação), em função de funções específicas de construção (módulos de vidro de segurança endurecido, módulos de vidro isolante, módulos de vidro isolante para coberturas de vidro, módulos de vidro laminado)

Conforme já foi acima referido, as células que constituem um módulo fotovoltaico, podem estar ligadas em série, ou paralelo, tendo estas ligações efeitos distintos nas suas

características. A figura seguinte representa uma curva Intensidade vs Tensão para a ligação de células idênticas em série e em paralelo.

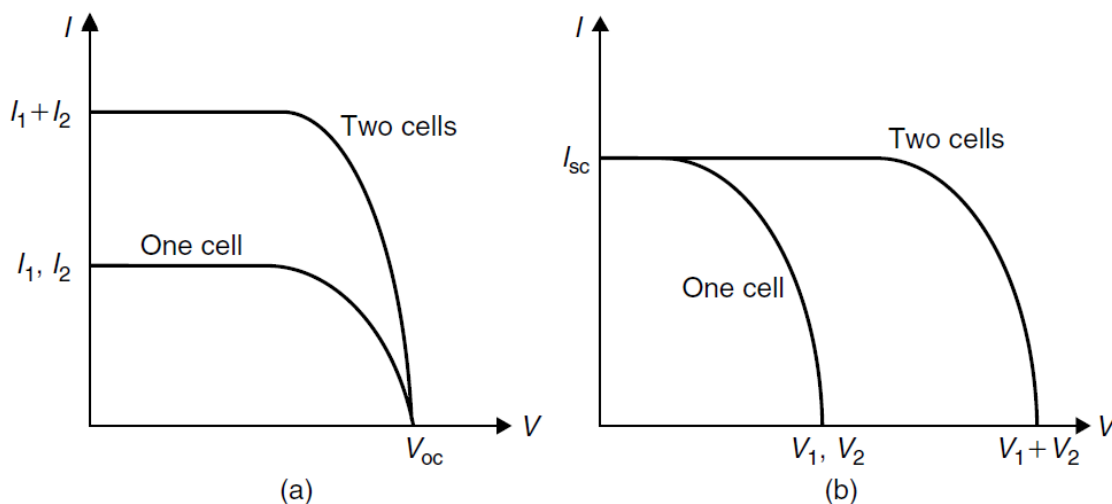


Figura 2.2: Representação das curvas IV para ligação de células em série (b) e em paralelo (a) [4]

No caso de a ligação ser feita em paralelo, Figura 2.2.a, a tensão nos terminais da célula mantém-se constante, duplicando a Intensidade de corrente. No caso de a ligação ser

feita em série, Figura 2.2.b, a Intensidade de corrente mantém-se, duplicando o valor da tensão. [4]

A ligação de dois módulos fotovoltaicos tem o mesmo princípio. Assim, pode-se optar por ligar dois módulos em série, ou em paralelo, conforme haja necessidade de aumentar a corrente eléctrica, ou a tensão.

O armazenamento da energia é um tema central no aproveitamento da energia solar nos sistemas autónomos, dado que a produção e o consumo de energia não coincidem, quer ao longo do dia, quer ao longo do ano.

Nas instalações fotovoltaicas, o tipo de acumuladores mais comuns são os electroquímicos, especialmente as baterias de ácido de chumbo. Estas baterias têm a melhor relação preço-eficiência, e podem assegurar elevadas e reduzidas correntes de carga com boa eficiência. Nos sistemas fotovoltaicos, a capacidade de armazenamento situa-se geralmente entre 0,1 e 100 kWh. [11] O desempenho de um acumulador de energia é geralmente avaliado em termos de capacidade de carga e tensão [11].

O tempo de vida útil de um acumulador é crucial para se avaliar, o custo pós-instalação, de um sistema fotovoltaico autónomo, devendo procurar evitar-se ao máximo a sua necessidade de substituição. É necessário então ser extremamente cuidadoso no dimensionamento do sistema fotovoltaico: se o módulo fotovoltaico for demasiado pequeno para os acumuladores, estes ficarão descarregados diversas vezes e, terão em consequência um tempo de vida mais curto. Se ao invés disso, o módulo for sobredimensionado, as baterias atingirão várias vezes a plena carga, aumentando o seu tempo de vida [11].

As baterias representam um custo acrescido durante a vida útil de um sistema fotovoltaico, podendo ter de ser alteradas por diversas vezes mediante a sua utilização. Os controladores de carga, são o elo de ligação entre o módulo fotovoltaico, as baterias, e as cargas. Eles previnem que as baterias entrem em sobrecarga, ou em descarga total, aumentando assim o tempo de vida útil das mesmas. Os controladores de carga, impedem ainda que haja um descarregamento das baterias, quando a tensão do gerador fotovoltaico seja inferior à das baterias.

Num sistema fotovoltaico, o armazenamento de energia nos acumuladores e o fornecimento de energia para consumo é feito sob a forma de um sinal contínuo. Os inversores autónomos são então utilizados para possibilitar o uso de aparelhos AC convencionais de 230 V, 50 Hz, a partir da rede DC.

Este tipo de dispositivos são essenciais nos sistemas ligados à rede, para que a energia a transmitir à rede tenha as mesmas características que a da rede.

2.2. Princípios funcionais de uma célula fotovoltaica

As células fotovoltaicas são dispositivos bastante simples. São constituídas por semicondutores, geralmente à base de silício, que tem capacidade de absorver a luz e produzir uma corrente eléctrica.

Para que o Silício funcione como um gerador de energia, o retículo cristalino é contaminado por um “átomo dopante”.

Se ao retículo for adicionado um átomo (uma impureza) com um electrão de valência a mais que o do silício (impureza n), fica um electrão supérfluo por cada átomo (n) introduzido. Este electrão pode mover-se livremente dentro do cristal e por isso transportar carga eléctrica. O material dopado por uma impureza n chama-se semi-condutor do tipo n. Isto obtém-se quando os átomos de Si são substituídos por átomos do grupo V da tabela periódica, tais como o As, o Sb, ou o P.

Se ao retículo for adicionado um átomo (uma impureza) com o número de electrões de valência inferior ao Silício (impureza p), fica disponível uma lacuna por cada átomo introduzido. Os electrões dos átomos vizinhos de Silício podem preencher este orifício, resultando na produção de uma nova lacuna noutro lugar. O material dopado por uma impureza p chama-se semi-condutor do tipo p. Isto obtém-se adicionando um material do grupo III da tabela periódica tais como o Ga(Galio), o In (índio) ou o Bo (Boro).[11]

Se juntarmos as camadas dos semicondutores n e p, produziremos uma região de transição pn, o que leva à difusão dos electrões supérfluos do semi-condutor p da junção. Cria-se assim uma nova área designada por barreira de potencial. Na zona n da região de transição, os átomos dopantes positivos são remetidos para trás, acontecendo de modo semelhante com os negativos da área p. É criado assim um campo eléctrico que se mantém contrário ao movimento dos portadores de carga (por esta razão a difusão não se mantém infinitamente).

Se um semicondutor pn (célula fotovoltaica) é exposto à luz, os fotões são absorvidos pelos electrões. As ligações entre electrões são quebradas por este fornecimento de energia. Os electrões libertados são conduzidos através do campo eléctrico para a área n. As lacunas assim criadas seguem na direcção contrária para a área p. (este processo denomina-se efeito fotovoltaico). A difusão dos portadores de carga até aos contactos eléctricos produz tensão na fronteira da célula fotovoltaica.

A Figura 2.3 ilustra o funcionamento da junção p-n acima descrita

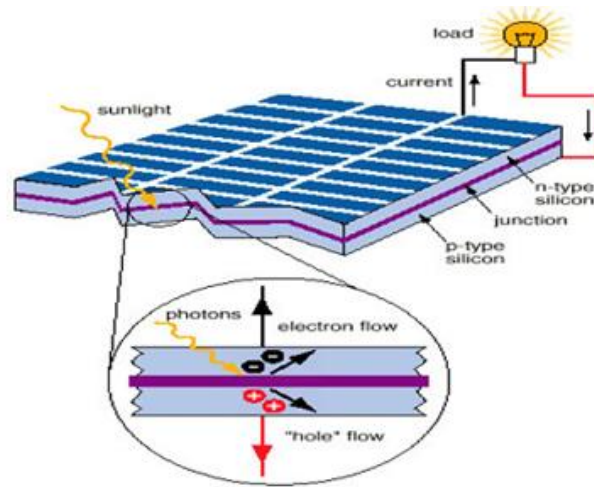


Figura 2.3 Representação de uma junção p-n [14]

As células são integradas células num circuito eléctrico, unindo contactos metálicos em ambos os lados da célula. Na face da célula que está orientada para o Sol, é utilizada uma fina malha metálica, para minimizar a área de sombreamento. Os contactos da zona anterior são normalmente unidos, utilizando um processo de impressão em tela. Durante este processo, uma massa metálica é pressionada sobre a pastilha de Silício através de uma máscara. As linhas de contacto, têm neste procedimento uma largura situada entre 0,1 mm e 0,2 mm. Duas linhas significativamente mais espessas, que são soldadas com os contactos da zona posterior da célula vizinha, atravessam as finas linhas de contacto.

Foram desenvolvidas tecnologias especiais para as células fotovoltaicas de elevada potência, no sentido de melhorar as suas características de contacto e minimizar a reflexão na superfície da célula. Um exemplo é o chamado “*procedimento Saturno*”. Neste caso, a linha de contacto é cortada por raios laser. A largura das linhas de contacto é significativamente reduzida para 0,02 mm, quando comparada com a técnica de impressão em tela. [13]

Em contraste com os contactos frontais, os contactos posteriores podem ser aplicados em toda a extensão do espaço da parte posterior da célula. Embora não sejam visíveis nos módulos Standard que possuem uma cobertura opaca traseira, são visíveis em módulos especiais para integração em edifícios com uma cobertura traseira transparente, e podem ser utilizados como mais um elemento de desenho arquitectónico.

2.3. Tipos de células fotovoltaicas

A indústria fotovoltaica ainda está na sua infância e, neste momento, é muito difícil de prever que técnicas e padrões sociais e económicos se irão desenvolver até esta tecnologia atingir a sua maturidade. A história recente da indústria fotovoltaica revela uma actividade intensa de pesquisas envolvendo áreas muito diversas, células solares orgânicas face a células inorgânicas, semicondutores intrínsecos face a semicondutores extrínsecos, homojunção face a heterojunção, amorfas face a cristalinas, são alguns dos (dilemas) que levarão anos, senão décadas até que o homem tenha habilidade suficiente para responder e finalmente dominar esta tecnologia.

Nos dias de hoje, o semiconductor dominante é o silício, particularmente o silício cristalino. [7] A figura que seguinte representa os principais tipos de células fotovoltaicas, fabricadas a partir de silício.

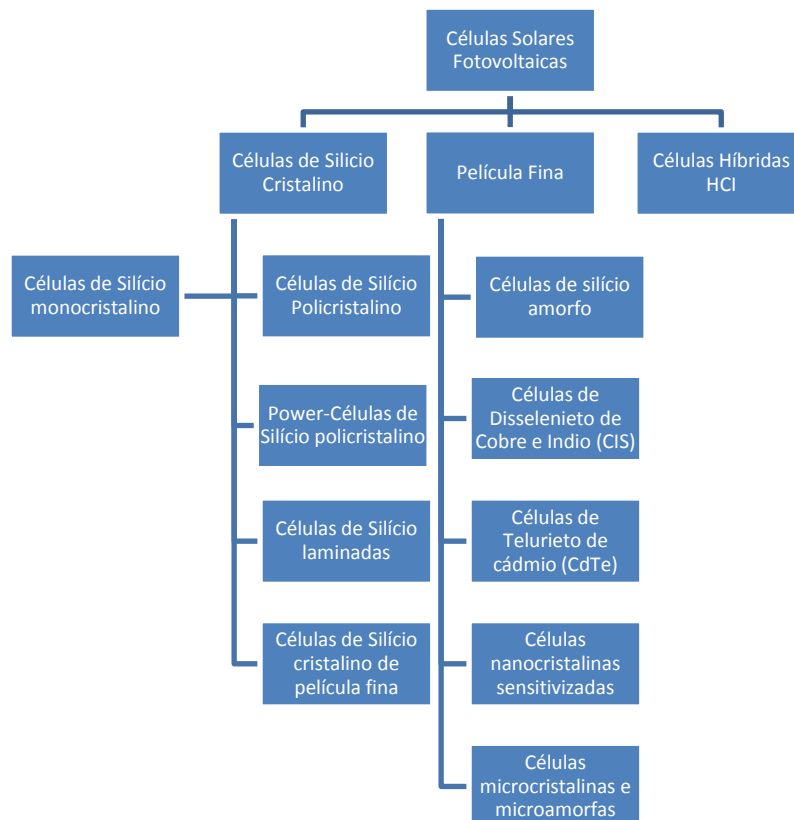


Figura 2.4: Células fotovoltaicas de Silício

As células de Silício cristalino, figura 2.4, têm dominado a tecnologia fotovoltaica desde o início, constituindo hoje em dia 85% do mercado de fotovoltaicos. Apesar de o seu domínio ter vindo a decair face a outras tecnologias, é de esperar que se mantenham na liderança pelo menos na próxima década [11]. A principal razão para a predominância que silício cristalino tem no mercado dos fotovoltaicos é o facto de a microelectrónica ter desenvolvido os processos de produção de Silício, o que permitiu uma descida dos preços desta matéria-prima.

A célula fotovoltaica clássica de Silício cristalino, é composta por duas camadas de Silício contaminadas com diferentes impurezas. A camada orientada para o Sol está contaminada negativamente com fósforo, e a camada inferior está contaminada positivamente com boro. É produzido um campo eléctrico na junção das duas camadas, que conduz à separação das cargas (electrões e lacunas) libertadas pela luz solar. No intuito de gerar electricidade a partir da célula fotovoltaica, são impressos contactos metálicos nas suas partes frontal e posterior. Em geral, e neste contexto, é utilizada a impressão em tela. É possível conseguir uma camada de contacto em toda a extensão da célula, com a aplicação de uma folha de alumínio ou prata na parte posterior. No entanto, a parte frontal deverá ser tão translúcida quanto possível. Aqui, os contactos são essencialmente aplicados na forma de uma grelha fina ou numa estrutura de árvore. A reflexão pode ser reduzida, com o depósito por vapor de uma camada mais fina (camada anti-reflexão) na parte frontal da célula solar, feita de nitreto de silício ou dióxido de titânio.

Nas células de silício monocristalino, figura 2.4, o silício é constituído por um único cristal praticamente sem defeitos e impurezas [4]. A grande vantagem das células monocristalinas é a sua elevada eficiência, que varia entre os 15 e os 18 %, no caso das células fabricadas a partir de silício produzido pelo método de Czochralski [11]. No caso de o Silício ser produzido a partir do processo de zona flutuante, processo extremamente dispendioso, a eficiência pode aumentar entre 1 e 2 %.

A grande desvantagem das células de Silício monocristalino é a complexidade do processo de fabrico que eleva razoavelmente o preço.

As células de silício policristalino, figura 2.4, são constituídas por inúmeros grãos de silício monocristalino. A grande vantagem das células de silício policristalino é o seu preço, face às células de silício monocristalino. A eficiência destas células é no entanto mais baixa do que as construídas à base de silício monocristalino.

Existem vários métodos para a obtenção de silício policristalino, dos quais resultam eficiências e custos distintos. Pelo método clássico de fabrico de células de Silício Policristalino por corte de um lingote de Silício obtido por fundição consegue-se uma eficiência que pode variar entre os 13 e os 15 %. Os principais tipos de células que existem para além das obtidas pelo método clássico são as POWER, que tem uma eficiência de 10% para uma transparência de 10% [9], as EFG, as de caixa de filamentos, as de rede dendrítica e as células policristalinas APEX. Estas últimas quatro, surgiram com o objectivo de reduzir as perdas de Silício e de energia durante as operações de serragem (cerca de metade do Silício utilizado no fabrico de células por corte de lingote de fundição é perdido) e, assim reduzir significativamente os custos de produção. Esta diminuição no custo também é conseguida pela possibilidade de reduzir a espessura da célula, que no caso de corte do lingote é limitada

mecanicamente a 0,3mm. As eficiências são de 14% no caso das células policristalinas EFG, 12 % no caso das células de faixa de filamentos, 13 % no caso das de rede dendrítica e 9,5 % no caso das células Policristalinas APEX.[13]

Desde a década de 90, o desenvolvimento dos processos de película fina, figura 2.4, para fabricar células solares, tem-se tornado cada vez mais importante [15] Nesta tecnologia, os semi-condutores são aplicados em finas camadas num substrato. Devido à elevada absorção luminosa dos materiais utilizados no fabrico deste tipo de células, é necessária uma camada de material semi-condutor com uma espessura significativamente menor que a utilizada nas tecnologias convencionais.

Os menores consumos de energia e de material, assim como a elevada capacidade de automatização da produção em larga escala, oferecem um potencial enorme na redução dos custos de produção nesta tecnologia, quando comparada com a tecnologia de produção de Silício cristalino [13].

Uma característica das células de película fina que as diferencia das células cristalinas, é o tipo de interligação. Enquanto as células cristalinas estão soldadas de célula para célula, as células de película fina estão interligadas monoliticamente (interligação interna).

Apesar de as células de película fina terem em geral, uma baixa eficiência, quando comparadas com outro tipo de tecnologias existentes, a energia produzida pode ser, sob certas condições, bastante considerável. De facto, as células de película fina, conseguem ter um melhor desempenho que as outras tecnologias, para baixos níveis de radiação e para radiações do tipo difuso. Este tipo de células tem também um coeficiente de temperatura mais favorável, pelo que o seu rendimento não é tão afectado por variações da temperatura.

De entre as chamadas células de película fina destacam-se as Células de Silício amorfo, com uma eficiência de 5 a 8%, as células de Diselenieto de Cobre e Índio (CIS) que possuem uma eficiência de 7,5 a 9,5 % e as células de Telurieto de Cádmio (CdTe) , detentoras de uma eficiência de 6 a 9%. A espessura de material semiconductor é significativamente mais baixa do que a obtida pelos métodos convencionais (0,3mm no caso das células de Silício cristalino). Obtém-se células com um revestimento de Silício amorfo de apenas 0,001mm sob o substrato, espessura esta que toma o valor de 0,003mm no caso das células CIS e de 0,008mm no caso das CdTe.

As Células solares híbridas, figura 2.4, resultam da combinação das células de película fina com as células cristalinas clássicas. Uma pastilha monocristalina do tipo p é revestida em ambos os lados por uma fina camada de Silício amorfo do tipo p, tendo como camada intermédia, uma ultrafina camada intrínseca de silício sem impurezas (de onde vem a denominação HCI-heterojunção com uma camada fina intrínseca). Enquanto nos outros semi-condutores, a junção p-n é constituída pelo mesmo tipo de materiais, nas células HCI, a junção é entre semicondutores diferentes.

A grande vantagem das células HCI é terem uma maior eficiência do que as células convencionais a elevadas temperaturas, aliada a uma eficiência também muito boa 17,3%.

De entre as células fotovoltaicas que não são feitas à base de Silício, destacam-se as constituídas pelos chamados semicondutores III-V. Trata-se de células solares de elevada eficiência constituídas pela combinação de elementos do grupo III e do grupo V da tabela periódica. Apesar de terem uma eficiência muito elevada, superior a 30%, o seu preço muito elevado, tornam o uso deste tipo de células exclusivas à indústria aeroespacial.

A Figura 2.5 compara a eficiência das células fotovoltaicas laboratoriais entre 1975 e 2009, verificando-se um aumento considerável da eficiência neste intervalo de tempo.

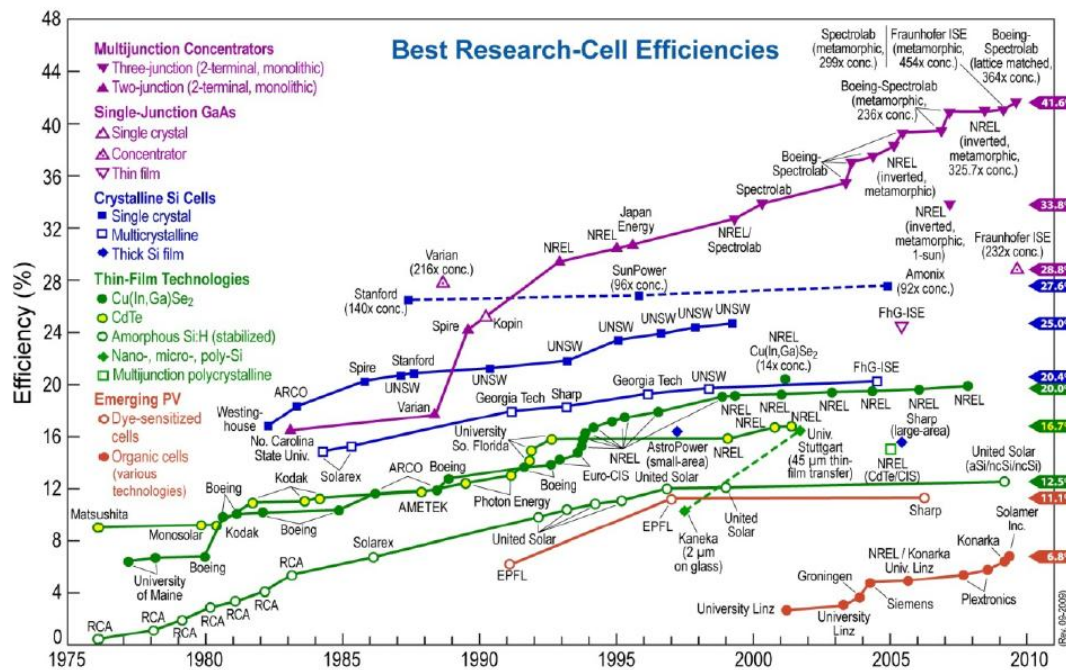


Figura 2.5:-Eficiência das células solares em Laboratório de 1975 até 2009 [15]

2.4. Tipos de Sistemas fotovoltaicos

Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos: os sistemas autónomos e os sistemas ligados à rede. Os Sistemas autónomos foram a primeira aplicação prática da tecnologia fotovoltaica. A aplicação destes sistemas faz-se em casos onde o fornecimento de energia através da rede pública de electricidade não se verifica, por razões de ordem técnica. Nestas circunstâncias, a implementação de um sistema fotovoltaico, pode ser uma alternativa atractiva, do ponto de vista técnico, económico, bem como ambiental.

As sucessivas evoluções tecnológicas e a diminuição dos custos de produção, podem contribuir para a generalização deste tipo de instalações, com particular interesse, para os países em vias de desenvolvimento, que têm vastas áreas que permanecem sem fornecimento de energia eléctrica. [7]

Uma outra aplicação de sistemas fotovoltaicos autónomos é em pequenos dispositivos electrónicos, como sejam máquinas de calcular, lanternas, carregadores de pilhas, ...

As figuras que se seguem mostram uma série de dispositivos fotovoltaicos autónomos

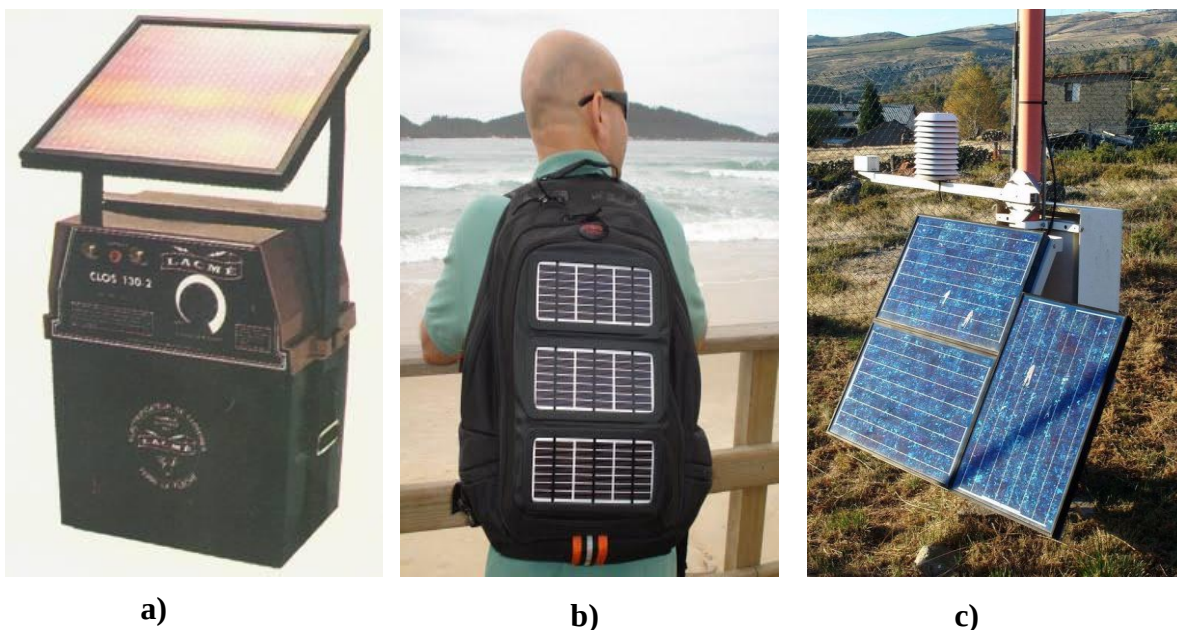


Figura 2.6:Exemplos de aplicações se sistemas fotovoltaicos autónomos [16,17,18]

Na practica, os sistemas autónomos precisam de acumular energia para compensar as diferenças existentes no tempo entre a produção de energia e a sua procura. As baterias recarregáveis são consideradas apropriadas como acumuladores de energia. A utilização de acumuladores obriga a que se torne indispensável a utilização de um regulador de carga

adequado, que faça a gestão do processo de carga, de forma a garantir uma elevada fiabilidade e um maior tempo de vida útil dos acumuladores.

Por outro lado, os sistemas ligados à rede constituem a principal aplicação dos módulos fotovoltaicos nos países desenvolvidos. O seu uso é essencialmente para habitações, indústria e serviços, existem também no entanto, grandes parques de produção eléctrica. A maioria da energia de origem fotovoltaica provém dos chamados sistemas híbridos, onde apenas uma parte da electricidade é vendida à rede, ficando a restante disponível para consumo interno da empresa, ou habitação, detentora do sistema fotovoltaico.

Estes sistemas, constituem uma alternativa, às energias convencionais, na produção de electricidade. A quantidade de energia eléctrica com origem neste tipo de sistemas tem vindo a subir rapidamente à medida que a tecnologia fotovoltaica se vai tornando mais competitiva do ponto de vista económico. As figuras seguintes mostram um dos maiores parques de produção fotovoltaica existentes: a central fotovoltaica de Moura.

Os sistemas ligados à rede necessitam para além do módulo fotovoltaico, apenas de um inversor de corrente

Para os sistemas solares com ligação à rede pública, geralmente são utilizadas células solares de Silício monocristalino e policristalino [11]. A menor eficiência do Silício policristalino é contrabalançada pelas vantagens que oferece em termos económicos, que advém dos menores custos de fabrico.



Figura 2.7: Central fotovoltaica de Moura [19],[20].

2.5. Curvas características I-V das células fotovoltaicas

Se a luz incidir sobre uma célula fotovoltaica, quando o circuito eléctrico estiver aberto, o que é correspondente a um circuito de resistência infinita, irá gerar-se uma tensão eléctrica máxima (Tensão de circuito aberto – V_{oc}), Figura 2.8. Se por outro lado, for feito um curto-circuito entre os contactos da célula, correspondente a uma resistência eléctrica nula, poder-se-á calcular a corrente máxima da célula (corrente de curto-circuito – I_{sc}), figura 2.8. Haverá portanto uma variação da tensão e da corrente, consoante a resistência do circuito eléctrico entre os contactos da célula, esta variação é visível na chamada curva característica tensão-corrente, representada na Figura 2.8

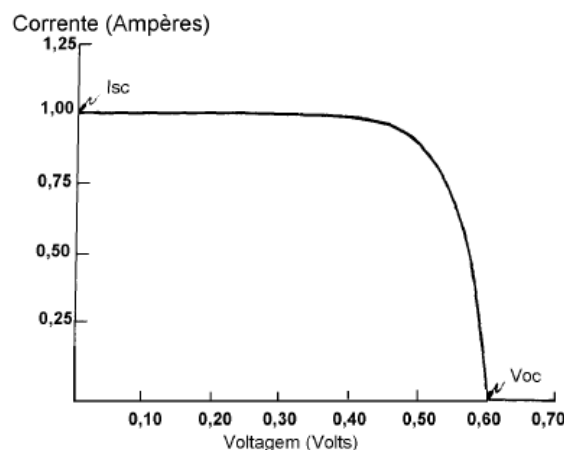


Figura 2.8: curva característica corrente- tensão de uma célula fotovoltaica [21]

O produto do valor da tensão pelo valor da intensidade de corrente para uma dada resistência eléctrica no circuito, tem como resultado a potência eléctrica. A Figura 2.9 Representa a sobreposição das curvas I-V e P-V. A potência nominal da célula – MPP, corresponderá ao ponto de potência máxima e será o valor máximo da curva P-V.

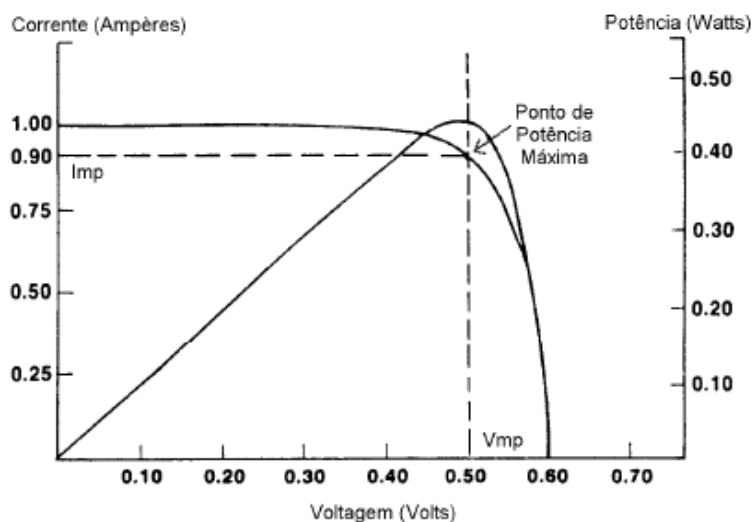


Figura 2.9: curva característica corrente- tensão e corrente-potência de uma célula fotovoltaica [21]

A curva característica sofre alterações consoante a radiação incidente na célula solar, ou a temperatura solar sejam maiores ou menores. Conforme se pode visualizar na Figura 2.9(a), a tensão do circuito aumenta de um modo logarítmico com o aumento da radiação incidente na célula, enquanto a intensidade de corrente aumenta de um modo linear.

A influência da temperatura nas células solares está representada na Figura 2.9 (b). A tensão diminui com o aumento da temperatura, o que provoca uma diminuição da eficiência da célula, apesar de um ligeiro aumento da intensidade da corrente.

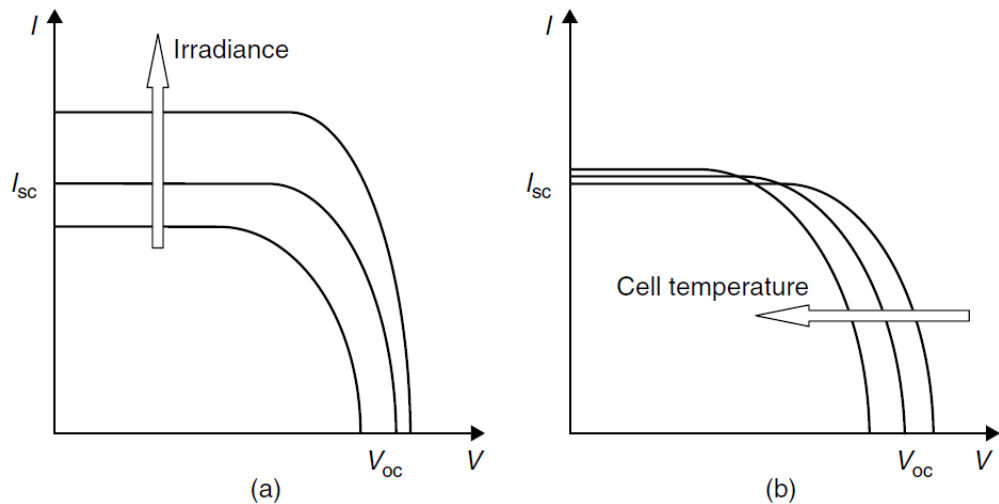


Figura 2.10: Influência da temperatura e da radiação incidente na curva tensão-corrente de uma célula fotovoltaica [4]

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

3. Sistema de refrigeração

É do conhecimento comum que há transferência de calor entre um corpo a uma dada temperatura, para outro a uma temperatura inferior. É um processo que ocorre naturalmente, sem ser necessário qualquer dispositivo que auxilie a transferência de calor entre esses mesmos corpos. O processo inverso, transferência de calor de um corpo, para outro a uma temperatura superior, não é espontâneo, e necessita de dispositivos exteriores que provoquem essa transferência de calor; a esses dispositivos dá-se o nome de “máquinas frigoríficas”. [22]

Apesar de o processo de refrigeração por compressão de vapor ter sido demonstrado por William Cullen em 1748 [24], a primeira máquina frigorífica foi construída por Jakob Perkins em 1834 e usava éter, num dispositivo de compressão de vapor.[25]

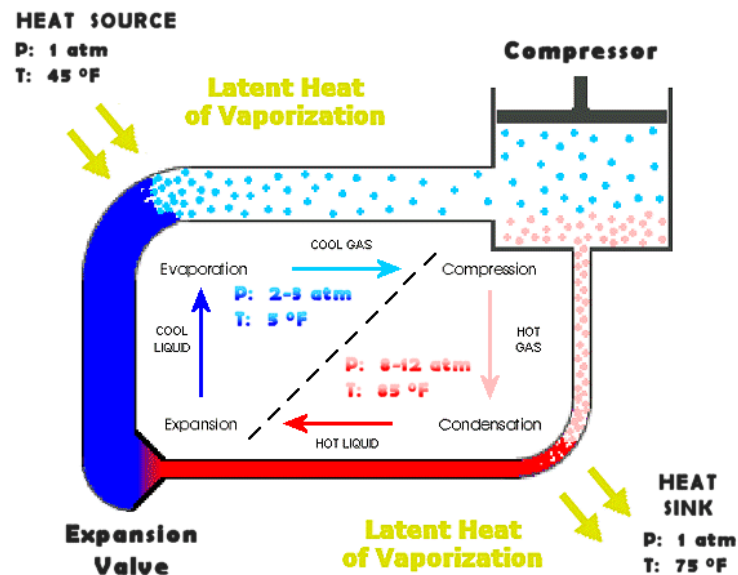


Figura 3.1: Representação de um ciclo de compressão de vapor [23]

As máquinas frigoríficas, operam segundo um ciclo. O fluido de trabalho num ciclo de refrigeração é chamado frigorigénio. O ciclo de refrigeração mais utilizado é o ciclo de compressão de vapor, Figura 3.1 cujos principais componentes são: um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador.

O frigorigénio entra no compressor no estado de vapor, sendo então comprimido até à pressão de condensação. Deixa o compressor a uma temperatura relativamente elevada e arrefece e condensa à medida que flui pelo condensador, rejeitando calor para a vizinhança. Entra então num tubo capilar onde a pressão e a temperatura caem drasticamente devido ao “efeito de estrangulamento”. O refrigerante, a baixa temperatura entra então no evaporador, onde evapora, absorvendo calor do espaço a refrigerar. O ciclo é completado assim que o refrigerante deixa o evaporador e volta a entrar no compressor [22].

A eficiência de uma máquina frigorífica é também designada po COP (do Inglês Coefficient of Performance). O COP de uma máquina frigorífica não é mais do que a razão entre o calor retirado – Q_L , a que se dá o nome de efeito frigorífico, e o trabalho realizado pelo compressor - W_c para que se atinja esse mesmo valor de Q_L . Assim, o COP de uma máquina frigorífica pode ser exprimido da seguinte forma [23]:

$$COP = \frac{Q_L}{W_c} \quad (3.1)$$

Onde, pelo principio da conservação da energia

$$W_c = Q_h - Q_l \quad (3.2)$$

Entao , o COP será dado por

$$COP = \frac{Q_l}{Q_h - Q_l} = \frac{1}{((Q_h - Q_l) - 1)} \quad (3.3)$$

3.1. Ciclo de Carnot inverso

Um do enunciados da segunda lei da termodinâmica enunciado de Clasius – diz que:

“É impossível construir um dispositivo a operar continuamente cujo único efeito sobre o exterior seja o da transferência de calor de um corpo a uma dada temperatura para outro a uma temperatura superior”

A Segunda lei da Termodinâmica impõe limites nos dispositivos termodinâmicos a operar ciclicamente, que são expressos pelos enunciados de Kelvin-Planck e Clasius. Uma máquina frigorífica não pode operar sem que lhe seja introduzida energia sobre a forma de trabalho, a partir de uma fonte de energia exterior.

Existem duas conclusões que se podem tirar com base nos enunciados da segunda lei da Termodinâmica, relacionados com a eficiência das máquinas térmicas, que são conhecidos por princípios de Carnot:

A eficiência de uma máquina irreversível, é sempre inferior à de uma máquina reversível a operar entre as mesmas temperaturas.

A eficiência de qualquer máquina reversível a operar entre as mesmas temperaturas é sempre a mesma.

É sabido que o ciclo mais eficiente a operar entre duas fontes térmicas a temperaturas diferentes é o ciclo de Carnot. Uma vez que se trata de um processo reversível, é passível de ser invertido, obtendo-se então o ciclo frigorífico de Carnot.

O ciclo frigorífico de Carnot, representado na Figura 3.2 é constituído por quatro processos, todos eles reversíveis.

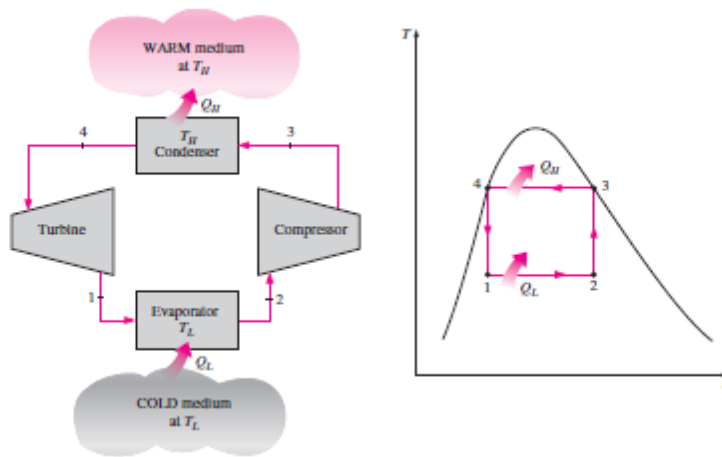


Figura 3.2: Representação do ciclo frigorífico de Carnot [22]

- 1-2: Absorção isotérmica de calor (Q_b)
- 2-3: Compressão adiabática reversível (W_c)
- 3-4: Troca de calor isotérmica (Q_a)
- 4-1: Expansão adiabática reversível (Q_b)

Por se tratar de um ciclo reversível, o COP de um ciclo frigorífico de Carnot, pode ser traduzido pela seguinte expressão:

$$COP = \frac{1}{T_h/T_l - 1} \quad (3.4)$$

, onde T_h é a temperatura da fonte quente e T_l é a temperatura da fonte fria

Sendo o ciclo frigorífico de Carnot o de maior coeficiente de maior eficiência entre duas dadas temperaturas, seria vantajoso que, do ponto de vista pratico ele pudesse ser implementado. Porém a sua implementação, levanta algumas questões:

As duas transformações isotérmicas (1-2 e 3-4) conseguem-se obter na prática nos condensadores e evaporadores actuais, com valores muito próximos dos desejáveis, no entanto, os processo 2-3 e 4-1, não conseguem ser obtidos na prática. Isto, porque o processo 2-3 envolve a compressão de vapor húmido, o que requeria um compressor que conseguisse lidar simultaneamente, com duas fases; O processo 4-1 envolve a expansão numa turbina de frigorigénio no estado de vapor húmido.

Estes problemas poderiam ser resolvidos executando o ciclo de Carnot fora da região de saturação, mas neste caso, haveria dificuldades em manter as condições de isotermita durante as fases de absorção e rejeição de calor. Por esta razão, o ciclo de Carnot não é possível de ser construído na prática. Serve, no entanto, como referencia, para os ciclos de refrigeração reais.

3.2. Ciclo simples de compressão de vapor

No ciclo de compressão de vapor, a compressão é efectuada no estado de líquido, e a turbina é substituída por uma válvula de expansão ou por um tubo capilar

O ciclo que resulta destas alterações é o chamado ciclo simples de compressão de vapor, representado na figura 3.3 e que é constituído pelos seguintes processos:

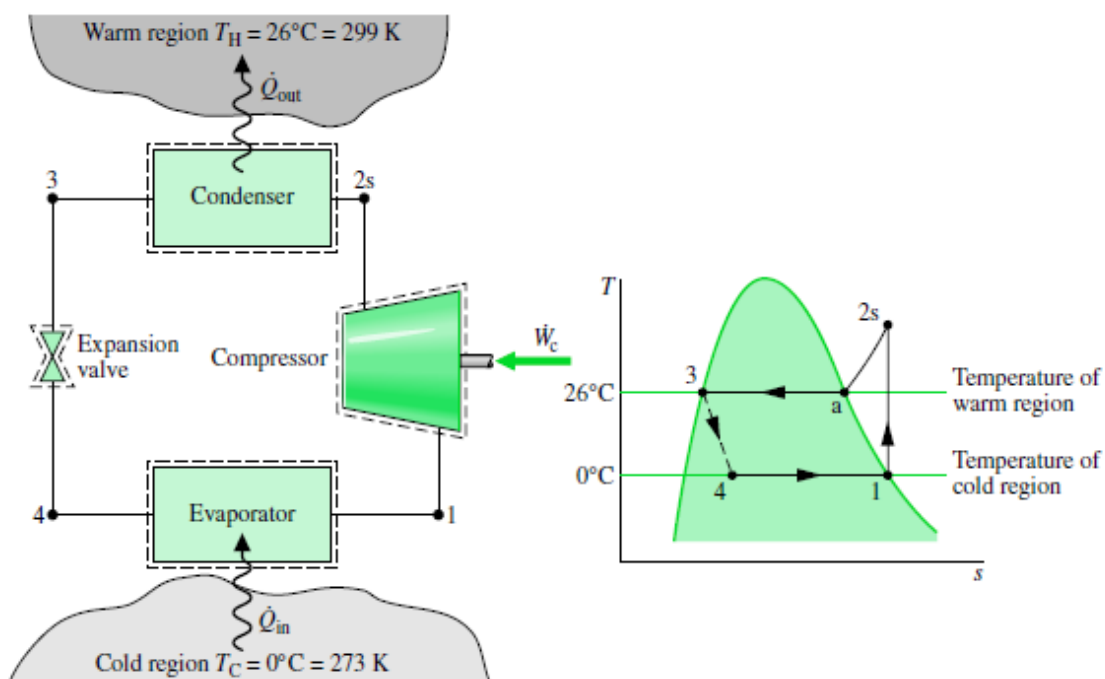


Figura 3.3: Representação do ciclo simples de compressão de vapor [24]

- 1-2: Compressão Isentrópica
- 2-3: Rejeição de Calor Isobárica
- 3-4: Expansão isentalpica
- 4-1: Absorção isobárica de calor

O ciclo simples de compressão de vapor, Figura 3.3 é, ao contrário do ciclo de Carnot irreversível. Uma vez que a expansão isentalpica é irreversível.

3.3. Ciclo real de compressão de vapor

O ciclo real de compressão de vapor difere do ciclo simples, sobretudo devido às várias irreversibilidades que ocorrem nos diversos componentes: perdas de carga do fluido, transferências de calor indesejáveis para a vizinhança, ...

No ciclo simples, o refrigerante deixa o evaporador no estado de vapor saturado, no entanto em termos práticos, é impossível controlar o estado do refrigerante de um modo tão preciso. Assim, é comum dimensionar o sistema de modo a que o refrigerante entre no compressor no estado sobreaquecido, para que não ocorram mudanças de fase no compressor. As perdas de carga, e trocas de calor com o exterior, na ligação entre evaporador e compressor também podem ser significativas. O resultado do sobreaquecimento, da perda de pressão e da troca de calor no evaporador e na ligação evaporador-compressor é um aumento do volume específico, o que implica consequentemente um aumento do trabalho do compressor.

No ciclo simples, a compressão é internamente reversível e adiabática, no entanto, na prática, o processo de compressão envolve fricção, assim como trocas de calor, ocorrendo uma variação de entropia.

No ciclo ideal, é de esperar que o refrigerante saia do condensador no estado de líquido saturado, no entanto, é inevitável haver perdas de pressão no condensador assim como na ligação entre o mesmo e a válvula de expansão. Para além disso, é difícil controlar com precisão se o refrigerante está no estado de líquido saturado, à entrada da válvula, e é indesejável fazer o refrigerante passar na válvula antes de este estar completamente condensado. Portanto, o refrigerante é subarrefecido, antes de entrar na válvula de expansão. Geralmente, a válvula e o evaporador estão próximos, pelo que não é comum que haja perdas de pressão significativas entre ambos.[25]

Assim, o ciclo real de compressão de vapor é geralmente semelhante ao representado na Figura 3.4.

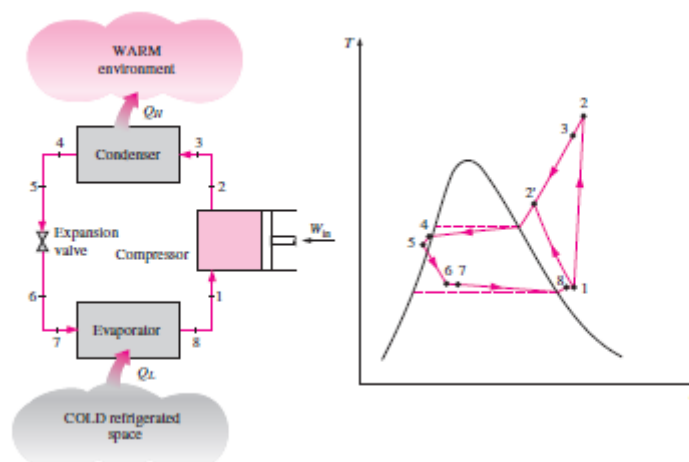


Figura 3.4: Representação do ciclo real de compressão de vapor [22]

3.4. Componentes dos sistemas de refrigeração

Os sistemas de refrigeração são constituídos por, Figura 3.1, compressor, evaporador, condensador e sistema de expansão

3.4.1. Compressores

Num sistema de refrigeração, o compressor tem duas funções, uma delas é bombear refrigerante, desde o evaporador até ao condensador, a outra é aumentar a pressão do refrigerante. Os compressores dos sistemas de refrigeração podem ser agrupados em dois grandes grupos: os volumétricos, ou de deslocamento positivo e os compressores roto-dinâmicos ou de deslocamento cinético, tabela 3.1. Nos compressores volumétricos, é provocada uma variação de volume de refrigerante numa câmara fechada, por forma a comprimir o refrigerante, que é libertado então a alta pressão. Os compressores deste tipo, podem ser alternativos, rotativos, de parafuso ou helicoidais. Nos compressores roto-dinâmicos, o aumento de pressão é conseguido, por uma continua troca de momento angular entre o elemento mecânico em rotação e o fluído sujeito a compressão, transformando assim energia cinética, em energia potencial sob a forma de pressão. Os principais tipos de compressores roto-dinâmicos são os centrífugos e os turbo-compressores.[26] A tabela mostra as diferentes classes e sub-classes de compressores.

Tabela 3.1: Tipos de compressores

Volumétricos					Dinâmicos
Alternativos		Rotativos	Parafuso/ Helicoidais	Espiral/scroll	
Forma	Horizontal	Pistão	Mono Parafuso		Centrífugos
	Vertical				
	V ou W				
Construção	Abertos				
	Semi-herméticos				
	Herméticos	Alhetas			
Número de efeitos	Simples				
	Duplo				
Número de andares de compressão	1 Andar				
	2 Andares				

Ambos os tipos de compressor, podem ser ainda classificados como herméticos, semiherméticos ou abertos. Esta classificação, não tem a ver com o tipo de compressor, mas sim com o modo como o compressor está ligado ao motor de accionamento. Os compressores abertos estão separados do motor de accionamento, sendo a ligação feita, por exemplo, por correias. Nos compressores semi-herméticos, o rotor do motor eléctrico, está montado na própria cambota do compressor estando ambos alojados na mesma estrutura, evitando-se deste modo a utilização de vedantes e, consequentemente as fugas de óleo e refrigerante são mínimas. Nos compressores herméticos, o rotor do motor eléctrico é a própria cambota do compressor, tal como acontecia nos semi-herméticos, estando porém o conjunto suspenso horizontal, ou verticalmente dentro de uma estrutura hermética onde afloram as ligações para as condutas de admissão, descarga e carga do sistema.

3.4.2. Válvulas de expansão

As válvulas de expansão são usadas para passar o refrigerante da pressão de condensação (alta pressão) para a pressão de evaporação (baixa pressão), as válvulas de expansão têm ainda a função de regular o caudal de refrigerante que entra no condensador [26]. Uma outra função que algumas válvulas podem ser chamadas a desempenhar é a de controlar o estado de vapor à saída do evaporador de modo a que possa ser eficientemente comprimido no compressor [25]. Os principais tipos de válvulas de expansão são os seguintes: Válvulas de expansão termoestáticas, válvulas de expansão a pressão constante, válvulas de bóia e tubos capilares.

As válvulas mais comuns nas máquinas frigoríficas. Estas válvulas, utilizadas para fazer a ligação entre o circuito de alta e baixa pressão, são capazes de controlar o caudal de refrigerante à entrada do evaporador, de modo a que seja acertado com a carga do evaporador. Este tipo de válvulas opera com medindo e regulando o caudal em função da temperatura do refrigerante à saída do evaporador.

As válvulas de expansão a pressão constante são basicamente, válvulas reguladoras de pressão. Mantém constante a pressão no evaporador com base no caudal que entra no evaporador.

As válvulas de bóia podem ser de alta ou baixa pressão. Elas são usadas para controlar o caudal de refrigerante. As válvulas de alta pressão, são usadas em sistemas de refrigeração com um único evaporador, e são colocadas no circuito de alta pressão. As válvulas de baixa-pressão localizam-se na zona de baixa pressão do dispositivo de expansão e podem ser usadas em sistemas com múltiplos evaporadores.

Os tubos capilares são tubos de pequeno diâmetro, pelos quais o refrigerante passa entre o condensador e evaporador. Num tubo capilar, a queda de pressão entre o circuito de alta e o de baixa pressão é conseguido através de perdas de carga associadas ao escoamento do refrigerante ao longo do tubo, bem com à sua aceleração. [25]

3.4.3. Condensadores

Existem vários tipos de condensadores, classificados de acordo com o fluido disponível para arrefecimento. Têm-se condensadores a ar, a água e evaporativos

Nos condensadores a ar, o frigorigénio condensa dentro dos tubos circulando o ar no seu lado exterior. Como o coeficiente de transferência de calor do lado do ar é muito pequena, os tubos são geralmente alhetados. Existem condensadores a ar por convecção natural e por convecção forçada, onde a circulação do ar é feita através de um evaporador [25].

Os condensadores a água podem ser de três tipos distintos: Tubo duplo em contracorrente, que são formados por dois tubos concêntricos, passando a água no tubo interior e o frigorigénio no tubo exterior em sentido contrário; Condensadores de imersão de imersão que são constituídos por um reservatório onde se encontra o frigorigénio por onde passa uma serpentina onde circula a água; Condensadores multitubulares são também constituídos por um reservatório onde se encontra o frigorigénio, sendo a serpentina substituída por um feixe de tubos por onde passa a água .[26]

Nos condensadores evaporativos a tubagem por onde circula o refrigerante é humidificada por meio de orifícios pulverizadores de água ao mesmo tempo que sobre a mesma incide um fluxo de ar do ventilador. O rendimento destes condensadores é afectado pelas condições do ar aspirado pelo ventilador. O rendimento será tanto maior, quanto menor for a humidade do ar, assim é de esperar um melhor comportamento em climas secos.

3.4.4. Evaporadores

São os evaporadores que providenciam o efeito frigorífico dos sistemas de refrigeração. Existem inúmeros tipos de evaporadores, estes chegam a varaiar para cada tipo de instalação Podem ser no entanto agrupados em duas categorias: arrefecimento de líquidos, ou arrefecimento de ar ou/e a gás [26].

O tipo mais comum de evaporadores usados no arrefecimento de líquidos é os evaporadores de carcaça e tubos. Estes evaporadores, usualmente usados para o arrefecimento de líquidos por expansão directa do refrigerante. Este líquido, pode ser usado directamente, ou ser utilizado como um refrigerante secundário.

Quando se pretende arrefecer ar e/ou gás utiliza-se um evaporador de expansão directa, consiste numa serpentina, por onde passa o líquido refrigerante, directamente exposta ao ar, ou gás a arrefecer [26].

4. Trabalho experimental

O trabalho experimental consistiu em efectuar medições que tinham por objectivo conhecer por um lado, a evolução da temperatura do ar no interior da caravana, e conhecer o número de renovações horárias do ar no interior da caravana por outro lado.

4.1. Medição das infiltrações na caravana

Uma parte considerável das trocas de calor resultantes na caravana devem-se à transferência de massa de e para o exterior da caravana. Para efectuar esse cálculo é necessário conhecer as infiltrações no interior da caravana, é necessário portanto saber a quantidade de vezes que o ar no interior da caravana é renovado, num determinado intervalo de tempo.

Para a determinação das infiltrações no interior da caravana, recorreu-se ao método dos gases traçadores. Para o efeito utilizou-se o equipamento de análise multi-gás, modelo 1312 fabricado pela INNOVA, que utiliza hexafluoreto de enxofre (SF_6) como gás traçador. O gás (SF_6), foi introduzido no interior da caravana até que a sua concentração atingisse um valor superior a 1000 p.p.m. (partes por milhão), o equipamento, media então e evolução da concentração no interior da caravana a intervalos de tempo regulares.

O número de infiltrações é dado pela seguinte expressão:

$$I = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{C_0}{C} \quad (4.1)$$

I – Numero de infiltrações [rph (renovações por hora)];

τ – tempo [h]

C_0 – Concentração inicial do gás [ppm];

C – Concentração do gás [ppm];

Como se pode constatar, seria possível calcular I , medindo apenas C_0 e C num determinado instante de tempo, contudo o erro na determinação de I seria grande. Por isso é comum medir vários valores da concentração do gás ao longo do tempo em intervalos de tempo regulares. É normal representar os valores num gráfico $\ln C$ em função do tempo, cujo declive da linha recta de tendência é o valor de I [27]

A caravana possuía no chão diversos furos, para a entrada de cabos, tubagens, etc, para o interior. Possuía ainda diversos respiros ao nível do tecto.

Foram efectuadas duas medições para as infiltrações, uma em que a medição foi feita sem qualquer isolamento dos furos acima citados e uma outra medição, em que se isolou alguns dos furos presentes no chão, assim como os respiros presentes no tecto da caravana.

As Figuras 4.1 e 4.2 representam respectivamente, o gráfico $\ln C$ vs Tempo, para a medição sem isolamento e com isolamento nos furos do chão e respiros, respectivamente.

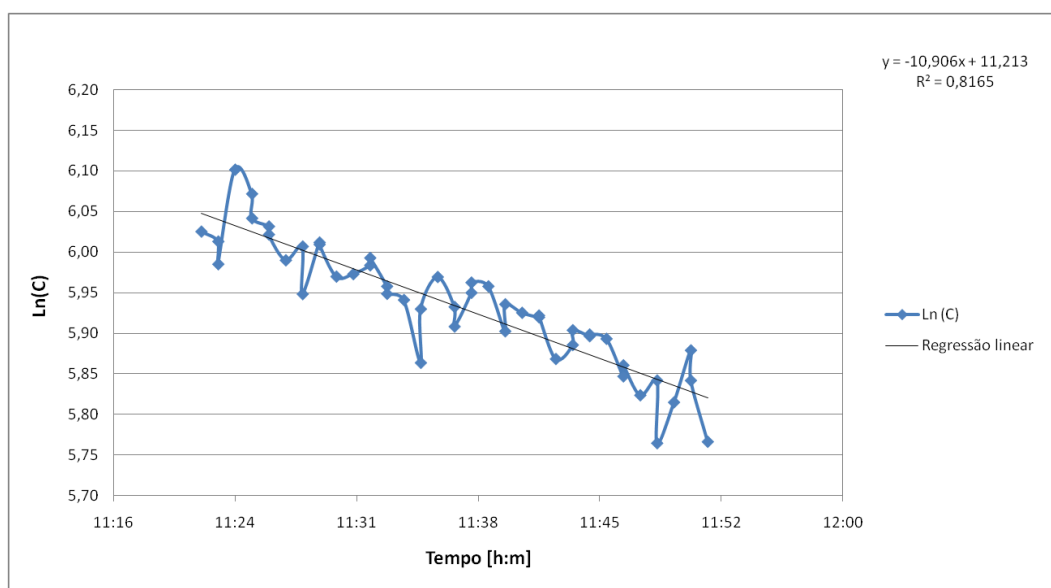


Figura 4.1: - Evolução da concentração de gás traçador no interior da caravana Respiros abertos

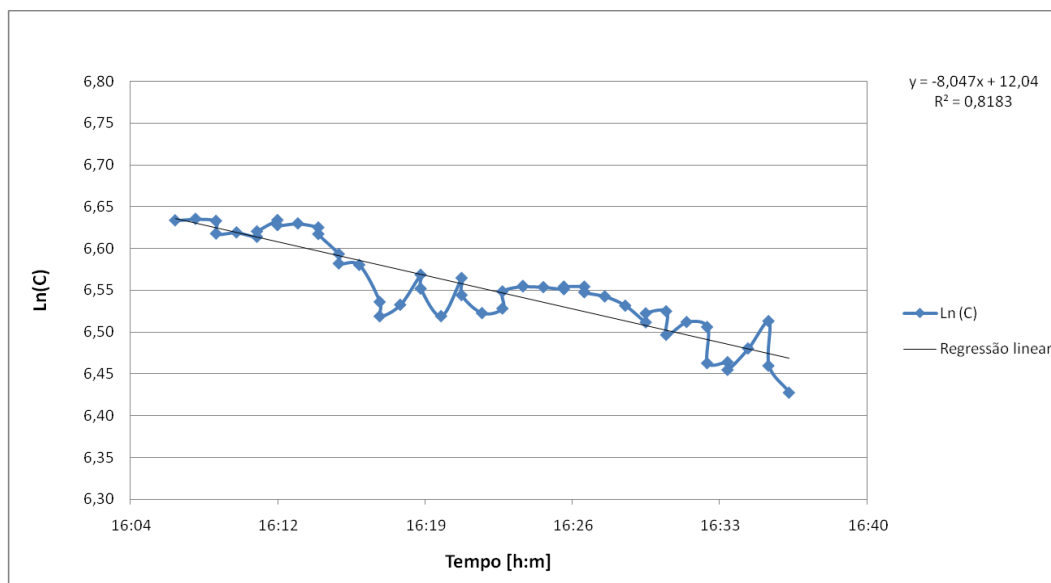


Figura 4.2 - Evolução da concentração de gás traçador no interior da caravana Respiros fechados

O valor das infiltrações obtido, recorrendo ao método acima descrito, foi então, 11 renovações por hora, no caso em que não havia isolamento acrescentado a posteriori na caravana, e 8 renovações por hora no caso em que foram isolados, alguns pontos de entrada de ar na caravana. Sugere-se portanto um isolamento dos furos presentes no chão, por forma a descer o valor das infiltrações de ar para valores na ordem de 1 a 2 rph.

Os resultados das medições do teste com gás traçador, encontram-se apresentadas em anexo como anexo A.

4.2. Medição das Temperaturas no interior da caravana

Foram introduzidos na caravana dois *dataloggers* Testo 175-H1, com sensores termoresistivos do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) para que se pudesse ter conhecimento da evolução real da temperatura no interior da caravana, e consequentemente conhecimento das condições reais no interior da caravana na ausência de um mecanismo de climatização, assim como, ter uma base de comparação para posterior validação de um modelo matemático que representasse os fluxos térmicos no interior da caravana.

A evolução das temperaturas do ar no interior da caravana foi a que se apresenta nas Figuras 4.3 e 4.4

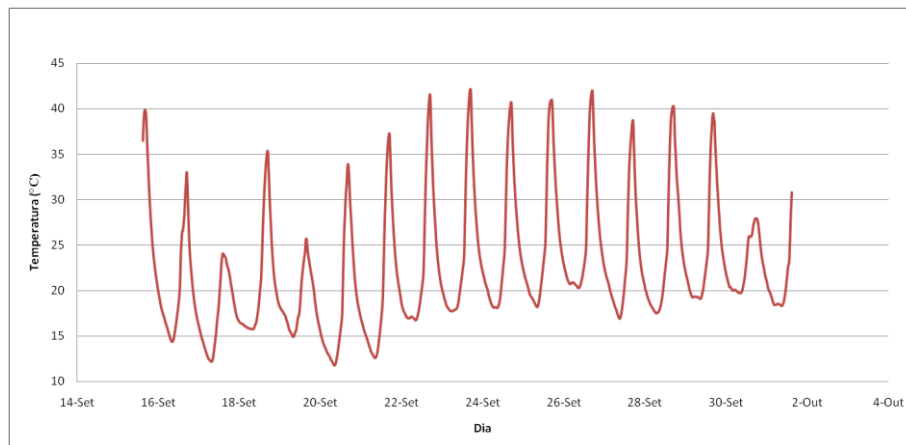


Figura 4.3: Evolução da temperatura do ar no interior da caravana de 15-09-09 a 01-10-09

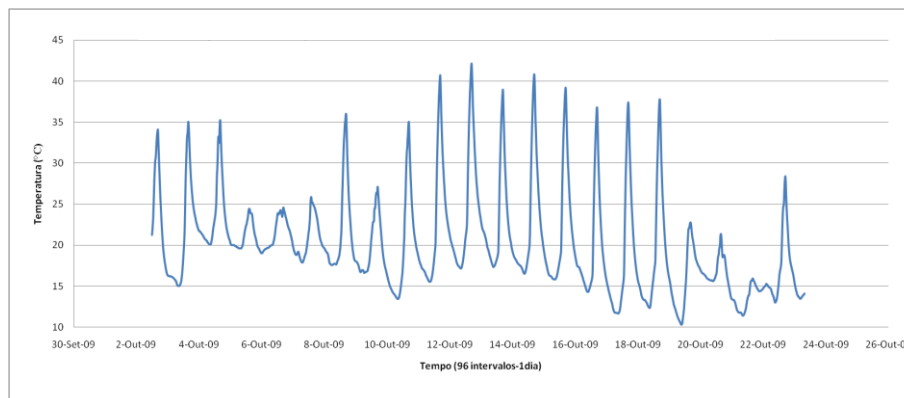


Figura 4.4: Evolução da temperatura do ar no interior da caravana de 02-10-09 a 23-10-09

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

5. Cargas térmicas de arrefecimento

A carga térmica de arrefecimento da caravana, corresponde à potência calorífica que é necessário retirar ao seu interior, de forma a permitir que seja garantidas a condição de conforto no interior da dita caravana.

A carga térmica, resulta da sobreposição de vários efeitos, que provocam o aquecimento indesejado da caravana, são eles:

- Ganhos de calor pela envolvente opaca exterior ($\dot{Q}_{opaco}$)
- Ganhos de calor pelos vãos envidraçados ($\dot{Q}_{envidraçado}$)
- Ganhos de calor associados às infiltrações ($\dot{Q}_{inf}$)
- Ganhos Internos ($\dot{Q}_{interno}$)

5.1. Coeficientes de transmissão térmica da caravana

Para o cálculo das cargas térmicas da caravana foi necessário determinar os coeficientes de transmissão térmica de cada elemento da envolvente da caravana.

Por exemplo, considerando uma parede, o coeficiente de transmissão térmico de uma parede é dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ext}} + R + \frac{1}{\alpha_{int}}} \quad (5.1)$$

Em que R é a resistência térmica da parede e é dada pela seguinte expressão:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (5.2)$$

e – espessura da parede

λ -condutibilidade térmica da parede

Os valores α_{ext} e α_{int} , utilizados, dados do LNEC [28], estão representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Coeficientes de convecção do ar exterior e interior da caravana [25]

Superfície	α_{int} [W/m ² .K]	α_{ext} [W/m ² .K]
Chão	10	25
Paredes	7,7	25
Tecto	5,9	25

Geralmente, as paredes são compostas por mais do que um material, pelo que é comum usar-se a analogia reo-eléctrica, de modo a calcular uma resistência térmica equivalente para toda a parede, assim, a resistência será dada por:

$$R_{\text{equivalente}} = \sum_i R_i, \text{ Para resistências em série.} \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{R_{\text{equivalente}}} = \sum_i \frac{1}{R_i}, \text{ Para resistências em paralelo.} \quad (5.4)$$

Para o cálculo das resistências foi necessário então determinar as dimensões da caravana, bem como as propriedades dos diferentes materiais que constituem as superfícies da envolvente da caravana. Assim, as dimensões da caravana medidas foram as representadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2-Dimensões da caravana

Dimensões da caravana				
Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Volume [m ³]	Volume de ar interior [m ³]
4,40	2,11	2,00	17,17	12,02
Superfície da caravana	Paredes		Janelas	
	Área [m ²]	Espessura [m]	Área [m ²]	Espessura [m]
Frente	3,44	0,024	0,78	0,003
Trás	3,76	0,024	0,25	0,003
Esquerda	6,35	0,024	0,35	0,003
Direita	6,10	0,024	0,60	0,003
Chão	8,80	0,043	-	-
Tecto	7,03	0,003	-	-

As superfícies da caravana, tal como descrito anteriormente, são constituídas pela sobreposição de diferentes materiais por camadas. Uma camada exterior, uma interior e, entre elas uma camada de isolamento, na analogia reoeléctrica corresponderão a três resistências térmicas em série. No chão e no tecto, entre a camada interior e exterior, existe, para além da camada de isolamento, elementos estruturais da caravana – travessas de madeira, de condutibilidade térmica elevada, que do ponto de vista térmico são geralmente designados por pontes térmicas. Corresponderão na analogia reo-eléctrica a uma resistência térmica em

paralelo com a resistência térmica do isolamento. As dimensões das diferentes camadas das superfícies da caravana estão representadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Materiais das superfícies e respectivas dimensões

Tecto			Tecto - travessas	
	Material	Espessura	Material	Espessura
Exterior	Poliéster	0,002	Poliéster	0,002
Centro	Poliestireno expandido	0,025	Madeira	0,025
Interior	Contraplacado	0,003	Contraplacado	0,003
Chão			Chão - travessas	
	Material	Espessura	Material	Espessura
Exterior	Contraplacado	0,003	Contraplacado	0,003
Centro	Poliestireno expandido	0,03	Madeira	0,03
Interior	Contraplacado	0,01	Contraplacado	0,01
Paredes			Janelas	
	Material	Espessura	Material	Espessura
Exterior	Alumínio	0,001	Acrílico	0,003
Centro	Poliestireno expandido	0,02		
Interior	Contraplacado	0,003		

Os materiais das diferentes superfícies teriam as propriedades físicas representadas na seguinte Tabela 5.4. [31,32,33]

Tabela 5.4-Materiais da caravana e respectivas propriedades

Material	Propriedades		
	Cp[J/(kgK)]	λ [W/(m°C)]	ρ [Kg/m³]
Alumínio	871	230	2700
Poliestireno expandido	1300	0,042	20,00
Poliéster	1275	0,275	1350
Madeira	2310	0,170	700,0
Contraplacado	2310	0,170	700,0
acrílico	1460	0,200	1185

A partir das propriedades dos materiais, representadas na tabela 5.4 e das dimensões consideradas na tabela 5.2, foram então, recorrendo à expressão 5.1, determinados os coeficientes de transmissão térmica da caravana, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6

Tabela 5.5 – Coeficientes de transmissão térmica das paredes

Paredes						
	Área [m ²]	Espessura[mm]	λ [W/(m°C)]	Re[m ² °C/W]	U[W/(m ² °C)]	A.U[W/°C]
Frente	3,44	0,024	0,0486	0,664	1,506	5,18
Direita	7,50	0,024	0,0486	0,664	1,506	11,30
Esquerda	7,75	0,024	0,0486	0,664	1,506	11,67
Traseira	3,98	0,024	0,0486	0,664	1,506	5,99
Chão	9,28	0,043	0,0483	0,823	1,368	12,70
Tecto	7,81	0,030	0,0544	0,808	1,415	11,05

Tabela 5.6 – Coeficientes de transmissão térmica das janelas

Janelas						
	Área [m ²]	Espessura[mm]	λ [W/(m°C)]	Re[m ² °C/W]	U[W/(m ² °C)]	A.U[W/°C]
Frente	0,78	0,003	0,200	0,1855	5,405	4,22
Direita	0,60	0,003	0,200	0,1855	5,405	3,24
Esquerda	0,35	0,003	0,200	0,1855	5,405	1,89
Traseira	0,25	0,003	0,200	0,1855	5,405	1,35

5.2. Ganhos Solares pela envolvente Opaca

Os ganhos solares pela envolvente opaca, devem-se à combinação dos efeitos temperatura exterior e Radiação Solar Incidente.

A equação que traduz os ganhos pela envolvente será então:

$$\dot{Q}_{opaco} = U \cdot A \cdot (T_{ar-sol} - T_{int}) \quad (5.5)$$

Onde,

$$T_{ar-sol} = T_{ext} + \frac{\alpha \cdot I}{h_0} \quad (5.6)$$

U – Coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento da envolvente;

A – Área do elemento da envolvente;

T_{Ar-sol} – Temperatura ar-sol;

T_{ext} – Temperatura do ar exterior;

T_{int} – Temperatura do ar interior;

α - Coeficiente de absorção do elemento da envolvente;

I – Intensidade da radiação Solar incidente no elemento da envolvente;

α_{ext} - Coeficiente de convecção exterior;

5.3. Ganhos associados aos envidraçados exteriores

Os ganhos associados aos envidraçados exteriores devem-se, tal como no caso da envolvente opaca, à combinação dos efeitos da radiação solar incidente com a transferência de calor devido à temperatura do ar exterior, acrescidos de uma nova parcela, associada à radiação solar que é transmitida pelo vidro.

$$\dot{Q}_{envidra\,çado} = A. [\tau. I + U. (T_{ar-sol} - T_{int})] \quad (5.7)$$

τ –Transmissibilidade do vidro

5.4. Ganhos associados às Infiltrações

Os ganhos associados às infiltrações devem-se à transferência de massa (ar) entre o interior e exterior da caravana.

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{m}. C_p. (T_{ext} - T_{int}) \quad (5.8)$$

Onde

$$\dot{m} = \dot{V}. \rho = V. I. \rho \quad (5.9)$$

5.5. Ganhos Internos

Os ganhos internos devem-se à libertação de calor por parte de dispositivos eléctricos ou mecânicos no interior da caravana, ou devido à presença de pessoas. Neste caso, considerou-se que o ganho de calor dos aparelhos, seria desprezável face ao calor libertado pelos habitantes da caravana.

Considerou-se que o calor “libertado” tomaria o valor de 120W por pessoa [29].

5.6. Cálculo das cargas Térmicas de arrefecimento na caravana.

Conforme já foi visto, as cargas térmicas de arrefecimento correspondem à potência calorífica que é necessário retirar à caravana, para que conseguir conforto térmico no interior da caravana. Para esse efeito, é necessário definir uma temperatura a manter no interior da caravana, que corresponderá à temperatura de conforto. Segundo o ASHRAE [9] a temperatura de conforto na época de arrefecimento, situa-se entre os 20 e 25 °C. Definiu-se então a temperatura de 25°C como a temperatura interior de projecto.

Por se tratar de uma caravana e, consequentemente, não ter uma localização geográfica fixa, as condições meteorológicas ver-se-ão alteradas, conforme a localização da mesma. Por haver uma impossibilidade de identificar uma localização exacta para a caravana, considerou-se a região geográfica com a situação meteorológica mais desfavorável em Portugal Continental. Segundo o RCCTE [30] a localização mais desfavorável de Portugal Continental seria a região de Moura, no Alentejo (38.08°N;07.27°W).

Foi considerada então, uma Temperatura exterior de projecto de 37°C [30].

Para determinação da Radiação crítica, considerou-se o ano meteorológico tipo de Moura, obtido através do programa SolTerm, e calculou-se para cada uma das possíveis orientações da caravana (com a Frente virada para Norte, Sul, Este e Oeste) o valor máximo de calor que entra na caravana, devido à radiação. Considerou-se então que o valor para dimensionamento seria o que corresponderia à máxima transferência de calor para o interior da caravana: com a frente orientada para Sul. Os valores da radiação global incidente seriam, para cada parede, segundo essa orientação, respectivamente:

Tabela 5.7: Radiação global incidente nas paredes da caravana

Superfície	Tecto	Traseira	Frente	Esquerda	Direita
Radiação Global Incidente [W/m ²]	835	135	268	669	135

Procedeu-se então ao cálculo das cargas térmicas da caravana.

O cálculo dos ganhos solares pela envolvente opaca foi efectuado recorrendo, à expressão 5.5, então, para a Temperatura e Radiação críticas, definidas anteriormente, obteve-se o seguinte resultado:

$$\dot{Q}_{opaco} = 1026,79 \text{ W}$$

Tabela 5.8: Ganhos Pela envolvente Opaca

Superfície	A.U[W/°C]	I[W/m²]	α	α _{ex} [W/(m²K)]	T _{ext} [°C]	T _{int} [°C]	Q _{opaco} [W]
Frente	5,18	268	0,4	25	37	25	84,37
Direita	11,30	135					160,01
Esquerda	11,67	669					264,96
Traseira	5,99	135					84,82
Tecto	11,05	835					280,23
Chão	12,7	0					152,40
Total							1026,79

Recorrendo à expressão 5.7, obteve-se o seguinte resultado para os ganhos associados aos envidraçados exteriores:

$$\dot{Q}_{envidra\,çado} = 473,59\,W$$

Tabela 5.9: Ganhos pelos envidraçados

Superfície	A [m²]	A.U [W/°C]	I [W/m²]	τ	α	α_{ext} [W/ (m²K)]	T _{ext} [°C]	T _{int} [°C]	$\dot{Q}_{\text{envidraçado}}$ [W]
Frente	0,78	4,22	268	0,61	0,04	25	37	25	179,91
Direita	0,60	3,24	135						89,03
Esquerda	0,35	1,89	669						167,56
Traseira	0,25	1,35	135						167,56
Total									473,59

Para o cálculo dos ganhos associados às infiltrações, recorreu-se à expressão 5.8, tendo-se obtido os seguintes resultados:

$$\dot{Q}_{infiltra\,ções} = 507,79\,W$$

Tabela 5.10: Ganhos associados às infiltrações de ar no interior da caravana

V _{interior} [m³]	ρ_{ar} [kg/m³]	C _p [J/(kg.K)]	I [ren/s]	T _{ext} [°C]	T _{int} [°C]	$\dot{Q}_{infiltra\,ções}$
12,02	1,15	1005	0,0031	37	26	507,79

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Para o cálculo dos ganhos internos, considerou-se que estariam os 4 ocupantes na caravana, tendo-se obtido o seguinte resultado:

$$\dot{Q}_{interno} = 480W$$

A carga térmica de arrefecimento resulta da soma dos diversos ganhos caloríficos, sendo dada por:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{opaco} + \dot{Q}_{envidraçado} + \dot{Q}_{infiltrações} + \dot{Q}_{interno} = 2487,95W$$

6. Selecção do equipamento

Depois de conhecidas as cargas térmicas da caravana, foi efectuada a selecção do equipamento de refrigeração, bem como do sistema fotovoltaico. A selecção do equipamento foi feita tendo em conta as especificações técnicas exigidas, bem como critérios de ordem económica.

6.1. Selecção do Sistema de refrigeração

Conhecida a carga térmica do sistema, procedeu-se à selecção do sistema de refrigeração a instalar na caravana. O sistema de refrigeração teria de ter uma capacidade de arrefecimento próxima de 2488 W.

Para esse valor de potência, de entre os aparelhos de refrigeração por compressão de vapor disponíveis pelos fabricantes consultados (tabela 5.11), seleccionou-se o modelo CS09AQ NBO da LG, por ser o que possui a melhor eficiência (O modelo S09Aq apresenta igual COP, sendo no entanto mais caro), Este modelo tem um desempenho muito bom, possuindo um COP de 4,6 para a potência nominal que é de 2500W.

O modelo em questão tem ainda a possibilidade de se inverter o seu funcionamento, podendo então funcionar como bomba de calor, possuindo para o efeito, uma potência nominal de 3200W, também com um COP de 4.6. O custo do equipamento seleccionado é de 1140€.

5.11: Comparação entre Sistemas de refrigeração de diversos fabricantes[34]

	Modelo	Potência nominal	Consumo	COP FRIO
Sanyo	KCR 97 EHAX	2814	870	3,2
	KCR V 96	2638	1150	2,3
	KRC V 96 EHDS	2638	1350	2,0
Mitsubishi	MSH GA20VB	2286	715	3,2
	MSH GA25VB	2638	820	3,2
	MSZ GC25VA	2491	640	3,9
	MSZ FD25VA	2491	595	4,2
LG	S09 AW	2638	650	4,1
	CS 09AQ	2500	545	4,6
	S09 AQ	2500	545	4,6

A ficha técnica do sistema encontra-se apresentada em anexo como Anexo B.

6.2 Selecção do Sistema fotovoltaico

Para seleccionar o sistema fotovoltaico é necessário conhecer a energia eléctrica consumida pelo sistema de refrigeração. Recorreu-se à definição de COP deste sistema:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{refrig}}}{\dot{E}_{\text{scv}}} \quad (6.1)$$

$\dot{Q}_{\text{refrig}}$ – Efeito frigorífico

$\dot{E}_{\text{scv}}$ – Consumo eléctrico do sistema de compressão de vapor

Por não se ter os dados do fabricante relativamente à variação do COP com as temperaturas operacionais, considerou-se o COP constante e igual a 4,6.

O Sistema fotovoltaico terá então de ser capaz de satisfazer o consumo $\dot{E}_{\text{scv}}$, pelo que seguidamente passa-se à sua análise.

A energia eléctrica produzida por um painel fotovoltaico é dada pela seguinte expressão:

$$\dot{E}_{pv} = \eta_{ci} \eta_{pv} \cdot \dot{I}_\beta \cdot A_c \quad (6.2)$$

η_{ci} – Rendimento do controlador/Inversor

η_{pv} – Rendimento do Painel Fotovoltaico

$\dot{I}_\beta$ – Radiação solar incidente

A_c – Área colectora

Onde η_{pv} pode ser calculado da seguinte forma[35]:

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \cdot (1 - \beta \cdot (T_{ext} - T_{ref})) - \frac{\beta \cdot I \tau \alpha}{K} \cdot (1 - \eta_{ref}) \quad (6.3)$$

η_{ref} – Rendimento de referência do painel fotovoltaico;

β – Coeficiente de temperatura;

K – Coeficiente de perdas;

I – Radiação solar incidente;

$\tau \alpha$ – Rendimento óptico;

O balanço da energia eléctrica na caravana será então dado por:

$$\Delta E = \int_{t_i}^{t_f} \dot{E}_{pv} \cdot dt - \int_{t_i}^{t_f} \dot{E}_{scv} \cdot dt \cong \sum_{i=1}^n (\dot{E}_{i,pv} \cdot \Delta t_i - \dot{E}_{scv} \cdot \Delta t_i) \quad (6.4)$$

t_i – Instante inicial [h];

t_f – Instante final [h];

Δt_i –Intervalo de tempo no instante i [h];

A escolha do tipo de painel a utilizar na caravana é condicionada pelo facto de a área disponível ser de apenas 5m². Assim, a selecção do painel foi feita em três etapas:

Numa primeira fase foi feito um cálculo de forma a determinar qual seria o rendimento mínimo médio que teriam de ter os módulos fotovoltaicos, para que a suprissem as necessidades energéticas da caravana. Seriam então seleccionadas as tecnologias e métodos construtivos com um rendimento igual ou superior a este rendimento mínimo.

Posteriormente, de entre os diferentes tipos de tecnologias pré-seleccionadas, seleccionar-se-ia aquela que traria mais vantagens em termos de custos.

Para essa tecnologia, foi feita uma análise mais detalhada, de forma a seleccionar o modelo que melhor se adequa às condições da caravana.

Consideraram-se então, como valores de referência para o cálculo do rendimento do módulo fotovoltaico, os seguintes valores [35]:

$\beta [K^{-1}]$	$T_{ref} [^{\circ}C]$	$K [W/m^2K]$	$\tau\alpha$	η_{ci}
0,004	25	25	0,7	0,9

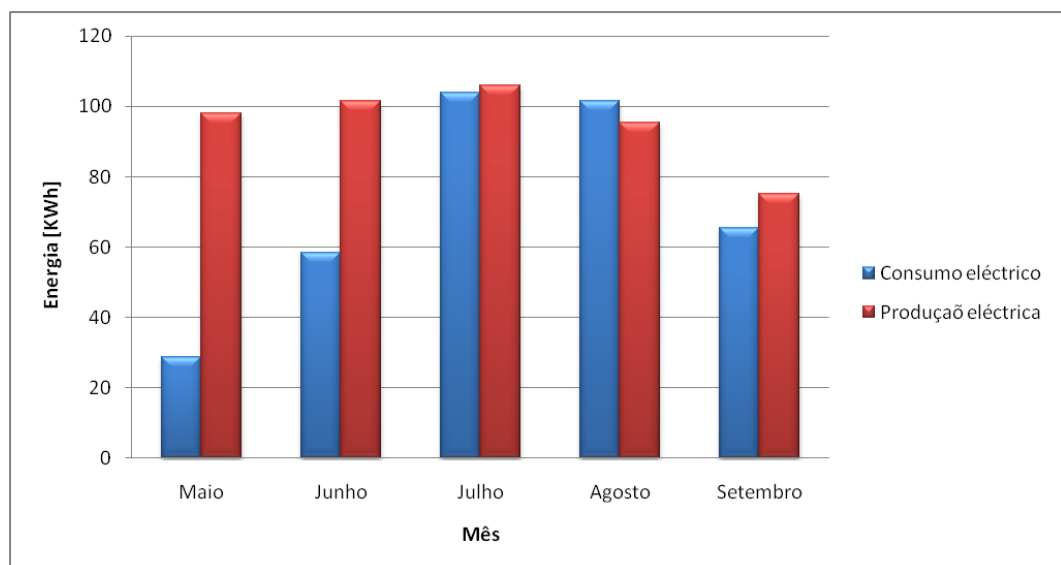


Figura 5.1: Balanço de energia eléctrica em Moura para $\eta_{ref}=0,11$

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

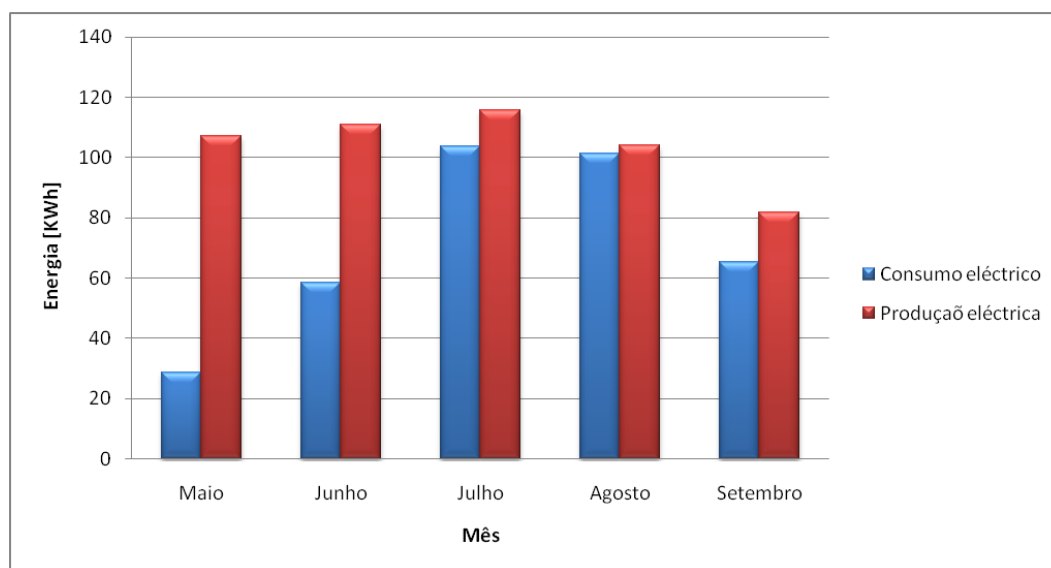


Figura 5.2: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura para $\eta_{ref}=0,12$

Como se pode verificar, pela análise das Figuras 5.1e 5.2, para uma área disponível de $5m^2$, a eficiência mínima que os módulos terão de ter ronda os 12 %. Seleccionou-se então, a partir de uma selecção de diferentes painéis fotovoltaicos de diversos fabricantes, anexo C, a escolha mais favorável do ponto de vista económico.

Foram pré-seleccionados então, os módulos STP 180-24/Ac, STP 200-18/Ud STP e o 210-18/Ud da Suntech, que apresentavam os três e um custo de 3,1€/Wp. As características dos módulos em questão são apresentadas nas Tabelas 5.12 a 5.14

Tabela 5.12:Características dos módulos fotovoltaicos[36]

	STP 180-24/Ac	STP 200-18/Ud	210-18/Ud
Células	Silício policristalino 125mm×125mm	Silício policristalino 156mm×156mm	Silício policristalino 156mm×156mm
Número de células	72 (6×12)	54 (6×9)	54 (6×9)
Dimensões	1580mm×808mm×35mm	1482mm×992mm×35mm	1482mm×992mm×35mm
Peso	15,5Kg	16,8kg	16,8kg
Eficiência do Módulo	14,10%	13,60%	14,30%

Tabela 5.13: Propriedades eléctricas dos módulos fotovoltaicos[36]

	STP 180-24/Ac	STP 200-18/Ud	210-18/Ud
Tensão de circuito aberto (Voc)	45V	33.4V	33.0V
Tensão nominal (Vmp)	36.2A	26.2V	26.0V
Corrente de curto-circuito (Isc)	5.26A	8.12A	7.89A
Corrente nominal (Imp)	4.97A	7.63A	7.95A
Potência nominal (Pmp)	180W	200W	210W
Temperatura de funcionamento	-40°C até 85°C	-40°C até 85°C	-40°C até 85°C
Tensão máxima admissível	1000V DC	1000V DC	1000V DC

Tabela 5.14: Coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos[36]

	STP 180-24/Ac	STP 200-18/Ud	210-18/Ud
NOCT	45°C+2°C	45°C+2°C	45°C+2°C
Coeficiente térmico para a corrente de curto-circuito	0,045%/K	0,045%/K	0,045%/K
Coeficiente térmico para a tensão de circuito aberto	-0,34%/K	-0,34%/K	-0,34%/K
Coeficiente térmico para a potência MPP (CTS) - β	-0,47%/K	-0,47%/K	-0,47%/K

Para as características dos módulos fotovoltaicos acima referidos, calculou-se o número de módulos necessários para satisfazer as necessidades energéticas da caravana para Moura, assim como a energia eléctrica produzida. Para tal recorreu-se à seguinte expressão [13]:

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} \cdot \left[1 + \beta \cdot \left(T_{ext} + i \cdot \frac{NOCT - 20}{800} - 25 \right) \right] \quad (6.5)$$

NOCT – Temperatura nominal de funcionamento da célula

Foi efectuado então um cálculo comparativo do balanço de energia eléctrica na caravana para um sistema fotovoltaico composto por três módulos. As Figuras 5.3 a 5.5 representam o consumo eléctrico na caravana, assim como a produção eléctrica para o sistema fotovoltaico utilizando 3 módulos fotovoltaicos de 180,200 e 210W respectivamente.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

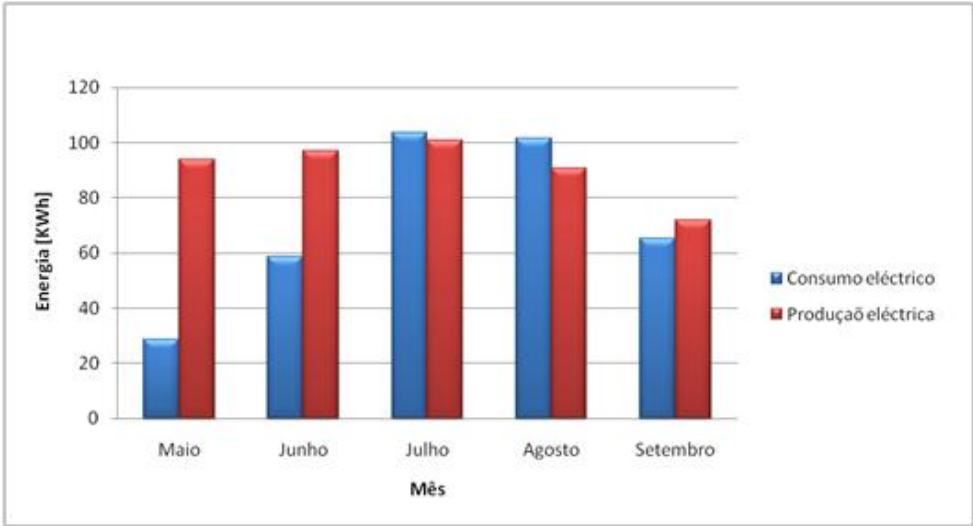


Figura 5.3: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura - Pmp=180W

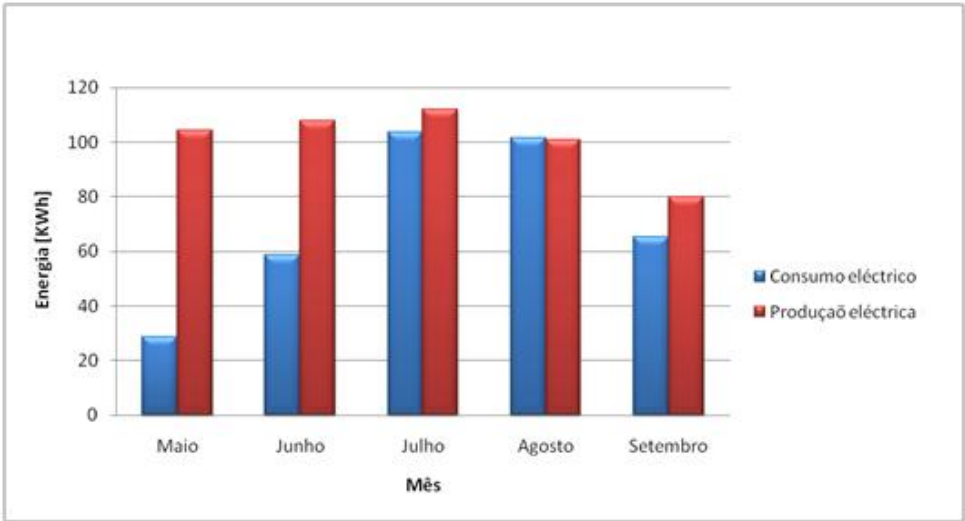


Figura 5.4: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura - Pmp=200W

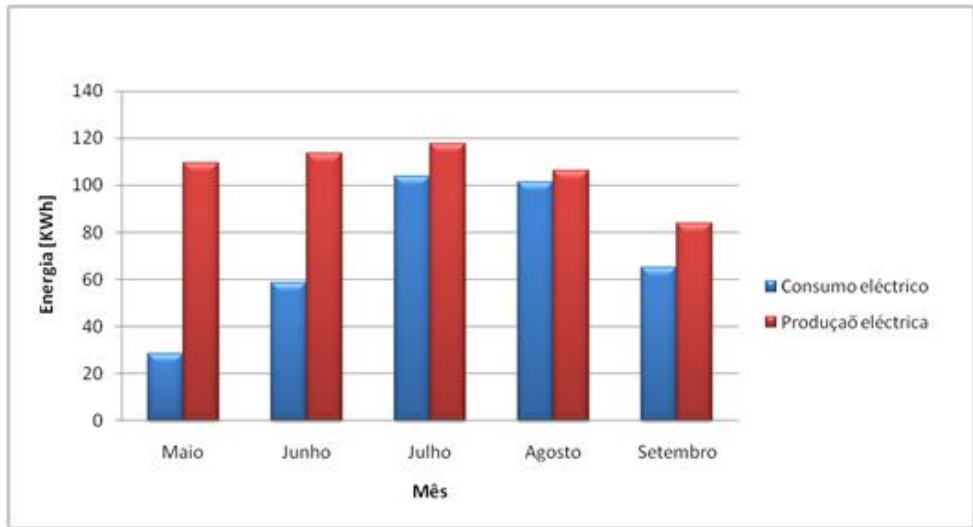


Figura 5.5: Balanço de energia eléctrica na caravana em Moura – Pmp= 210W

Como se pode constatar, analisando as Figuras 5.3 a 5.5 , o recurso a três módulos do tipo STP 180-24/Ac, não são suficientes para colmatar o consumo eléctrico na caravana. O conjunto de módulos de 200W, apesar de apresentar um pequeno défice energético para o mês de Agosto, poderia ser uma solução viável, mediante a escolha de baterias adequadas. Seleccionou-se no entanto, o modelo 210-18/Ud, pois garante sempre um saldo energético mensal positivo, permitindo assim uma relativa flexibilidade nos consumos, sem que haja por isso encargos financeiros muito superiores. O custo de cada módulo é de 631.90€

Para este módulo, cuja ficha técnica é apresentada em anexo como Anexo D, foi feita uma análise energética horária pois, pelo facto de o consumo energético ser variável de dia para dia e ao longo do dia, é necessário um cuidado especial na selecção dos acumuladores. A Figura 5.6 representa o balanço de energia eléctrica na caravana para o sistema fotovoltaico com três módulos do tipo 210-18/Ud

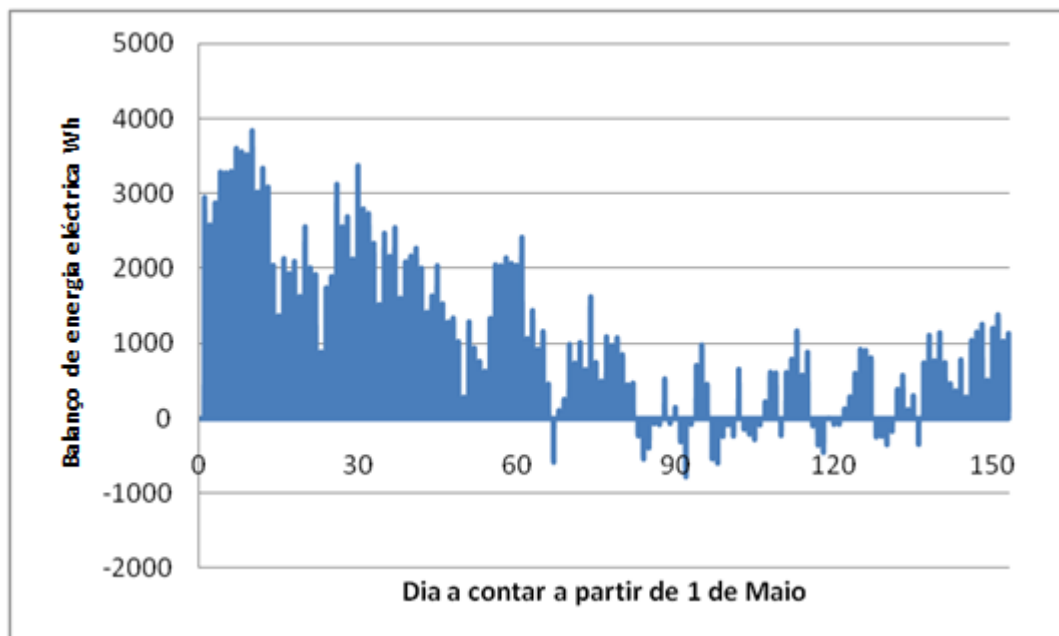


Figura 5.6: balanço de energia eléctrica na caravana entre 1 de Maio e 31 de Setembro

A capacidade de armazenamento da bateria será dada então pelo maior défice energético acumulado, contado a partir do primeiro dia em défice energético.

Para o presente caso, o armazenamento necessário na bateria terá de ser igual ou superior a 1,931kWh, valor que corresponderá a cerca de 160,97 Ah para baterias de 12V.

Como já foi visto no capítulo 3, as baterias não devem ser descarregadas completamente, para garantir uma boa longevidade. Recorreu-se então à expressão x para o cálculo da capacidade da bateria.[36]

$$\text{Capacidade de Armazenamento} = \frac{\text{Consumo Total}}{\text{Capacidade de descarga das baterias}} \quad (6.6)$$

Considerando 0,6 para o valor da capacidade de descarga [37], tem-se que

$$\text{Capacidade de Armazenamento} = 268,28Ah$$

Pelo facto de a alternativa ser um total de 320 Ah (2 baterias de 180Ah), seleccionaram-se então 2 baterias Moll 130, que tem uma capacidade de armazenamento de 130 Ah[36]. O preço unitário destas baterias é de 269€ .

Para a selecção do controlador de carga do lado das cargas recorreu-se à seguinte expressão [37]:

$$\text{Corrente C.carga} = \frac{\text{Consumo máximo}}{\text{Tensão no banco de baterias}} \quad (6.7)$$

Para cálculo do consumo máximo, recorreu-se à expressão 6.1 e, para a carga térmica calculada em 5.6, obteve-se o seguinte valor:

$$\text{Corrente Controlador de carga} = 22,505A$$

Para o cálculo da selecção do controlador de carga do lado dos módulos fotovoltaicos,

$$\text{Corrente C.carga} = \text{Corrente Isc do Módulo} \times N^{\circ} \text{ Módulos em paralelo} \quad (6.8)$$

Considerando os três módulos em paralelo

$$\text{Corrente Controlador de carga} = 23,67$$

O controlador de carga escolhido é o Solar ProStar PS-30 que tem uma corrente de carga de até 30A [36] e apresenta um custo de 194€.

Por fim foi seleccionado o inversor. Para o dimensionamento do inversor deve ser verificada a carga de Corrente Alternada que este deverá alimentar [37]. O inversor de corrente escolhido é o modelo ERP900-12 da PowerBright, que trabalha com uma potência contínua de até 900W e capaz de suportar picos até 1800W [38]. O custo deste equipamento é de 109€.

O sistema fotovoltaico, seleccionado para a caravana tem então um custo total de 3876.7€.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

7. Modelo de simulação e resultados obtidos

Com o objectivo de prever o perfil de temperaturas no interior da caravana exposta à radiação Solar, e de avaliar o desempenho do sistema de refrigeração seleccionado, recorreu-se a um programa da mecânica dos fluidos computacional - CFD, o software Fluent – versão 6.3.26. Este software requer, numa primeira etapa a criação da malha, para tal, recorreu-se ao software Gambit – versão 2.3.16. O Fluent e o Gambit, são ambos produtos da empresa ANSYS Inc.

Foram testados vários modelos e realizadas várias simulações até serem obtidos os resultados finais. Inicialmente, foram feitas simulações em que foi utilizado o “Solar Load Model”. Uma vez que os resultados obtidos nestas simulações não foram os melhores, foi desenvolvido um novo modelo, em que se recorreu a uma abordagem alternativa, para simular a carga térmica relativa à radiação solar.

7.1. Introdução à Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD)

O CFD tem por objectivo, modelar numericamente um determinado escoamento. Uma análise em CFD é geralmente composta por três etapas: Pré-processamento, simulação e pós-processamento.

Pré-processamento: Na fase de pré-processamento é criada a geometria do modelo, que estabelece o domínio a ser estudado. Este domínio computacional é então dividido em pequenas células, pela criação de uma malha. As condições de fronteira utilizadas são definidas no “pré-processor”. Neste caso, o pré-processamento foi efectuado recorrendo para o efeito ao software Gambit versão 2.3.16.

A escolha da malha (programa Gambit), tal como a escolha do programa de simulação (programa Fluent) tem uma influência enorme na precisão, convergência e velocidade dos resultados obtidos [39] Assim, a escolha a selecção da malha a utilizar, assim como a escolha do programa de modelação que permita uma perfeita integração da malha no software de simulação, terão um papel muito importante na obtenção de resultados satisfatórios.

No caso de se fazer uma simulação 3D, o programa de simulação pode utilizar células do tipo tetraédrico, hexaédrico, poliédrico, piramidal, cunha, ou uma combinação delas. A escolha do tipo de células a considerar tem uma influência considerável, no tempo de modelação, no tempo de simulação, assim como na qualidade dos resultados. O recurso a malhas estruturadas, como a hexaédrica diminui o tempo de simulação, no entanto, no caso de se tratar de uma estrutura complexa, o recurso a este tipo de célula, aumenta drasticamente o tempo de modelação, podendo mesmo, dependendo da estrutura, tornar-se impraticável. A diminuição do tempo de cálculo, para as células estruturadas, deve-se sobretudo, ao facto de uma malha estruturada ter menos células, do que qualquer outra malha que não o seja. Uma

célula que não estruturada, tem assimetrias que diminuem a convergência, assim como a precisão dos resultados.

Pelo facto de a estrutura da caravana ser relativamente simples, para garantir uma melhor convergência com menos tempo de cálculo, optou-se por utilizar uma malha estruturada hexaédrica.

De forma a facilitar a modelação, considerou-se que a caravana, seria um paralelepípedo, com quatro metros de comprimento, dois de largura e dois metros também de altura. A malha dos diferentes modelos utilizados neste estudo, foi criada no Gambit recorrendo às ferramentas HEX, MAP e SUBMAP

Simulação: Os escoamentos, e os fenómenos relacionados, podem ser descritos por equações diferenciais parciais, que não podem ser resolvidas analiticamente excepto para casos muito especiais. Para se obter uma solução numérica aproximada é necessário utilizar um método de discretização que permite a aproximação do sistema de equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, que podem ser resolvidas num computador. Estas aproximações são aplicadas a pequenos domínios espaciais e ou temporais, providenciando assim resultados discretos, no espaço e no tempo.[40]

As equações diferenciais que regem a dinâmica dos fluidos são as equações de Navier-Stokes. As equações da conservação da massa (7.1), da quantidade de movimento (7.2 a 7.4) e da energia (7.5) O objectivo dos CFD é então, resolver esse sistema de equações diferenciais não lineares e determinar a massa, a energia e a quantidade de movimento em os nós de cada célula. No caso do Fluent, a aproximação destas equações por equações algébricas é feita, utilizando o método dos volumes finitos.[40]

Conservação da Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = 0 \quad (7.1)$$

Conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho wu) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho vw) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho g \beta (T_\infty - T) \quad (7.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho ww) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (7.4)$$

Conservação da Energia

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (7.5)$$

A simulação da radiação solar incidente na caravana foi feita com base em dois modelos distintos. No primeiro é a utilizado o “Solar Load Model”, com recurso ao algoritmo “Solar Ray Tracing” (SRT) e ao modelo de radiação DO (Discrete Ordinates).

O SRT para um determinado mês, dia e hora específicos, gera simultaneamente o vector de posicionamento para a localização solar e a radiação global, permitindo assim o cálculo do fluxo de calor para cada superfície, mediante a definição do coeficiente de absorção e transmissividade.

Seleccionou-se o modelo de radiação “Discrete Ordinates” (DO) por permitir a obtenção de soluções para a radiação através de superfícies semi-transparentes. [39]

O segundo método utilizado consistiu na introdução de fluxos de calor nas superfícies da caravana.

Na definição das condições de fronteira a introduzir no Fluent, por não haver a hipótese de se conjugar para a mesma superfície, simultaneamente convecção e um fluxo de calor, optou-se por considerar para todas as superfícies uma condição de fronteira de convecção. Para calcular a temperatura exterior recorreu-se no caso das paredes ao conceito de T_{ar-sol} apresentado no ponto 5.2. No caso das janelas, considerou-se também uma temperatura fictícia correspondente à temperatura que originaria um fluxo de calor equivalente ao fluxo de calor total que “entra” pelas janelas.

a partir da equação 5.7 , tem-se que

$$\dot{Q}_{envidra\,çado} = A \cdot U \left[\frac{\tau \cdot I}{U} + T_{ar-sol} - T_{int} \right] \quad (7.6)$$

então,

$$T_{envidra\,çados} = \frac{\tau \cdot I}{U} + T_{ar-sol} \quad (7.7)$$

onde,

$T_{envidra\,çados}$ – Temperatura fictícia dos envidraçados

Pós-processamento: O pós-processamento corresponde à análise e interpretação dos resultados obtidos durante a fase de simulação. Esta análise pode ser feita directamente no software de simulação, e também complementada em softwares auxiliares, como seja o Excel. Da análise de resultados pode resultar um regresso à fase de pré-processamento, mediante a qualidade dos resultados obtidos em simulação.

7.2. Propriedades dos materiais da caravana

O modelo da caravana utilizado é uma simplificação do modelo real da caravana: as dimensões das diferentes paredes, assim como das janelas, são ligeiramente diferentes das reais; no modelo criado em Gambit, as paredes são compostas por um único material, enquanto na caravana real, as paredes eram uma sobreposição de camadas de materiais distintos, havendo ainda pontes térmicas no chão e tecto da caravana. (conforme visto no ponto 5.1.).

Assim, foi necessário calcular as propriedades dos materiais constituintes da envolvente da caravana a inserir no modelo, que seriam equivalentes às da caravana real. A Tabela 7.1 apresenta uma comparação entre os valores das dimensões reais dos materiais da caravana com as do modelo.

Tabela 7.1: Dimensões da caravana reais e do modelo

	Área da Caravana [m ²]		Área do Modelo [m ²]		Espessura da Caravana [m]		Espessura do Modelo [m]	
	Paredes	Janelas	Paredes	Janelas	Paredes	Janelas	Paredes	Janelas
Frente	3,44	0,78	3,16					
Direita	7,5	0,6	7,16					
Esquerda	7,75	0,35	7,16	0,84	0,024	0,003		0,025
Traseira	3,98	0,25	3,16					
Chão	9,28	-	8	-	0,043	-	0,025	-
Tecto	7,81	-	8	-	0,03	-	0,025	-

Primeiro calculou-se as propriedades equivalentes das diversas superfícies constituídas por diferentes materiais. Depois calculou-se as propriedades do modelo considerando que cada superfície tinha apenas um material

Por exemplo, para o cálculo da massa específica equivalente, recorreu-se à seguinte expressão:

$$\rho_{eq} = \left(\frac{e_1 \cdot \rho_1 + e_2 \cdot \rho_2 + e_3 \cdot \rho_3}{e_1 + e_2 + e_3} \right) \quad (7.8)$$

em que,

ρ_{eq} – Massa específica equivalente da parede [kg/m^3];

ρ_i – Massa específica do material i [kg/m^3];

e_i – Espessura do material i [m];

No caso do chão e do tecto, por haver pontes térmicas, a densidade equivalente seria dada por:

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_{p1} A_1 + \rho_{p2} A_2}{A_1 + A_2} \quad (7.9)$$

onde,

ρ_{pi} – Massa específica equivalente da parede i, calculada a partir da expressão 6.1 [kg/m^3]

A_i – Área do elemento i [m^2]

A massa específica do modelo é dada por:

$$\rho_{mod} = \rho_{eq} \cdot \frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_{mod}} \cdot \frac{A_{real}}{A_{mod}} \quad (7.10)$$

onde,

ρ_{mod} – Massa específica equivalente da parede do modelo [kg/m^3];

e_{mod} – Espessura do modelo [m];

A_{real} – Área real da parede [m^2];

A_{mod} – Área da parede no modelo [m^2];

Para o cálculo do calor específico equivalente para as paredes recorreu-se à expressão que se segue:

$$C_{peq} = \frac{e_1 \cdot C_{p1} \cdot \rho_1 + e_2 \cdot C_{p2} \cdot \rho_2 + e_3 \cdot C_{p3} \cdot \rho_3}{e_1 \cdot \rho_1 + e_2 \cdot \rho_2 + e_3 \cdot \rho_3} \quad (7.11)$$

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

C_{peq} – Calor específico equivalente da parede [J/kgK];

No caso do chão e do tecto, por haver pontes térmicas, o calor específico equivalente seria dado por:

$$C_{peq} = \frac{C_{pp1}\rho_{p1}A_1 + C_{pp2}\rho_{p2}A_2}{\rho_{p1}A_1 + \rho_{p2}A_2} \quad (7.12)$$

Onde,

C_{pp1} - Calor específico equivalente de cada componente da parede i calculado a partir da expressão 6.4 [J/kgK];

O calor específico do modelo é dado pela seguinte expressão:

$$C_{pmod} = C_{peq} \quad (7.13)$$

Onde,

C_{pmod} – Calor específico do modelo [J/kgK];

Em relação à condutibilidade térmica da parede esta é dada por

$$\lambda_{eq} = \frac{1}{R_{eq}} \quad (7.14)$$

Onde,

λ_{eq} – Condutibilidade térmica equivalente da parede

R_{eq} – Resistência térmica equivalente da parede, calculada pelas expressões 5.3 e 5.4

Então, a condutibilidade térmica do modelo é obtida com a seguinte expressão:

$$\lambda_{mod} = \lambda_{eq} \cdot \frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_{mod}} \cdot \frac{A_{real}}{A_{mod}} \quad (7.15)$$

Tabela 7.2: Propriedades equivalentes dos materiais das paredes do modelo da caravana

	ρ_{eq} [kg/m ³]	ρ_{mod} [kg/m ³]	$C_{p\ eq}$ [J/kg.K]	λ_{eq} [W/m.K]	λ_{mod} [W/m.K]
Paredes	132,50	109,39	1485,13	2,024	1,671
Chão	320,47	639,39	2274,82	1,692	3,376
Tecto	261,67	306,54	1899,33	2,016	2,362

Tabela 7.3: Propriedades equivalentes dos materiais das janelas do modelo da caravana

	ρ_{mod} [kg/m ³]	$C_{p\ eq}$ [J/kg.K]	λ_{mod} [W/m.K]
Janela lado direito	101,57	1460	0,017
Janela lado esquerdo	59,25		0,010
Janela Frente	132,04		0,022
Janela trás	42,32		0,007

7.3. Desenvolvimento do modelo

Durante a realização deste estudo, despendeu-se muito tempo a aprender a trabalhar com o software de simulação FLUENT e foram criados e testados vários possíveis modelos da caravana que pelas mais diversas razões não deram os resultados pretendidos até que se obtivesse uma solução final.

Para todos os modelos apresentados considerou-se a frente como sendo a superfície no sentido positivo do eixo dos xx, o tecto no sentido positivo do eixo dos yy e a parede do lado direito no sentido positivo do eixo dos zz

Os diversos modelos desenvolvidos, são apresentados de seguida

O Modelo 1-Modelo simples e “Solar Load Model” foi o primeiro modelo criado com a pretensão de ser utilizado para simular o campo de temperaturas no interior da caravana, era um modelo muito simples em que foi criado um paralelepípedo com 4m de comprimento 2m de largura e 2m de altura. Neste modelo, não foi criada a espessura, correspondente às paredes e janelas, sendo os materiais das paredes definidos nas condições de fronteira, indicando o material e a espessura correspondente. O modelo criado (Figura 7.1) era constituído por 16000 elementos do tipo hexaédrico estruturado.

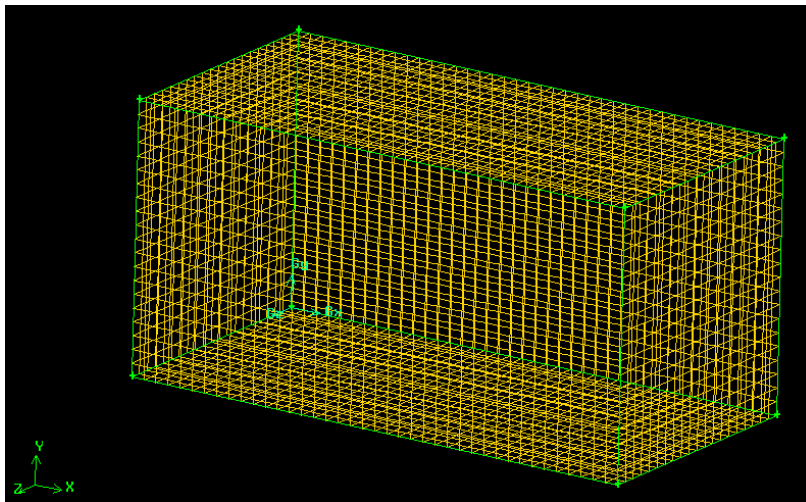


Figura 7.1: Modelo 1 com malha

Pretendia-se com a criação deste modelo, avaliar o comportamento do modelo de radiação solar do Fluent, “Solar Load Model”.

A simulação foi efectuada em regime estacionário, em que as condições de fronteira eram de temperatura, tomando o valor de 300K para todas as paredes. O modelo de radiação solar utilizava o modelo de radiação DO, conjugado com o SRT definido para 1 de Junho às 8h00. Consideraram-se todas as superfícies opacas, e com $\alpha=0,4$.

Considerou-se ainda que o interior seria ar, com as propriedades de origem do Fluent. O material das paredes foi definido, por questões de simplificação, como sendo alumínio com $\alpha=0,4$ do Fluent para todas as superfícies e uma espessura de 2,5 cm.

Esta simulação não foi bem sucedida, pois não foi obtido fluxo de calor solar em qualquer das paredes.

Constatou-se entretanto, que se as paredes fossem semi-transparentes, havia fluxo de calor solar. Isto levou a que se introduzisse condições de fronteira nas paredes, em que se dizia que estas seriam transparentes mas de transmissibilidade nula e coeficiente de absorção $\alpha=0,4$, o que criaria condições equivalentes a uma parede opaca com o mesmo valor de α . A Figura 7.2 mostra o fluxo de calor solar na caravana.

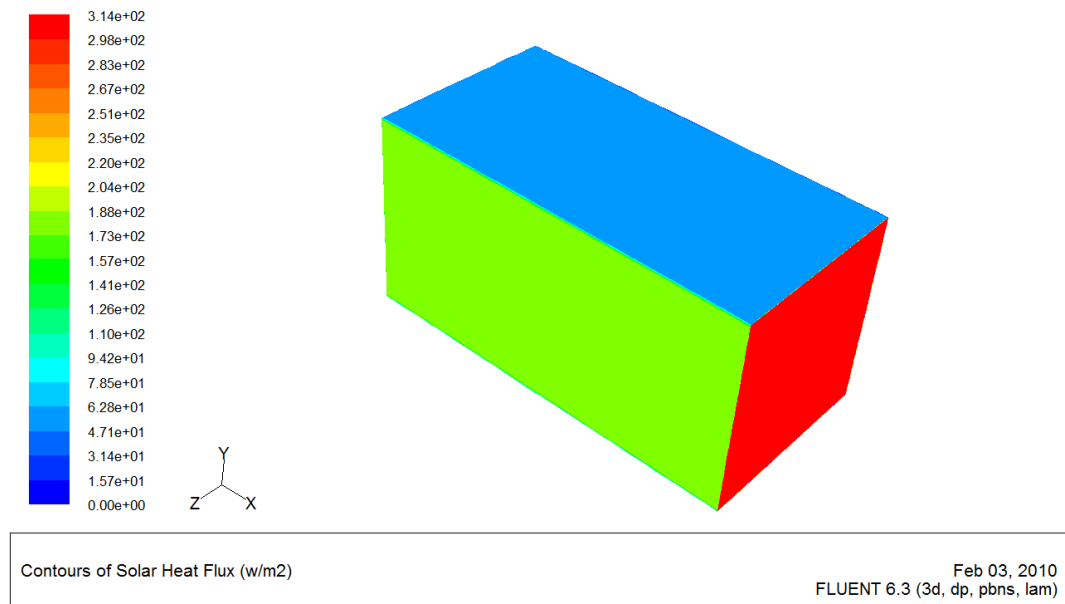


Figura 7.2: Fluxo de calor solar incidente nas superfícies às 8h00 de 1 de Junho, obtido com o Modelo 1 – modelo simples

Esta alternativa não se apresentou contudo uma boa solução, uma vez que o software considera a radiação solar directamente no ar interior, sem ter em conta a parede definida na condição de fronteira.

O modelo 2 – Modelo com ar envolvente, foi o segundo modelo da caravana considerado, Figura 7.3, possuía já paredes e uma camada de ar envolvente. A camada de ar tinha por objectivo contornar o problema respeitante à radiação, que foi evidenciado no modelo anterior. Pretendia-se que o ar fosse uma camada de “ar sólido”, que permitisse que se utilizasse o SRT por ser transparente, Para tal, alterou-se as propriedades do ar de modo a que a sua viscosidade apresentasse um valor de tal modo elevado (2kg/ms) que funcionasse com um sólido. O valor da condutibilidade térmica, foi definido de modo a que a resistência térmica da camada de ar nos 30cm de espessura fosse igual à resistência térmica superficial do ar exterior para $\alpha_{ext}=25$, tendo-se obtido o valor $\lambda=7,5$.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

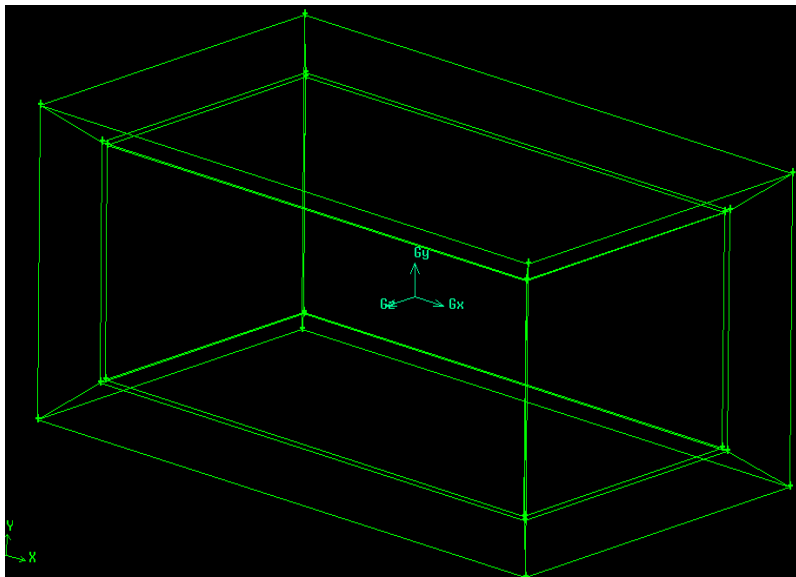


Figura 7.3: Modelo 2- modelo com ar envolvente

Para a criação do modelo representado na figura 7.3, começou por fazer-se um volume correspondente ao volume exterior da caravana: 4mx2mx2m. Separou-se posteriormente esse volume em 2 volumes, um correspondente ao interior da caravana, e outro correspondente à espessura da caravana, que por razões de simplificação considerou-se ter 2,5cm em todas as superfícies. De modo a facilitar a geração da malha, uniram-se então os vértices dos cantos dos referidos volumes, de forma a dividir as paredes segundo as diferentes orientações (tecto, chão, frente, traseira, direita, esquerda), conforme representado na Figura 7.4

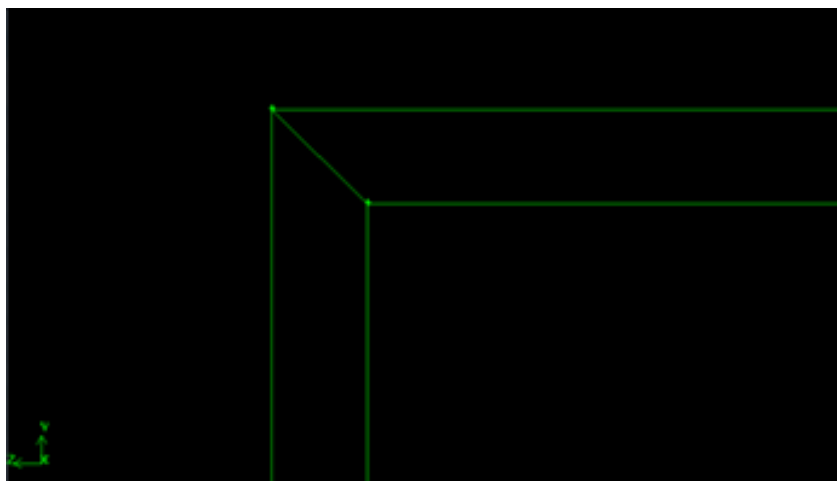


Figura 7.4: Pormenor da ligação entre vértices das paredes

Posteriormente, foi criado um outro volume correspondente à camada de ar exterior. As superfícies deste volume estariam todas a uma distância de 30cm da superfície exterior da caravana. Uniram-se então os vértices deste volume aos do exterior da caravana de um modo análogo ao acima apresentado, essa união é visível na Figura 7.5

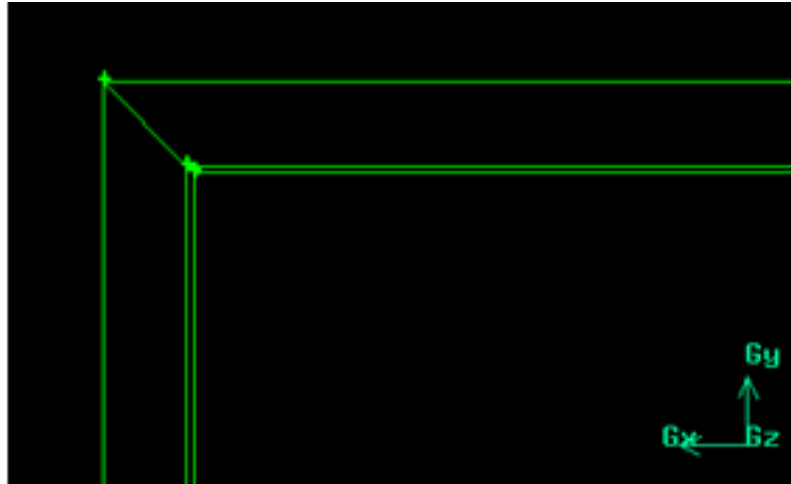


Figura 7.5: Pormenor da ligação entre vértice da parede e vértice do ar exterior

Depois de criado o modelo 2 , figura 7.1, foi necessário proceder à criação da malha que, como já foi visto, seria do tipo estruturada hexaédrica. Por haver uma diferença considerável entre a espessura das paredes da caravana e o tamanho da mesma, usaram-se parâmetros de malha diferentes, na parede e no ar interior. Assim, conseguiu-se que a malha fosse refinada o suficiente para garantir a convergência nas paredes, sem aumentar drasticamente o tempo de cálculo. Ao usar os mesmos parâmetros das paredes na malha interior, ter-se-ia uma malha demasiado densa.

As paredes terão então um total de 27000 elementos, os mesmos que o ar exterior. O ar interior será composto por 54000 elementos. O modelo será composto assim por um total de 108000 elementos. O modelo com a malha encontra-se representado na Figura 7.6

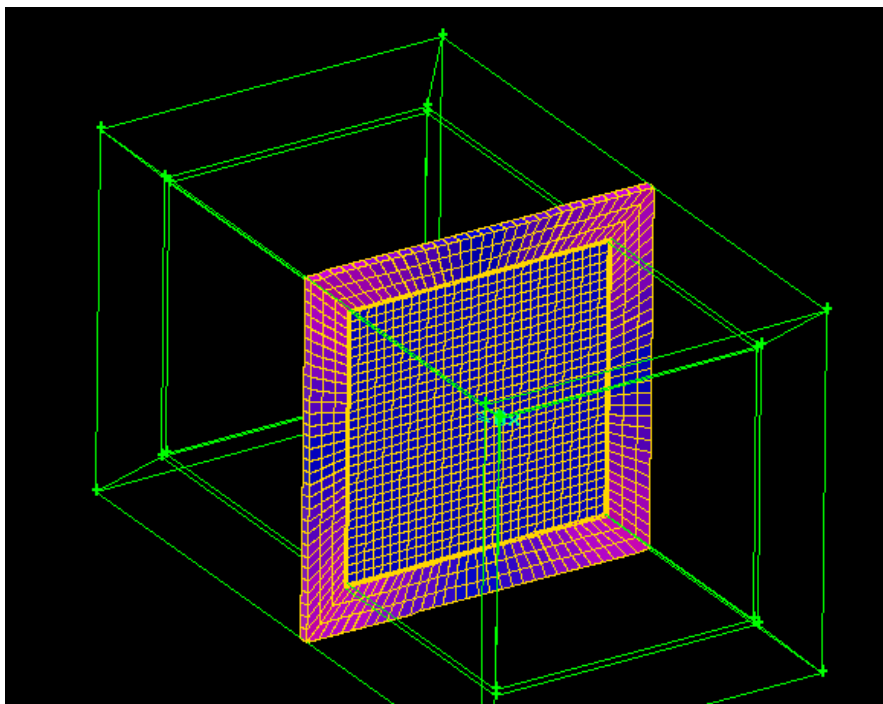


Figura 7.6: Análise da malha do modelo 2

Na figura 7.6 é visível uma distorção nos cantos da caravana, na espessura do ar exterior e das paredes, em que as células da malha têm a forma de um prisma trapezoidal. Essa distorção é em conformidade com a forma das paredes, que tem também elas este formato.

Realizou-se uma simulação em regime transiente, usando o modelo de radiação solar que tinha como objectivo avaliar o comportamento do modelo, nomeadamente no respeitante à radiação solar. Para tal, foi efectuada uma simulação em regime transiente para o dia 1 de Junho das 8h00 às 20h00.

Como condições de fronteira definiu-se que as paredes exteriores da camada de ar-sólido seriam semi-transparentes, com $\tau=1$ e $\alpha=0$ e teriam como condição de fronteira de temperatura, temperatura essa que foi obtida com recurso ao programa SolTerm. As restantes paredes seriam todas opacas com $\alpha=0,8$.

O SRT foi activado para todas as superfícies excepto o chão e a traseira.

Os materiais considerados foram o “ar sólido” para o exterior, já apresentado, e no caso do ar interior considerou-se ar, considerado ideal, pelo que se definiu que a densidade era a de um gás ideal. Considerou-se que quer o ar exterior quer o interior teriam um valor de $\alpha=0$. Por uma questão de simplificação, considerou-se que o material de todas as paredes da caravana, seria o alumínio com as propriedades do Fluent, e $\alpha=0,8$.

Para o modelo 2 a radiação solar nas superfícies da caravana, tomou os valores esperados, para superfícies com $\alpha=0,8$, como é visível na Figura 7.7

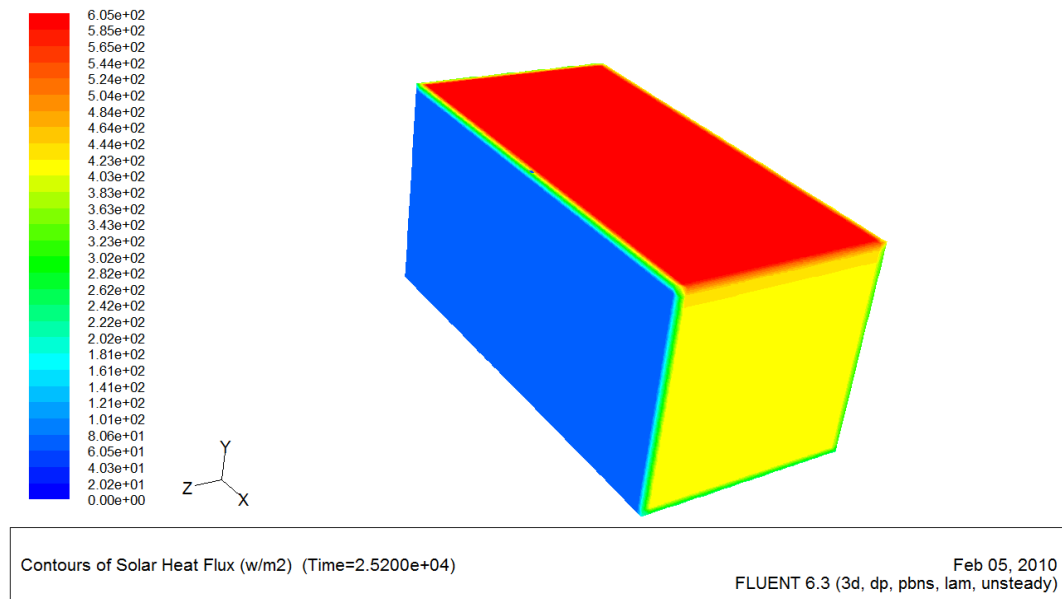


Figura 7.7: Fluxo de calor solar incidente na caravana às 15h00, obtido com o modelo 2

A Figura 7.8 é uma representação da temperatura no interior da caravana, para as 15h. São visíveis duas zonas com maior aquecimento, tecto e frente, zonas onde a radiação solar incidente é maior.

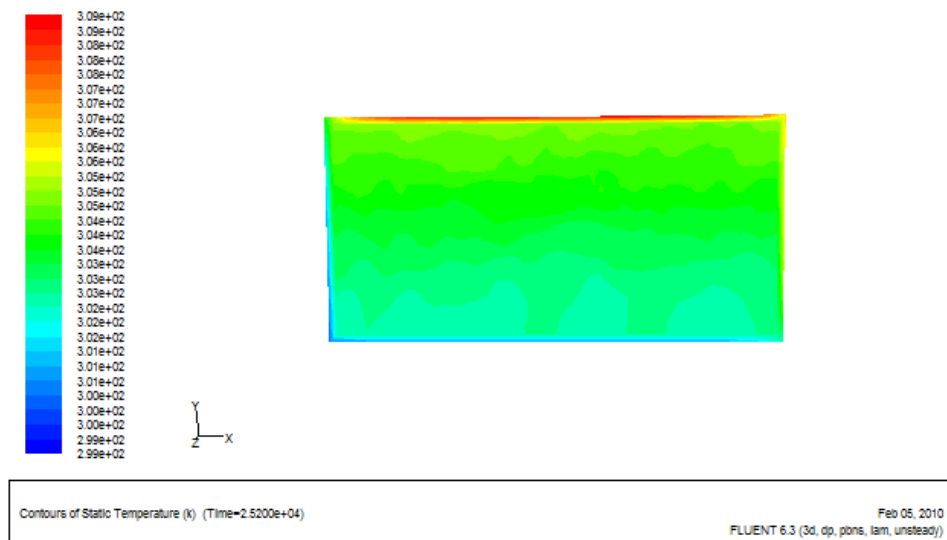


Figura 7.8: Perfil de temperaturas no interior às 15h00, obtido com o modelo 2

O Modelo 3 – Modelo com ar envolvente e janelas, difere do modelo 2 por incluir as janelas. Considerou-se janelas teriam 2,5cm de espessura. Para que fosse possível a criação da malha do tipo hexaedrico estruturado, foi necessário dividir as paredes, nos volumes adjacentes às janelas; essa divisão é visível na Figura 7.9. Considerou-se ainda, por razões de simplificação do modelo, que as janelas teriam todas a mesma dimensão: 1.2metros de comprimento e 0.5metros de altura.

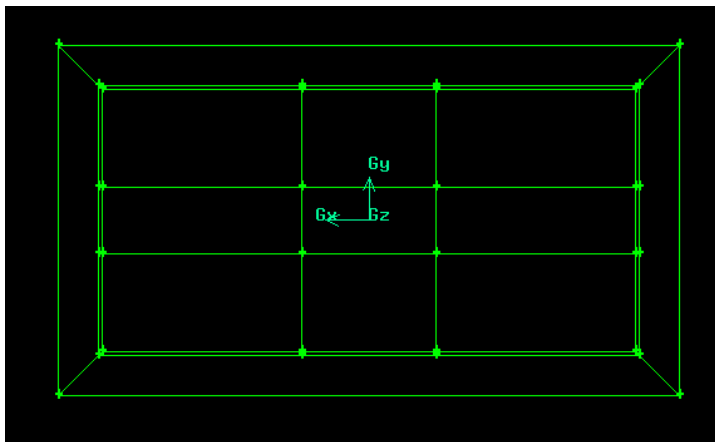


Figura 7.9: Representação da janela e volumes adjacentes numa das paredes do modelo 3

Este modelo, tal como os modelos anteriores, foi construído com malha hexaedrica estruturada, Figura 7.10

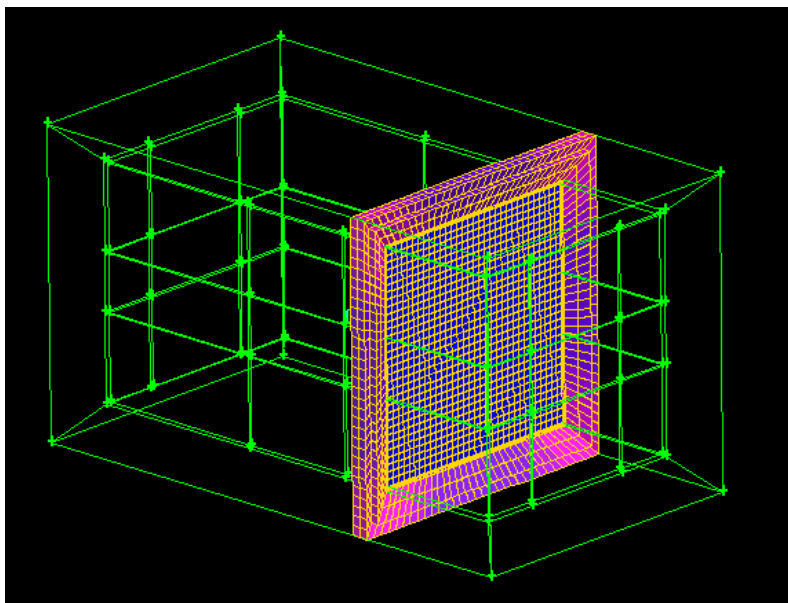


Figura 7.10: Malha estruturada utilizada no modelo 3

Efectuou-se uma simulação para o dia 23 de Setembro. Este dia foi escolhido por ser um dos dias em que se atinge um valor de temperatura mais elevado no interior da caravana,

de acordo com as medições apresentadas no ponto 4.2. Esta simulação, foi realizada em regime transiente, para a cidade do Porto para o dia 23 de Setembro das 8 h às 24h, usando o “Solar Load Model”

Como condições de fronteira definiu-se que as paredes exteriores da camada de ar sólido seriam semi-transparentes, com $\tau=1$ e $\alpha=0$, que as superfícies exterior e interior das janelas seriam semi-transparentes com $\tau=1$ e $\alpha=0$ e que as restantes superfícies seriam todas opacas com $\alpha=0,8$. As superfícies exteriores da camada de “ar sólido”, teriam ainda condição de fronteira de temperatura;

O perfil de temperaturas introduzido como condição de fronteira foi obtido através do Instituto de Meteorologia Português para estação meteorológica de Pedras Rubras.

O SRT foi activado para todas as superfícies excepto o chão e a traseira.

Os materiais (e suas propriedades) definidos para esta simulação, foram idênticos aos do modelo 2 no caso do ar interior e exterior. Para as paredes, utilizou-se a madeira, disponível na base de dados do Fluent, para a qual se definiu um valor de $\alpha=0,4$. Para as janelas, foram definidas as propriedades (equivalentes) do acrílico para o modelo, apresentadas em 7.2. e definiu-se que o acrílico tinha um coeficiente de absorção $\alpha=0,2$.

Com o modelo 3, já foi possível o recurso ao SRT para simular a radiação solar que “entra” pelas janelas. A figura 7.11 representa o interior da caravana, onde é visível o fluxo de calor solar, originado pela radiação que atravessa as janelas atingindo o interior da caravana.

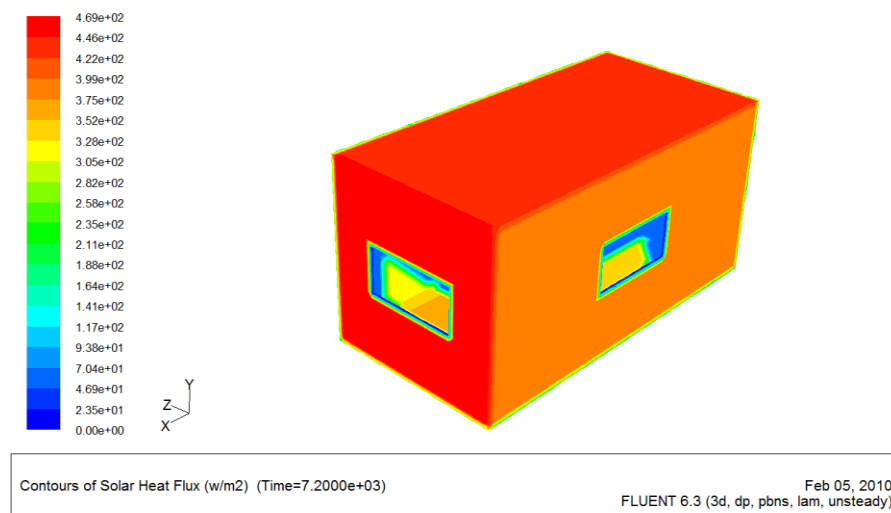


Figura 7.11: Fluxo de calor solar incidente na caravana às 15h obtido com o modelo 3

A Figura 7.12 representa o perfil de temperaturas obtido através da simulação efectuada de acordo com os parâmetros acima considerados, no interior da caravana às 15h00, apresentado no plano xoy. É visível o aumento de temperatura no chão, devido à radiação que “entra” pelas janelas.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

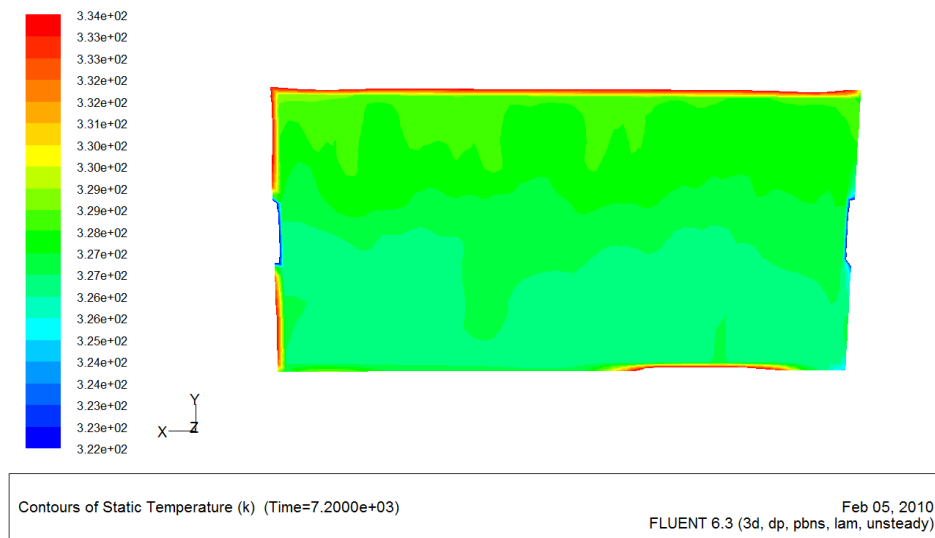


Figura 7.12: Temperatura do ar no interior da caravana às 15h, obtida com o modelo 3

Seguidamente, de forma a aproximar o modelo da realidade, o modelo 3 foi alterado de modo a que fosse possível definir um material para o chão, um para o tecto, e um para as paredes laterais da caravana. Assumiram-se os mesmos parâmetros da simulação anterior, tendo sido consideradas as propriedades das paredes de acordo com o descrito no ponto 7.2.

Esta simulação não deu contudo resultados satisfatórios pois, como é visível na figura seguinte, a temperatura nas paredes desce.

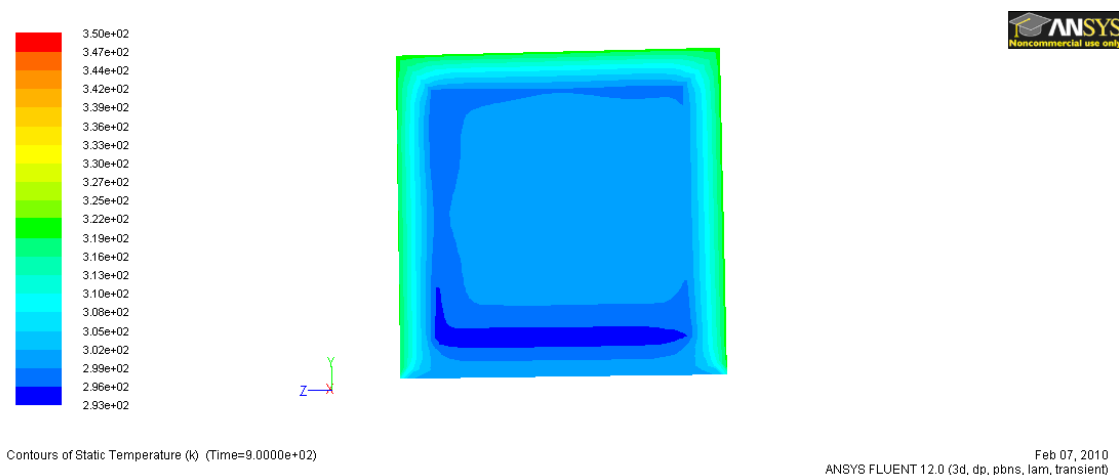


Figura 7.13: Temperatura na caravana para o modelo 3- caso 2

Pelo facto de os modelos com a radiação definida através do modelo solar do Fluent não terem dado resultados satisfatórios, foi criado um novo modelo, em que a radiação solar seria introduzida de acordo com os conceitos de T_{ar-sol} e $T_{envidraçados}$, referidos no ponto 7.3.

Assim o modelo com ar exterior foi substituído por um outro, Figura 7.14, em que estavam apenas definidas as paredes, janelas e ar exterior.

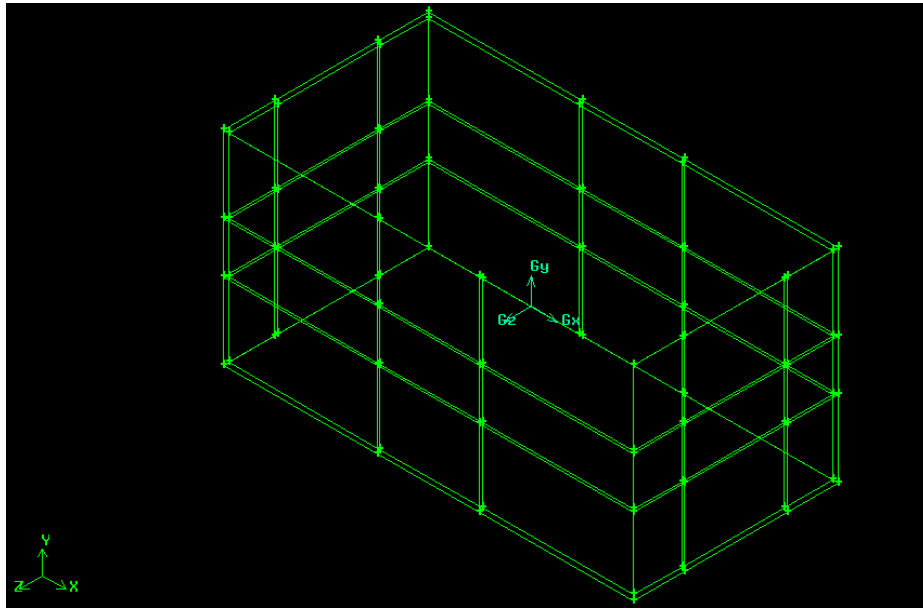


Figura 7.14:Modelo final da caravana

. A malha gerada para o modelo 4 é igual à gerada no modelo 3 (sem contar com o ar exterior), contabilizando no entanto, 3 nós no sentido da espessura. A malha gerada tinha um total de 106496 elementos, A Figura 7.15 é uma representação da malha obtida no modelo 4.

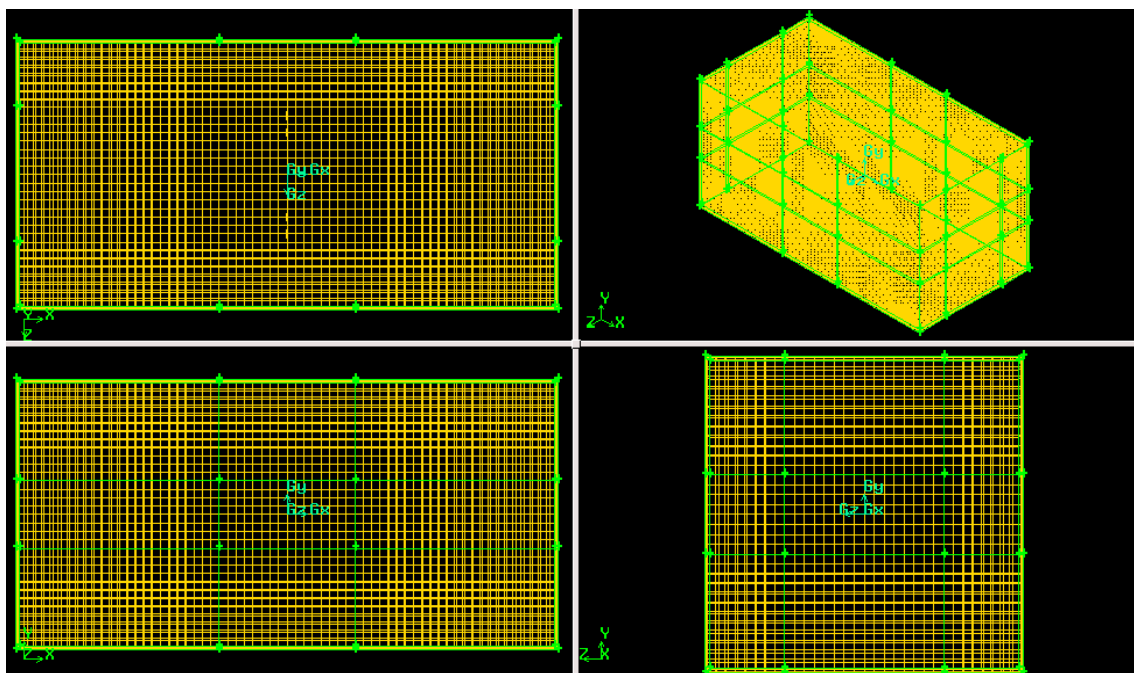


Figura 7.15: Modelo final com malha

Para o modelo acima apresentado foram então efectuadas duas simulações em regime transiente. Pretendia-se simular a evolução do perfil de temperaturas no interior da caravana, para um dia de sol no Porto, para diferentes valores de velocidade do vento, e compara-los com os valores obtidos experimentalmente. Seleccionou-se então o dia 23 de Setembro e, para esse dia, recorrendo à temperatura do ar exterior para estação meteorológica de Pedras Rubras obtida no Instituto de Meteorologia Português, foram criados os perfis de temperatura a introduzir como condição de fronteira de convecção para as superfícies exteriores, recorrendo à expressão 5.6, para $\alpha_{ext}=6 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $\alpha_{ext}=12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pelo facto de a caravana não estar exposta a radiação solar directa durante a manhã, considerou-se na simulação que não haveria radiação incidente até às 2h da tarde

Para o cálculo dos perfis de temperatura, considerou-se que as paredes teriam todo um coeficiente de absorção $\alpha=0,4$. Considerou-se que o perfil a introduzir nas janelas seria igual ao das paredes adjacentes.

As propriedades dos materiais foram definidas de acordo com o referido no ponto 7.5. Nas simulações efectuadas, não foram tidas em consideração as trocas de calor por infiltração, devido à dificuldade na modelação das mesmas. Também não foram tidos em conta os ganhos internos de calor

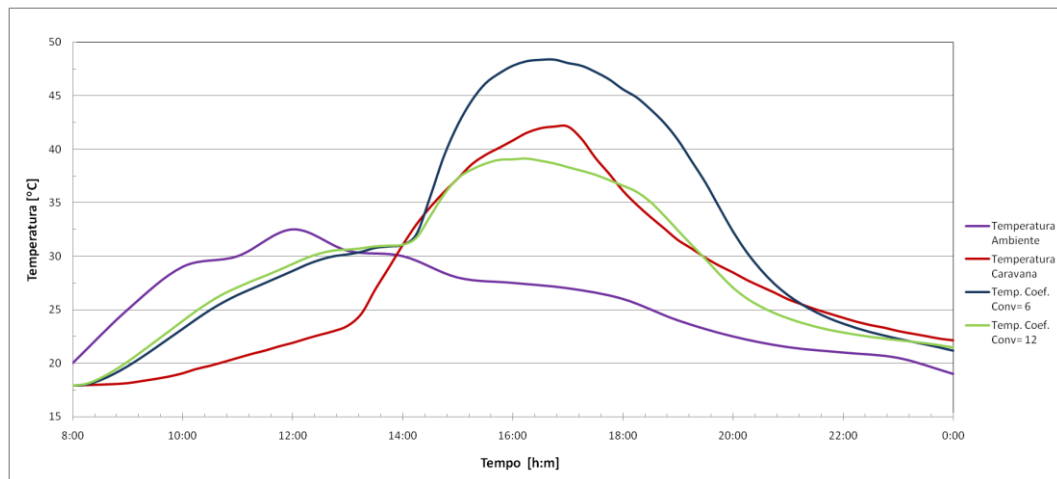


Figura 7.16: Evolução da temperatura para o dia 23 de Setembro

A Figura 7.16 representa a evolução da temperatura do ar no interior da caravana, para a localização do sensor de temperatura, obtida por simulação. É também representada temperatura ambiente. Pela análise da figura anterior, pode-se tirar algumas ilações:

Por um lado, poderá não ter sido muito acertada não se ter considerado a radiação solar até às 14h00. De facto, existe uma zona de transição a partir das 12h00, em que a caravana se encontra parcialmente exposta ao sol. Assim, há uma divergência considerável entre os resultados obtidos e as medições efectuadas para essa zona de transição. A partir das 14h00, apesar de uma divergência de amplitude entre as duas curvas de temperatura obtidas por simulação ($\alpha_{\text{ext}}=6\text{W/m}^2\text{K}$ e $\alpha_{\text{ext}}=12\text{W/m}^2\text{K}$) e a curva de temperatura obtida experimentalmente, as três curvas são idênticas na sua relação temporal.

Por outro lado, o facto de o perfil de temperaturas utilizado ser o da estação meteorológica de Pedras Rubras, afectou também a qualidade dos resultados obtidos, pois poderá haver um desvio significativo nos valores da temperatura ambiente em Pedras Rubras, e os sentidos nesse mesmo dia para o Porto, razão pela qual poderá haver uma grande divergência nos resultados obtidos para a manhã.

As Figuras 7.17 e 7.18, apresentam os resultados do perfil de temperaturas obtido através das simulações acima apresentadas, para as 15h00. É visível uma estratificação térmica considerável, e a obtenção de temperaturas muito elevadas nas regiões próximas do tecto, zona onde a radiação incidente é máxima. A velocidade do vento no exterior afecta o perfil de temperaturas no interior da caravana, atenuando significativamente a estratificação térmica.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

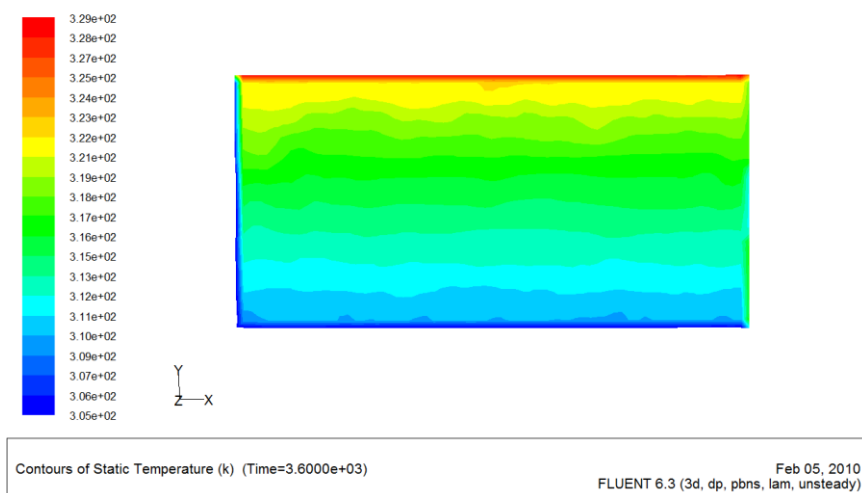


Figura 7.17: Temperaturas na caravana às 15h00 num plano xoy para a simulação com $\alpha_{ext}=6\text{W/m}^2\text{K}$ Resultados obtidos com o modelo 4

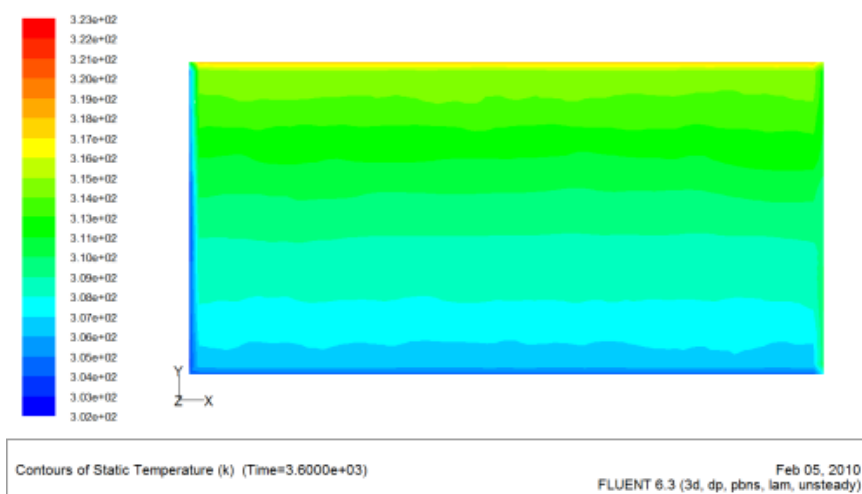


Figura 7.18: Temperaturas na caravana às 15h00 num plano xoy para a simulação com $\alpha_{ext}=12\text{W/m}^2\text{K}$ Resultados obtidos com o modelo 4

Como já foi acima referido, o facto de a temperatura exterior utilizada ser a da estação meteorológica de Pedras Rubras, afecta bastante a qualidade dos resultados. Por esse facto, e por se ter verificado que existiam dados respeitantes à temperatura do ar exterior na FEUP a partir do dia 5 de Outubro de 2009, foram efectuadas novas simulações, com a temperatura do ar exterior medida na FEUP.

Os parâmetros introduzidos no Fluent, referentes às simulações dos modelos 1 a 4 encontram-se apresentados em anexo como Anexo G

7.4. Validação do Modelo

As simulações efectuadas para o Porto, pretendia-se que servissem para validar o modelo. Essa validação seria feita por comparação dos resultados obtidos por simulação com os valores da temperatura interior medida na caravana, anexo F, descrito em 4.2. Conforme é visível na Figura 4.4, também representada em 4.2., existem diversos dias em que as temperaturas atingem valores superiores a 40°C. Seleccionou-se então, o dia 14 de Outubro, por não haver para os restantes picos de temperatura, dados da temperatura exterior da caravana.

O fluxo de calor devido à radiação solar incidente foi considerado para estas simulações de acordo com o referido no ponto 7.1. Assim, foi calculado um perfil de temperaturas para as paredes considerando um $\alpha=0,4$, e no caso das janelas considerou-se $\alpha=0,04$ e $\tau=0,61$.

Para esse dia foram efectuadas simulações para diferentes valores de coeficiente de transmissão térmica no exterior da caravana. Pelo facto de a altitude do sol em Outubro já começar a ser relativamente baixa, a caravana só estaria toda ao sol e portanto, nas condições ideais para simulação a partir das 14h. Assim, foram realizadas simulações para o dia 14 de Outubro, entre as 14h00 e as 22h. A Figura 7.19 representa a evolução das temperaturas no exterior e no interior da caravana, para o dia 14 de Outubro utilizadas nas simulações de validação do modelo.

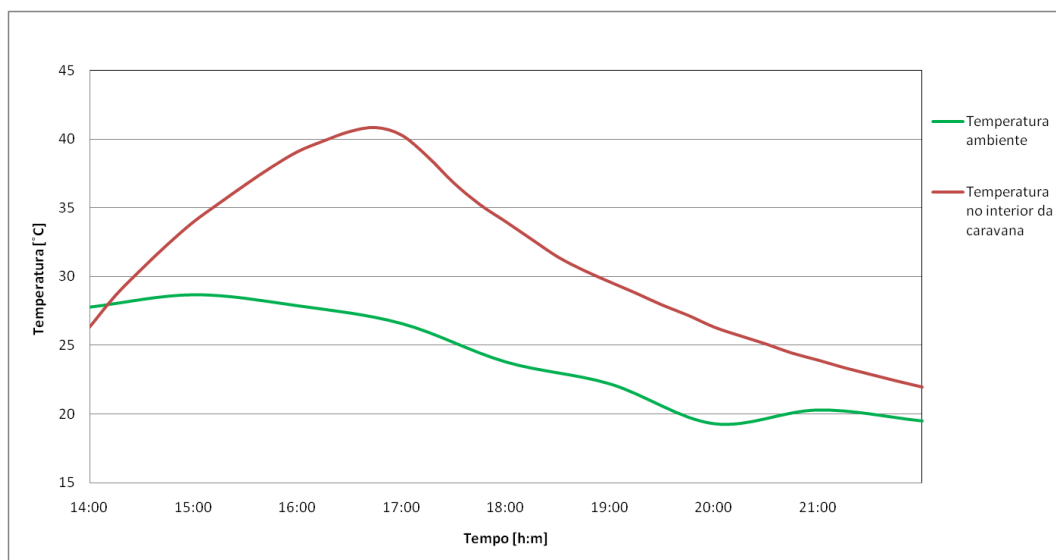


Figura 7.19: Temperaturas medidas no exterior e interior da caravana no dia 14 de Outubro de 2009

Os valores da temperatura exterior foram obtidos a partir da estação meteorológica da FEUP para esse mesmo dia.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Como não se conseguiu obter os valores de radiação para esse dia, usaram-se os valores correspondentes ao dia de menor nebulosidade correspondentes ao “ano meteorológico tipo” para cidade do Porto, num intervalo compreendido entre os 15 dias anteriores ao dia 14 de Outubro e os 15 dias que se lhe sucederam. A Figura 7.20 , representa a radiação global horizontal seleccionada para simulação. Esta radiação, coincidentemente é a do próprio dia 14 de Outubro do “ano meteorológico tipo”[1] da Cidade do Porto, para o qual o índice de nebulosidade apresentava valores um valor médio de 3 numa escala de [0 a 10]

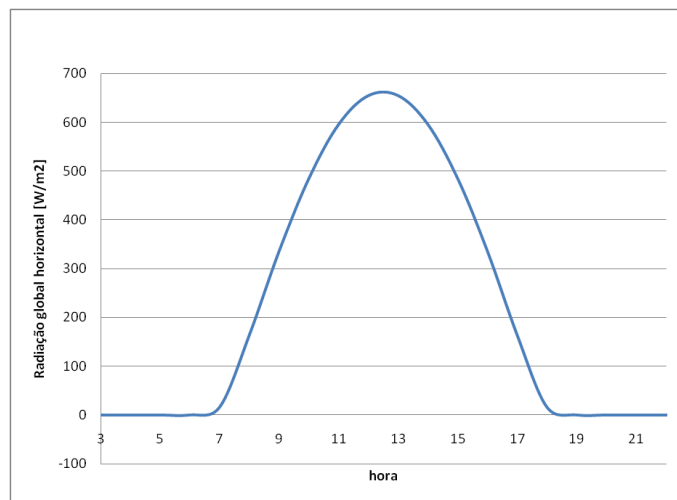


Figura 7.20: Radiação global horizontal para o dia 14 de Outubro na cidade do Porto

Por não se conhecer a velocidade do vento no local onde se encontrava a caravana, aquando da determinação experimental no interior da caravana, para o dia 14 de Outubro, foram realizadas três simulações, para coeficientes de convecção exterior diferentes: 6, 10 e 25 W/m².K. A Figura 7.21 mostra a evolução da temperatura no interior da caravana para a localização do sensor de temperatura, para as três simulações apresentadas anteriormente

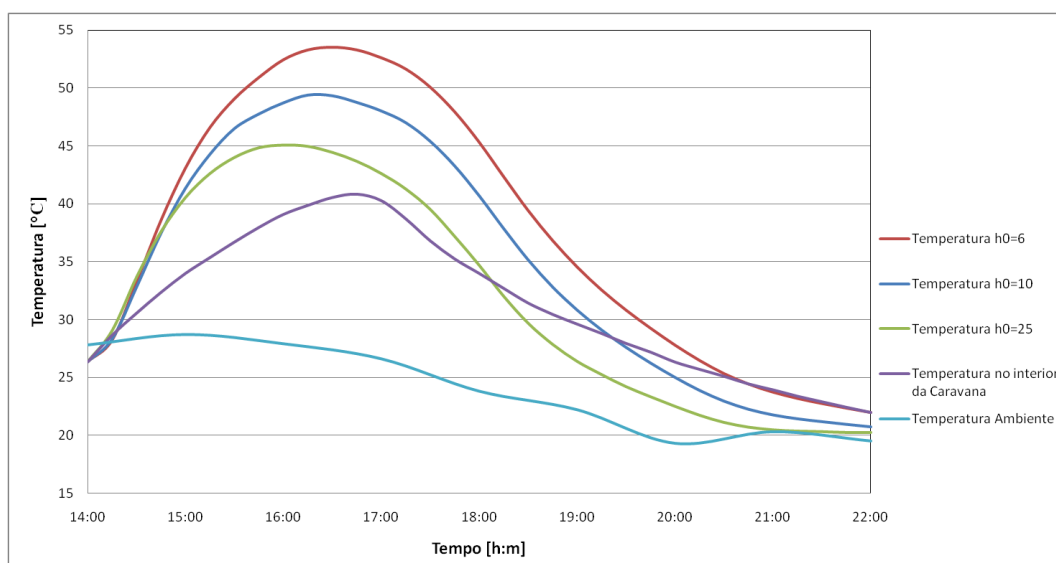


Figura 7.21 – Temperaturas no interior da caravana calculadas por simulação e temperaturas experimentais

A análise da evolução das temperaturas obtidas por simulação, permite-nos tirar algumas ilações:

A temperatura do ar no interior da caravana, para a simulação com $\alpha_{\text{ext}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ é, ligeiramente superior à temperatura medida experimentalmente durante as horas de maior radiação, como era de esperar por não ter em conta as infiltrações. No entanto, a partir do momento em que a radiação solar se torna diminuta, a temperatura é inferior à medida. Esta situação, indicia que a velocidade do vento exterior a que o valor $\alpha_{\text{ext}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ considerado na simulação, seria bastante superior à velocidade do vento real que se verificou aquando das medições experimentais.

Para os coeficientes $\alpha_{\text{ext}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $\alpha_{\text{ext}} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$, a temperatura obtida para o interior da caravana, é superior à medida na caravana durante as horas de radiação, comportamento esperado por não serem consideradas as infiltrações no interior da caravana. Essa diferença de temperatura é tanto maior quanto menor a velocidade do vento. No entanto, finda a radiação, a temperatura para o interior da simulação torna-se inferior à temperatura obtida experimentalmente, se bem que no caso de $\alpha_{\text{ext}} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$, esta diferença ser muito pequena. No caso em que $\alpha_{\text{ext}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, esta situação poderia dever-se a ter sido mais uma vez considerada uma velocidade de vento excessiva, o que implicaria que o coeficiente α_{ext} seria também ele excessivo, situação pouco provável, uma vez que a velocidade do vento para $\alpha_{\text{ext}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, já toma valores muito baixos. Já no caso em que $\alpha_{\text{ext}} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$, tal situação nunca poderia acontecer: Para um coeficiente de convecção igual ou inferior ao real, a temperatura sem infiltrações nunca poderá ser inferior à temperatura com infiltrações, a menos que haja uma subida da temperatura exterior para valores que sejam superiores aos do interior da caravana, isto acrescido do facto de a velocidade do vento aquando das medições experimentais poder ter sido baixa, mas nunca tão baixo. Seria praticamente impossível que a caravana não tivesse estado afectada pela acção do vento.

Outra justificação para os resultados obtidos é devido às dimensões e propriedades dos materiais seleccionados poderem ser ligeiramente diferentes das propriedades reais dos materiais existentes na caravana. Apesar das diferenças apresentadas entre o modelo criado e os resultados experimentais, aceitou-se este modelo para que fossem efectuadas as simulações para Moura, pois mediante os dados experimentais disponíveis, a validação do modelo era uma tarefa praticamente impossível.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

As Figuras 7.22 a 7.24 são representações do perfil de temperaturas no interior da caravana, no plano xoy, para o dia 14 de Outubro às 15h00, para $\alpha=6, 10$ e $25 \text{ W/m}^2\text{K}$

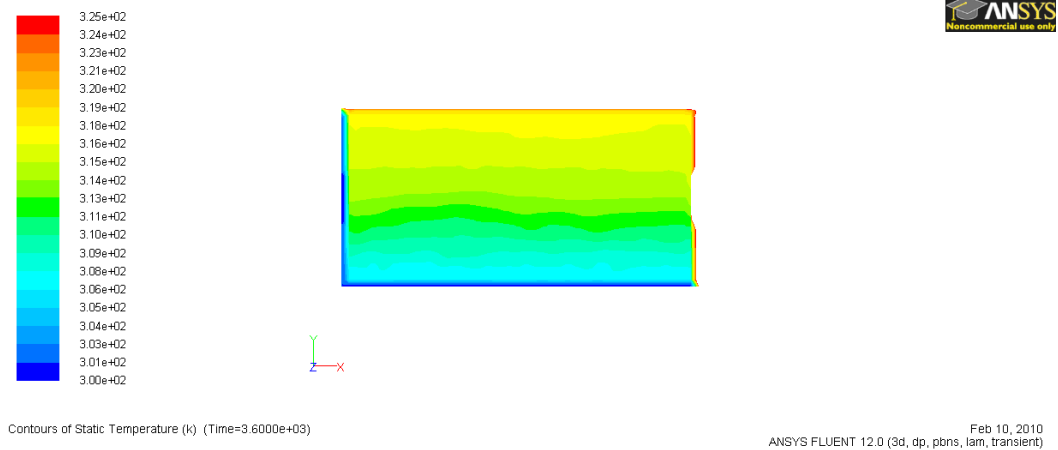


Figura 7.22: Perfil de temperaturas para o Porto - $\alpha=6 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 15h00
Resultados do modelo 4 - caravana

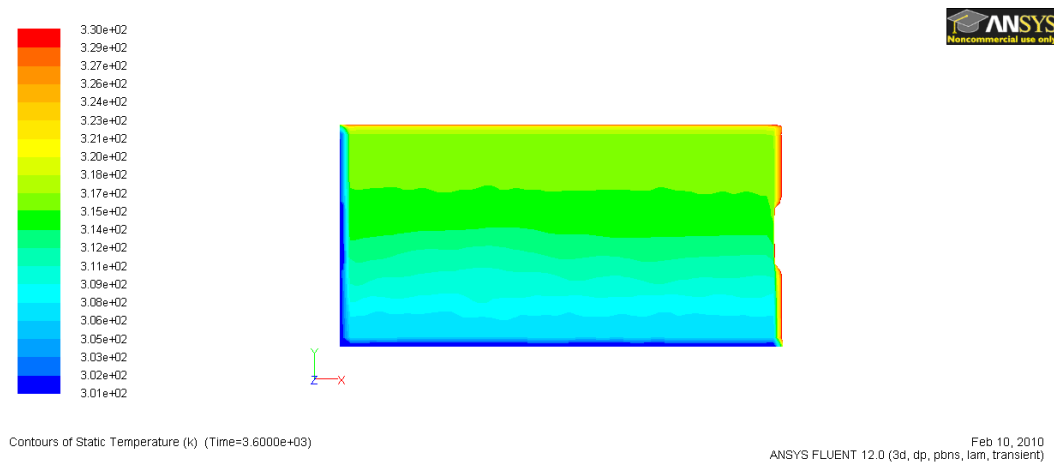


Figura 7.23: Perfil de temperaturas para o Porto - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 15h00
Resultados do modelo 4 - caravana

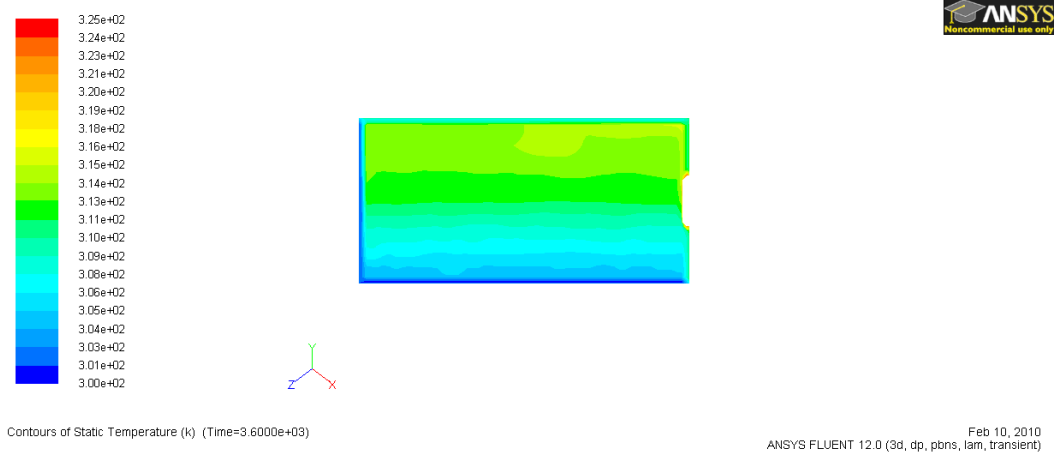


**Figura 7.24: Perfil de temperaturas para o Porto - $\alpha=25$ W/m²K às 15h00
Resultado do Modelo 4 - caravana**

É visível pela análise das figuras 7.22 a 7.24 s, uma grande estratificação térmica, especialmente no primeiro caso, figura 7.22, em que a velocidade do vento é nula.

Para que fosse possível uma correcta avaliação do modelo, e posterior validação deveria ter sido feita uma análise experimental mais extensiva: deveriam ter sido feitas medições de temperatura em diversos locais da caravana em simultâneo; deveria ter sido medida a velocidade do vento no local; deveriam ter sido recolhidos dados respeitantes à radiação solar incidente na caravana, num local sem sombreamento. Tendo em conta todas as incógnitas apontadas e os resultados experimentais disponíveis e aos resultados obtidos, ficarem próximos do esperado, o modelo 4 foi o melhor modelo desenvolvido e que vai ser utilizado nas simulações seguintes. O modelo 4 será a partir de agora designado por modelo.

Os parâmetros introduzidos no Fluent, respeitantes às simulações efectuadas com o modelo, encontram-se apresentadas em anexo como anexo G.

7.5. Resultados do modelo sem sistema de refrigeração

A região escolhida para o estudo foi a região de Moura no Alentejo, que é conforme visto no ponto 5.6., a região mais desfavorecida em Portugal. Então, a partir do ano meteorológico tipo para a região de Moura, obtido através do programa SolTerm, foi calculado o dia do ano, em que a carga térmica na caravana tomaria o valor maior, tendo-se concluído que este dia seria o dia 26 de Julho.

Foram feitas três simulações para o dia mais desfavorável do ano meteorológico tipo para Moura, e foram utilizados os valores de temperatura e radiação desse dia para a construção dos perfis de temperatura a introduzir como condições de fronteira no Fluent, recorrendo mais uma vez às expressões 5.6 e 5.7.

A figura 7.25 representa a radiação global horizontal para o dia 24 de Julho em Moura.

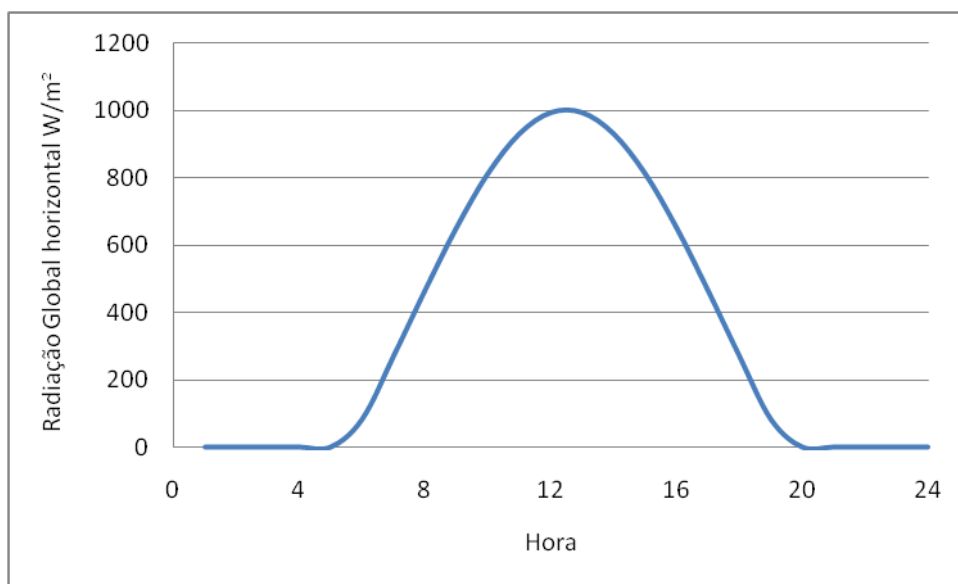


Figura 7.25 Radiação Global horizontal para o dia 24 de Julho em Moura

Foram feitas simulações para valores de coeficiente de convecção no exterior de 10 e 25 W/m²K. A Figura 7.26 representa a evolução da temperatura média do ar no interior da caravana obtida por simulação, para esses mesmos valores de coeficiente de convecção exterior. Representa também a temperatura ambiente

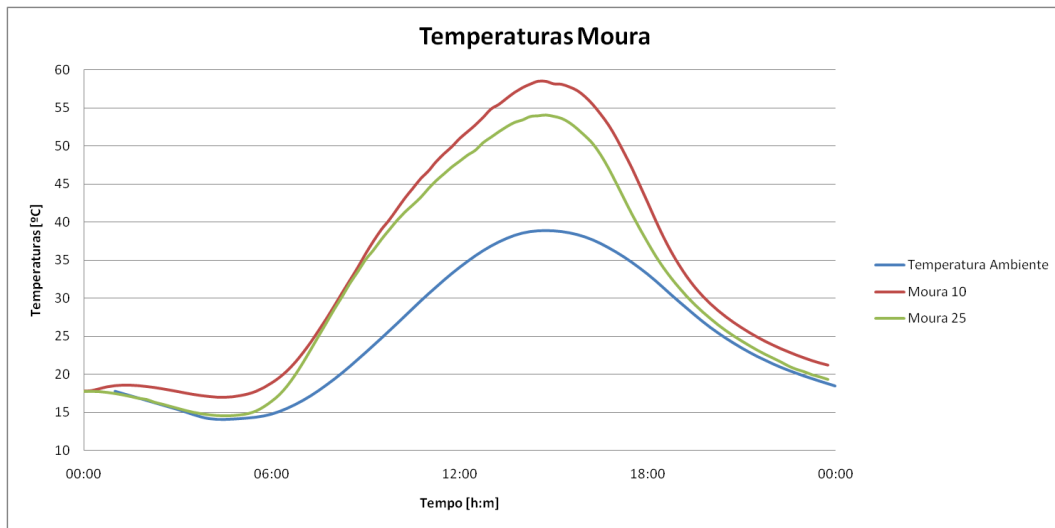


Figura 7.26: Temperaturas em Moura

Como se pode verificar da figura 7.26, atingem-se valores de temperatura bastante elevados, chegando mesmo a valores da ordem dos 58 °C no caso da simulação com um $\alpha_{\text{ext}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$

As Figuras 7.27 e 7.28, representam o perfil de temperaturas no interior da caravana, para as 15 horas do dia 26 de Julho, para valores de α_{ext} de 10 e 25 $\text{W/m}^2\text{K}$

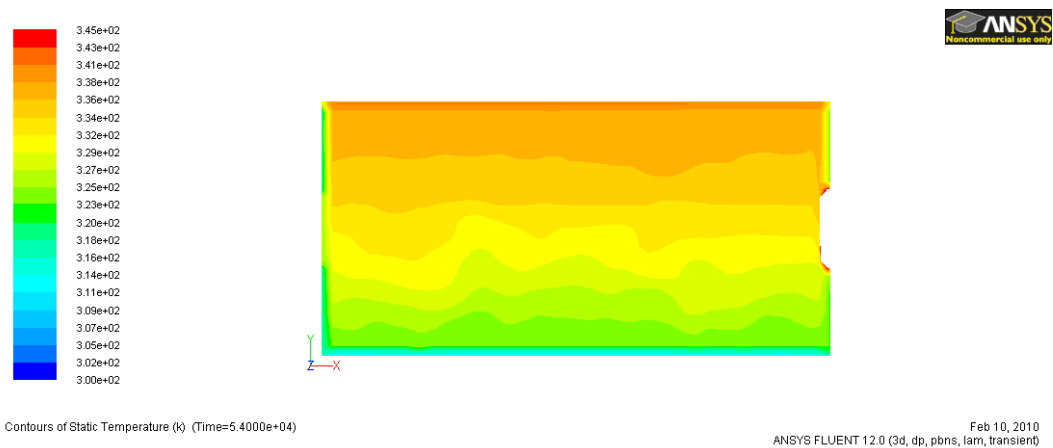


Figura 7.27: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=25 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 15h00
Resultados do modelo

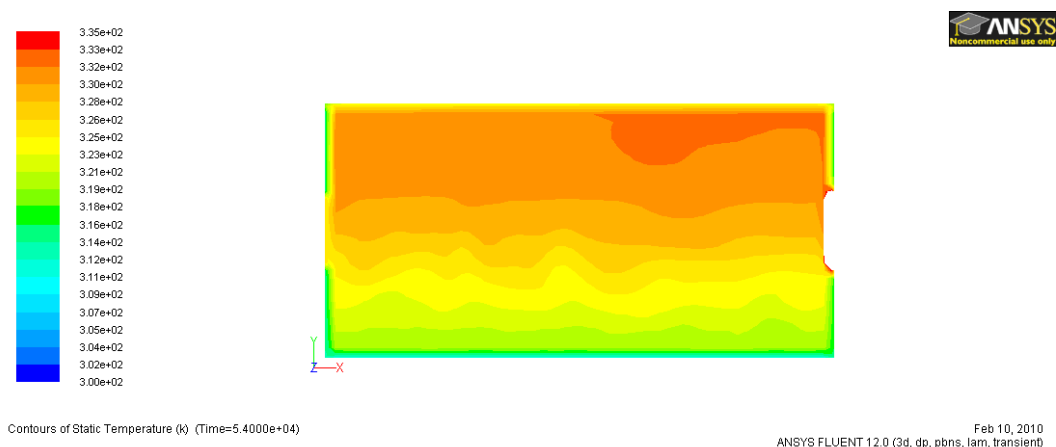


Figura 7.28: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=25$ W/m²K às 15h00
Resultados do modelo

Como se pode verificar pelas figuras anteriores existe um diferencial de temperaturas muito grande na caravana. Chegam-se a atingir diferenças superiores a 10 °C entre o ar à altura do chão e o ar à altura do tecto. Esta estratificação tão elevada deve-se sobretudo ao facto de por um lado não terem sido consideradas as infiltrações, e por outro lado ao facto de o perfil de temperaturas ser alterado pelo facto de o fluxo de radiação solar que atinge as janelas ser considerado nas próprias janelas e não nas superfícies interiores.

Os resultados obtidos através das simulações efectuadas, mostraram que a caravana, quando exposta e elevados índices de radiação solar e a temperaturas exteriores elevadas, atinge valores de temperatura no interior da caravana, bastante elevadas, pelo que a introdução de um sistema de refrigeração ambiente na caravana é imprescindível para obter algum conforto térmico no interior da caravana.

7.6. Simulação do modelo com sistema de refrigeração

Posteriormente foi realizada uma simulação, onde se pretendia avaliar o comportamento do ar no interior da caravana, com o sistema de refrigeração. Tendo sido para o efeito efectuada uma ligeira alteração ao modelo de modo a contemplar o sistema de refrigeração. Essa alteração é visível na Figura 7.29. Os parâmetros de malha foram os definidos no modelo.

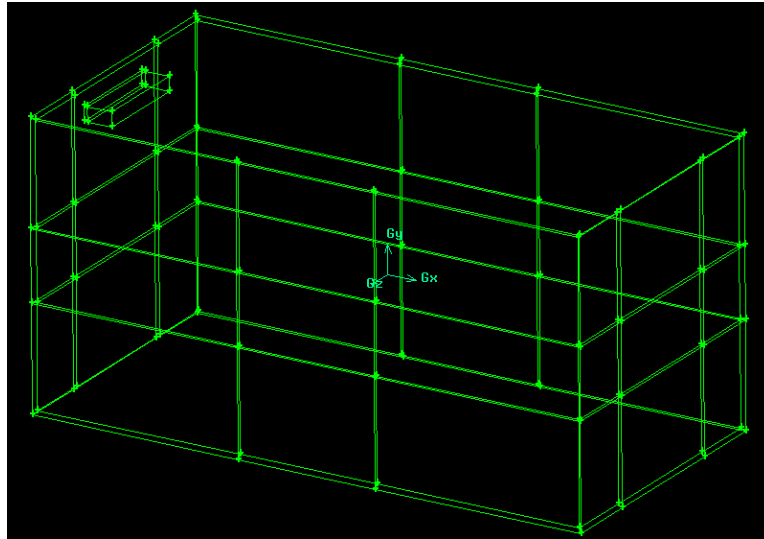


Figura 7.29: Modelo final com sistema de refrigeração

Para o modelo acima apresentado foi então efectuada uma simulação em regime transiente, tendo as condições de fronteira sido definidas para os valores de temperatura e radiação utilizados no ponto 5.6 para o cálculo da carga térmica. A radiação foi também neste modelo contabilizada de acordo com o definido em 7.1. Como o modelo não contempla a carga térmica relativa às infiltrações e aos ganhos internos, a carga térmica total a retirar da caravana será de 1500W.

Para simular o sistema de refrigeração foi necessário modelar um fluxo de ar frio e entrar na caravana. Isto foi definido através de uma condição de fronteira do tipo “Pressure Outlet”. Para determinar a pressão necessária à definição da condição de fronteira recorreu-se à seguinte expressão:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (7.16)$$

$$C_p = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta T = 12^\circ\text{C}$$

A expressão anterior permite determinar o valor de $\dot{m}$.

$$\dot{m} = 0,248\text{kg/s}$$

Então, o valor da pressão relativa a introduzir na condição de Fronteira Pressure Outlet será dada por:

$$p = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (7.17)$$

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

, em que

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad 7.18)$$

Obtiveram-se então os seguintes resultados:

$$v = 2,96 \text{ m/s;}$$

$$p = 5,26 \text{ Pa.}$$

Para haver conservação da massa teve de se criar uma condição de fronteira do tipo “Pressure Inlet”. Essa condição foi definida para as superfícies laterais do sistema de refrigeração. Recorreu-se também à expressão 7.17 para o cálculo da pressão a introduzir com condição de fronteira. Obteve-se então o seguinte valor para a pressão:

$$p = 1,007 \text{ Pa.}$$

As Figuras 7.30 a 7.32 que se seguem representam a evolução da temperatura no interior da caravana para a simulação acima apresentada, ao longo do tempo.

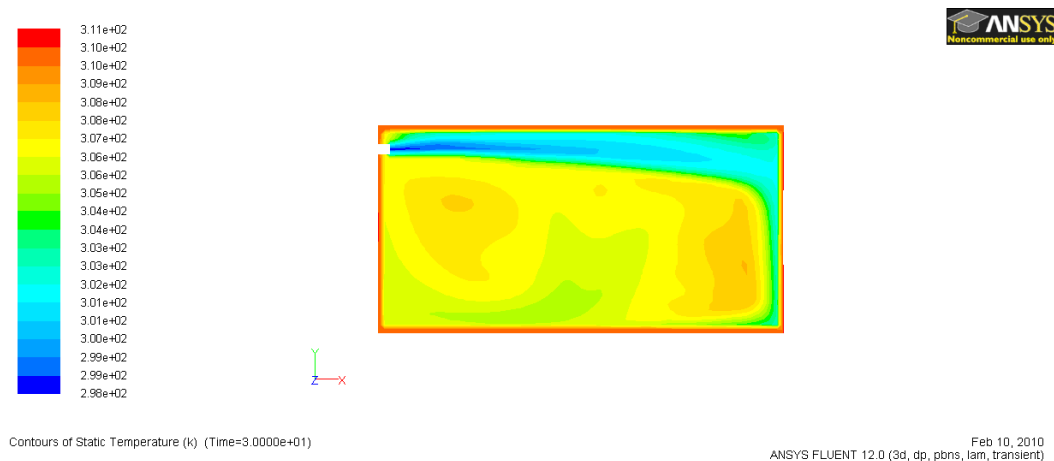


Figura 7.30: Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 30s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

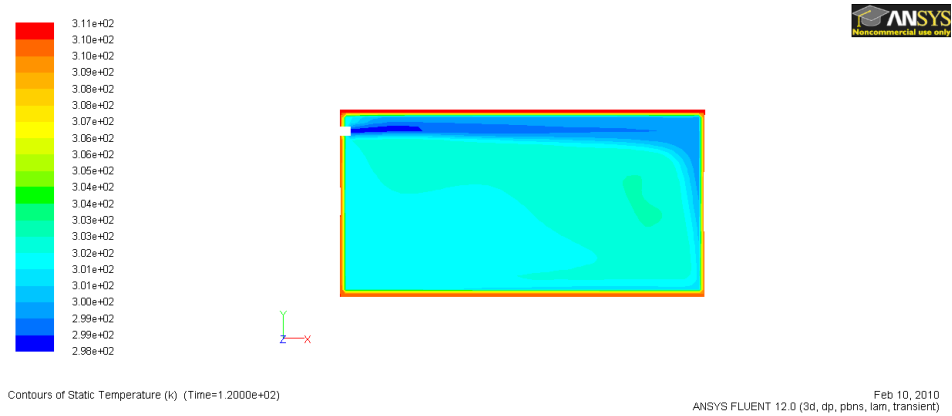


Figura 7.31: Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 120s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.

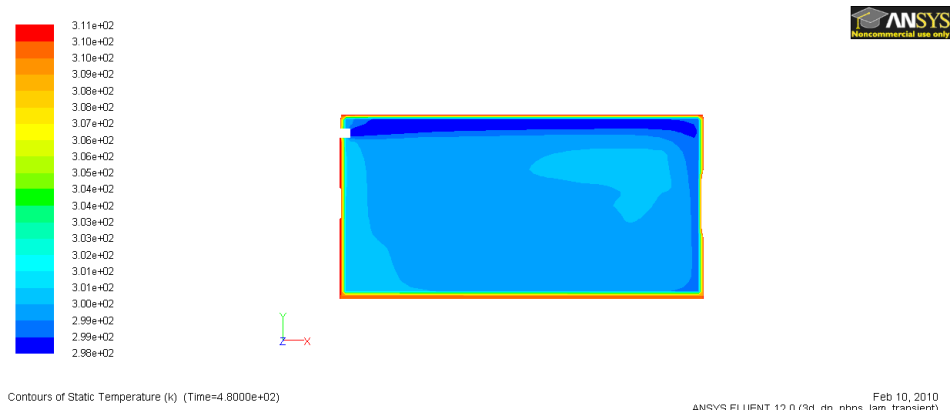


Figura 7.32: Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 480s: Campo de temperaturas (K) do ar interior.

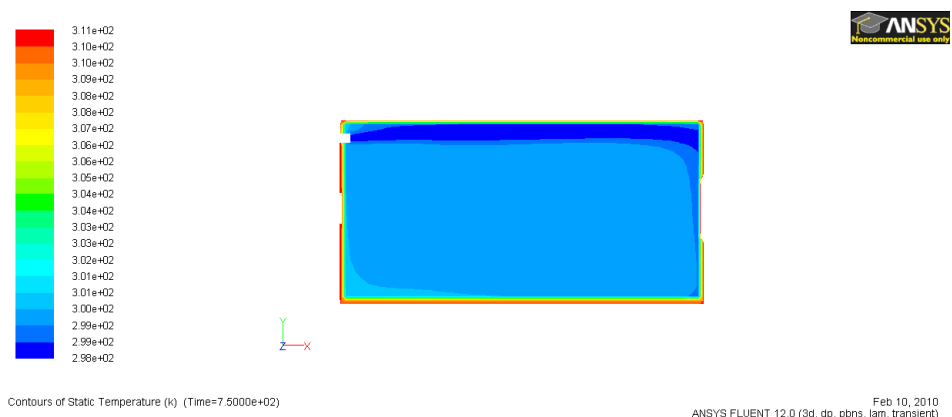


Figura 7.33 Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 750s: Campo de temperaturas (K) do ar interior

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Como se pode verificar pela análise das figuras anteriores, a temperatura no interior da caravana, atinge valores próximos da temperatura de conforto cerca de 480s após o arranque do sistema de refrigeração.

8. Análise económica

O sistema de refrigeração assistido por painéis fotovoltaicos seleccionado para a caravana, constitui um investimento muito elevado. Uma forma de rentabilizar ao máximo esse investimento, seria vender electricidade à rede, nos momentos em que a caravana não estivesse alugada e, portanto, com uma localização fixa, no parque da empresa. A análise que se segue foi realizada, para o parque da Campinanda localizado em Leça da Palmeira, Porto.

O Decreto – Lei 363/2007 estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de unidades de microprodução.

A alínea b) do ponto 1 do artigo 9º do Decreto – Lei 363/2007, estabelece que os produtores de electricidade têm acesso a dois regimes: regime geral e regime bonificado para unidades de ligação até 3,68 kWh (como é o caso). Teriam acesso a este entre outros casos, regime os produtores que disponham de colectores solares térmicos para aquecimento de água de consumo com uma área superior a 2m² de área de colector. Apesar de esta condição não se ter conhecimento se tal situação verifica na empresa, partiu-se do princípio que tal condição existiria, (tanto mais que não representa um custo muito significativo e com todos os benefícios que acarreta).

A tarifa do regime bonificado, alínea b) do ponto 5 do artigo 10º é estabelecida da seguinte forma:

- Fixa e de valor igual a 0.65€ durante 5 anos e decresce 5% por cada 10MW de potência instalados a nível nacional.
- Após os primeiros 5 anos (excluindo o ano de ligação) e durante os 10 anos seguintes, será aplicado um preço igual ao das instalações que se registem nesse ano e que utilizem a mesma tecnologia
- Após o período de 15 anos é aplicado o preço vigente no regime geral.

Considerando um crescimento anual de 20% na potência instalada a nível Nacional desde 2008 [50], e que o preço do regime geral se mantém constante, a tarifa será a seguinte

Tabela 8.1: Tarifa para o regime bonificado

Ano																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Tarifa[€]	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.51	0.48	0.45	0.41	0.36	0.30	0.23	0.15	0.1	0.1

A partir do ano 15 considera-se a tarifa como sendo igual à do regime geral actual: 0,10€. Segundo o ponto 3 do artigo 4º do referido decreto de lei, os produtores de electricidade não podem injectar uma potência superior a 50% da potência contratada para a instalação eléctrica de utilização. Considera-se então que os restantes 50% terão um valor igual ao do regime geral.

A produção de energia eléctrica do sistema fotovoltaico para Leça da Palmeira, Porto, calculado a partir da expressão 6.5 (Temperatura exterior e Radiação global do programa SolTerm), está apresentada na tabela

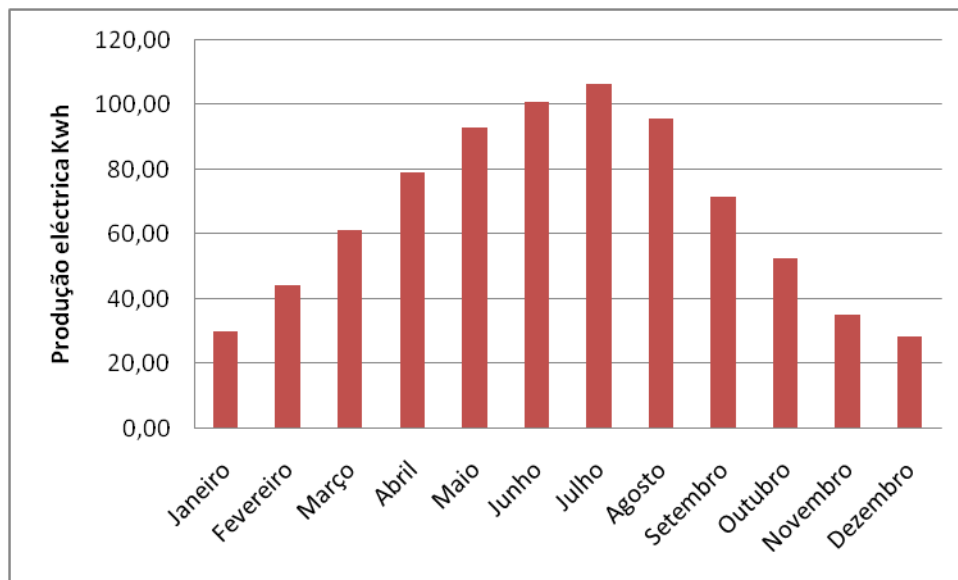


Figura 8.1: Produção eléctrica mensal do sistema no Porto

Foi então efectuada uma análise para os 15 anos de regime bonificado. A figura x apresenta a evolução o retorno conseguido para os 15 anos de regime bonificado, considerando que a eficiência dos componentes se mantém constante.

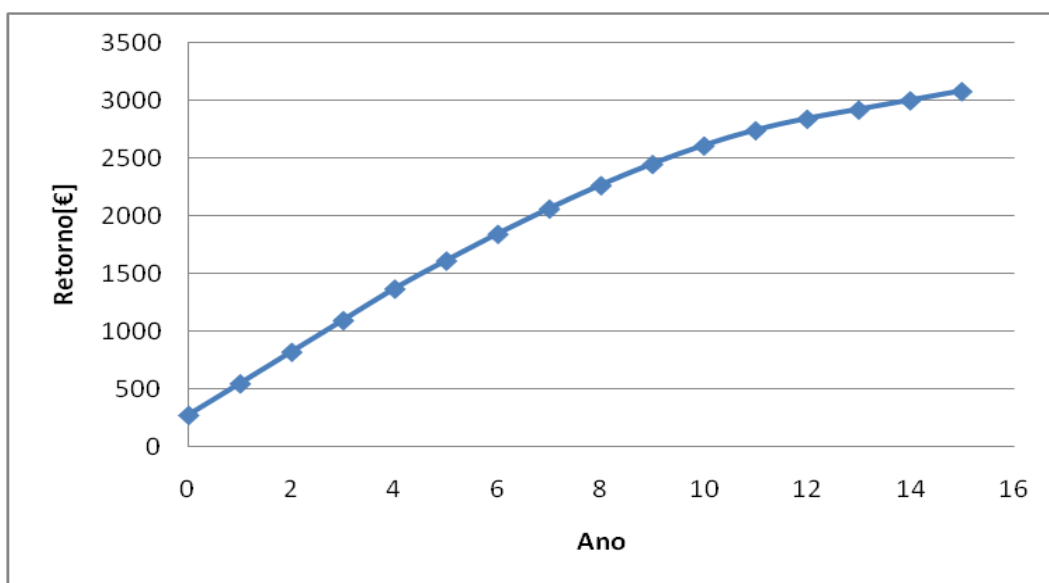


Figura 8.2: Evolução do retorno nos primeiros 15 anos

Como se pode verificar, ao fim de 15 anos, obtém-se um retorno de 3080€, o que corresponde a uma parcela significativa dos 3876.7€ investidos. Estes valores foram obtidos assumindo uma eficiência do sistema fotovoltaico fixa. De facto esta vai diminuindo com a idade do sistema vai diminuindo para valores da ordem dos 90% ao fim de 10 anos e 80 % no final de 25 anos. Os valores obtidos acima permitem no entanto, uma ideia muito próxima dos valores em questão.

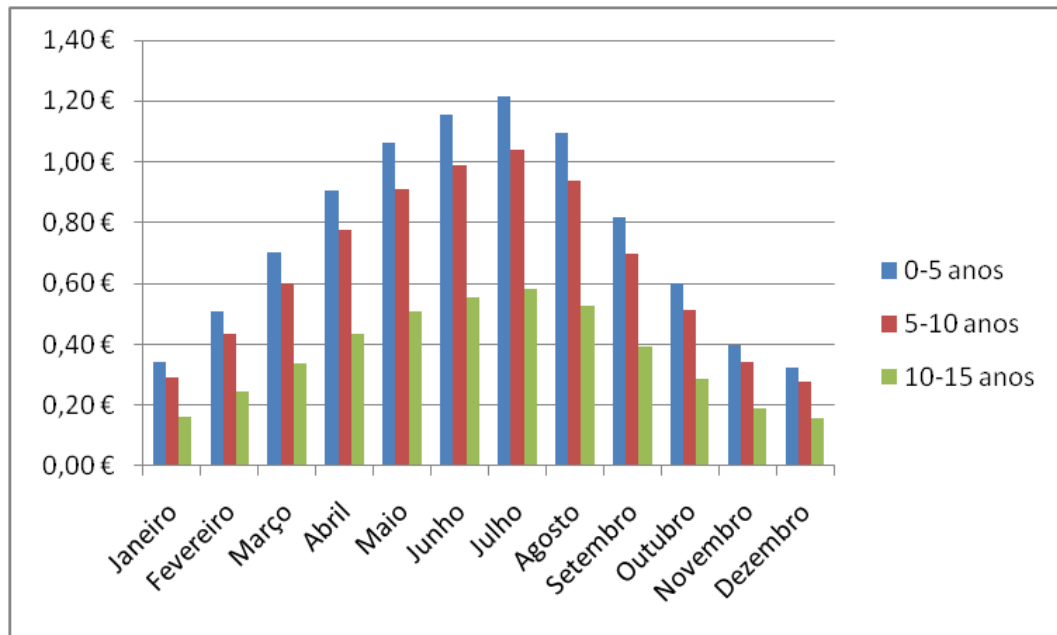


Figura 8.3: Saldo médio diário mensal para venda de energia eléctrica à rede

A Figura 8.3, representa o saldo médio diário, obtido por venda de energia eléctrica à rede definido para três períodos nos primeiros 5 anos, nos 5 anos seguintes e no período entre os 10 e os 15 anos de funcionamento do sistema. O cálculo apresentado permite que a empresa ajuste o preço praticado aos clientes mediante o rendimento que o sistema teria se estivesse no parque a vender exclusivamente electricidade à rede.

Por exemplo, se a empresa aquando do aluguer das caravanas, praticar um preço diário que tenha como incremento o valor apresentado na figura 8.3, o retorno em 15 anos corresponderá ao retorno apresentado na figura 8.2.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

9. Conclusões

O recurso a um sistema de refrigeração na caravana é essencial para garantir o conforto térmico na caravana. A temperatura do ar no interior da caravana atinge valores elevadíssimos quando a caravana está sujeita a condições meteorológicas desfavoráveis. Nas medições experimentais obtiveram-se vários dias com valores de temperatura do ar acima dos 40°C no interior da caravana mesmo para o mês de Outubro de 2009, como é visível na Figura 4.4

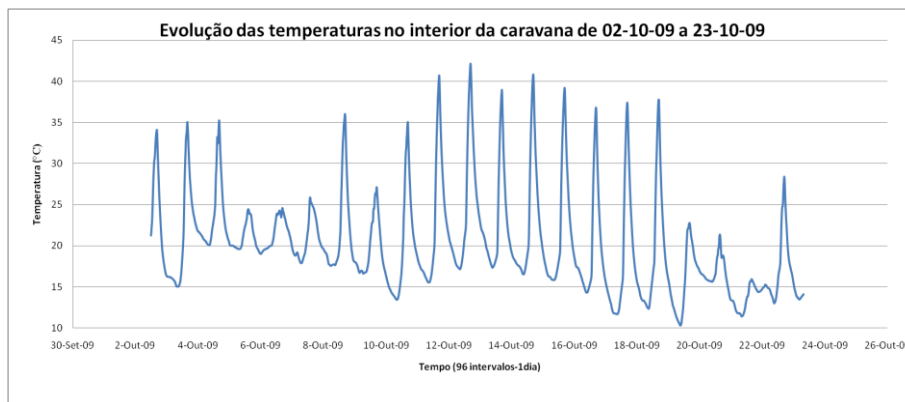


Figura 4.4: Evolução da temperatura do ar no interior da caravana de 02-10-09 a 23-10-

Esses valores de temperatura poderão chegar acima dos 60°C (333K) se a caravana estiver exposta ao sol num dia de calor extremo, conforme é visível na figura 7.24

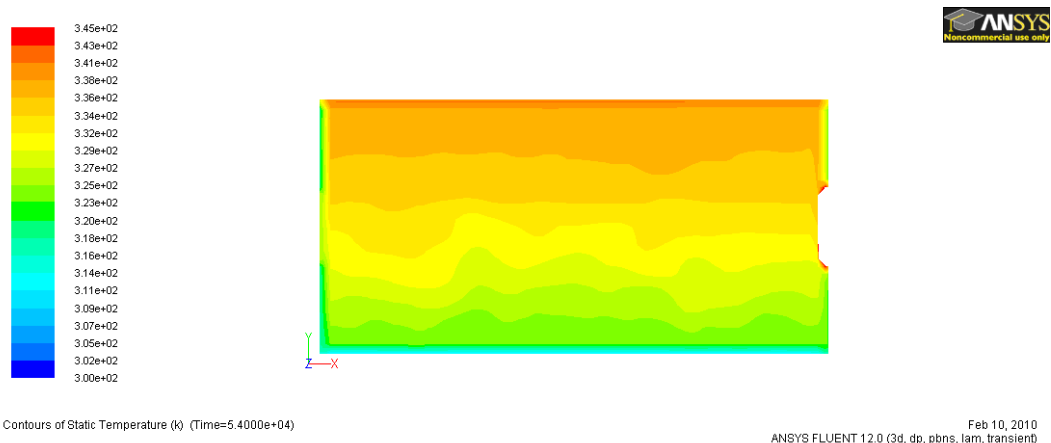


Figura 7.27: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=25$ W/m²K às 15h00
Resultados do modelo

A utilização de um sistema de refrigeração permite alcançar o conforto térmico no interior da caravana. De facto, para o sistema seleccionado, um aparelho da LG com um COP de 4,6 para uma potência nominal de 2500W, a temperatura desça de 37°C

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

(310K), para temperaturas próximas dos 27°C (300K) em menos de 750s, conforme se pode constatar na Figura

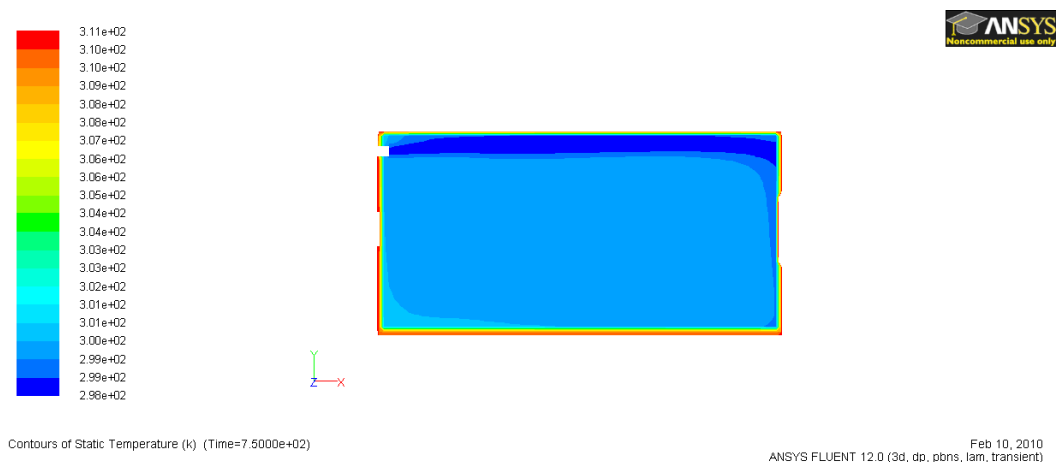


Figura 7.33 Resultados do modelo de simulação com sistema de refrigeração passados 750s: Campo de temperaturas (K) do ar interior

O recurso a painéis solares de silício policristalino para produção da energia eléctrica, destinada ao sistema de refrigeração é a melhor alternativa do ponto de vista económico. O consumo de energia eléctrica é satisfeito com recurso a 3 módulos da Suntech deste material, que totalizam uma potência nominal de 630W a um preço de 2.1€/W.

Nas medições experimentais efectuadas, obteve-se 11 rph para valor das infiltrações de ar na caravana. Este valor muito elevado, faz com que o ganho de calor devido às infiltrações corresponda a 20% da carga térmica total da caravana. Uma melhoria no isolamento da caravana, baixaria significativamente este valor sem acarretar grandes custos adicionais.

A radiação solar incidente na caravana, é um dos factores que tem mais peso na carga térmica da caravana. Os ganhos solares devido à radiação baixariam significativamente se os vidros da caravana fossem substituídos por vidros especiais com baixa transmissividade, e se as paredes fossem pintadas com uma tinta que diminuísse o coeficiente de convecção.

Em relação às perspectivas de trabalho futuro, a análise efectuada no software Fluent, também permite que se façam algumas sugestões:

Para o processo de validação é necessária uma análise experimental mais detalhada. Para o efeito devem colocar-se sensores de temperatura em diversos locais da caravana, de forma a ter valores experimentais representativos do espaço interior da caravana. Essas medições devem ser sido feitas com a caravana totalmente exposta ao sol, para que não haja sombreamento.

A utilização do modelo "Solar Load Model" deve ser utilizada para simular o fluxo de calor solar e prever a distribuição espacial de temperaturas do ar no interior da caravana, o que aproximaria mais os valores previstos dos resultados experimentais.

O tempo dispendido na busca de uma solução para pôr o SRT levou ainda a que o tempo disponível para as simulações do modelo final fosse curto, pelo que teve de se utilizar "step times" muito elevados, aumentando o erro dos resultados obtidos.

Sugere-se a utilização de "step times" muito reduzidos de modo a diminuir o erro dos resultados previstos.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Bibliografia

- [1] **Camping Cars & Caravans** - www.camping-cars-caravans.de
- [2] **The Oil Drum** – www.canada.theoildrum.com
- [3] **Fulton, Lew.** *IEA Transport Energy outlook*, EIA NEMS 2009 Conference, Washington DC, April 7, 2009
- [4] **Kalogirou, Soteris.** *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 1st Edition. Elsevier, 2009.
- [5] **Data360** - www.data360.org
- [6] **Association For the Study of Peak Oil & Gas** - www.aspo-usa.com/
- [7] **ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.** *2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta : SI ed., 2009
- [8] **Direção Geral da Energia e Geologia** – www.dgeg.com
- [9] **Ministério da economia e da inovação** – www.min-economia.pt
- [10] **International Energy Agency (IEA)** - www.iea.org
- [11] **Luque, Antonio.** *Handbook of Photovoltaics Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2003
- [12] **Portal das energias renováveis** - www.portal-energia.com
- [13] **ALTENER**, *Energia Fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projecto e instalações*, 2004
- [14] **School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering** - www.pv.unsw.edu.au
- [15] **National Renewable Energy Laboratory** – www.nrel.gov
- [16] **Troque de Energia** - www.troquedeenergia.com
- [17] 2.bp.blogspot.com/
- [18] **Meteopt** - www.meteopt.com
- [19] **TVI** - www.tvi24.iol.pt
- [20] **Web** - 2.bp.blogspot.com
- [21] **Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica** - www.cresesb.cepel.br
- [22] **Çengel, Yunus A. e Bóles, Michael A.** *Thermodynamics an Engineer Aproach*. 5th Edition. McGraw-Hill.
- [23] **Energy Manager Training** – www.emt-india.net
- [24] **Moran, Michael J. e Saphiro, Howard N.** *Fundamentals of Engineerin thermodynamics*. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- [25] **Afonso, Clito F. A.** *Refrigeração*. Porto : FEUP-SFC, 2007.

- [26] **Dinçer, Ibrahim.** *Refrigeration Systems and Applications*. John Wiley and Sons, 2003.
- [27] **Afonso, Clito, Castro, Manuel e Matos, Joaquim.** *Air Infiltration on Domestic Refrigerators: the Influence of the Magnetic Seals*. Porto : s.n., 2005.
- [28] passa a 25 documento Lnec
- [29] **Frota, Anésia B., Schiffer, Sueli R.** *Manual de Conforto Térmico*. Studio Nobel, 2001.
- [30] **Decreto – Lei nº 80/2006**, “*Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*” (RCCTE), 2006
- [31] **Santos, Carlos & Matias, Luís.** *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, 2006
- [32] **Engineering ToolBox.** www.engineeringtoolbox.com
- [33] **Kaysons** - www.kaysons.in
- [34] **Megaclima** – www.megaclima.pt
- [35] **Oliveira, Armando.** *Apontamentos de Energias Renováveis*. Porto: FEUP, 2008.
- [36] **Solar Shop** – www.solarshop-europe.net
- [37] **Solenerg.br.** *Projecto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico*
- [38] **hobby electrónica** – www.loja-hobbyelectronica.pt
- [39] **Fluent User Guide**
- [40] **Basarir, Nihat Murat.** *Numerical Study of the airflow and temperature distributions in an atrium*. Queen’s University Kingston, Ontario, Canada September, 2009.
- [50] **Renováveis na hora.** *Guia para a certificação de uma unidade de microprodução*. V010-02/10

Anexo A: Resultados dos testes de Gás traçador

Tabela A1: Resultados do teste com Gás traçador realizado a 20 de Maio de 2009 com respiros da caravana fechados

Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]	Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]	Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]	Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]
15:00	690	15:21	1090	15:54	867,3	16:15	721,8
15:00	774,5	15:22	1085,8	15:55	859,2	16:16	720,6
15:01	851,6	15:22	1083,9	15:55	853,5	16:17	689,4
15:02	946,3	15:23	1080,8	15:56	837,9	16:17	677,7
15:02	864,3	15:24	1076,1	15:56	848,1	16:18	687
15:03	949,6	15:24	1075,4	15:57	836,6	16:19	712,2
15:03	968,4	15:25	1071,6	15:58	832,6	16:19	700,5
15:04	1011,5	15:26	1066,7	15:58	835,8	16:20	677,8
15:05	1008,8	15:37	998,1	15:59	825,3	16:21	709,4
15:05	1030	15:38	970,2	16:00	812,6	16:21	695
15:06	1033,5	15:39	934,5	16:00	814,1	16:22	680,2
15:07	1039,8	15:39	926	16:01	811,1	16:23	684
15:07	1067	15:40	934	16:02	808,7	16:23	698,1
15:08	1043,4	15:41	927,5	16:02	798,3	16:24	702,6
15:09	1073,8	15:41	933,6	16:03	779,3	16:24	702,4
15:09	1073,5	15:42	935,5	16:03	775,3	16:25	701,7
15:10	1075,5	15:43	934,4	16:04	774,6	16:26	699,9
15:11	1083,8	15:43	928,9	16:05	758,8	16:26	702,1
15:11	1102,1	15:44	912,4	16:05	760,1	16:27	702,1
15:12	1110	15:44	917,2	16:06	765,5	16:27	697,4
15:12	1094	15:45	912,6	16:07	772,2	16:28	693,9
15:13	1097,6	15:46	920	16:07	760	16:29	686,3
15:14	1120,3	15:46	912,1	16:08	761,3	16:30	672,8
15:14	1115,5	15:47	909,3	16:09	759,5	16:30	680,1
15:15	1118,9	15:48	903,2	16:09	748,1	16:31	681,8
15:15	1115,1	15:48	898,4	16:10	749,1	16:31	662,8
15:16	1096,4	15:49	886,2	16:11	745,1	16:32	673,1
15:17	1104	15:50	888,3	16:11	750	16:33	669,1
15:17	1103,1	15:50	877,2	16:12	760,3	16:33	640,7
15:18	1099,3	15:51	864,9	16:12	755,6	16:34	641,5
15:19	1100,6	15:51	876,7	16:13	757,2	16:34	635,6
15:19	1098,5	15:52	883,4	16:14	753,6	16:35	652,1
15:20	1093,5	15:53	883,9	16:14	747,6	16:36	673,7
15:21	1090,5	15:53	880,8	16:15	730		

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Tabela A2: Resultados do teste com Gás traçador realizado a 21 de Maio de 2009 com respiros da caravana abertos

Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]	Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]	Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]	Hora [h:m]	Concentração Gás [ppm]
10:02	3,9	10:29	962,7	11:02	650,9	11:29	408,3
10:03	208,1	10:30	972,9	11:02	601,7	11:29	407,3
10:03	547,1	10:30	988,2	11:03	561,9	11:30	391,5
10:04	681,1	10:31	979,4	11:04	544,4	11:31	392,7
10:05	800,7	10:32	984,8	11:04	528,7	11:32	397,0
10:05	838,3	10:32	957,1	11:05	535,0	11:32	400,6
10:06	834,8	10:33	953,1	11:05	477,1	11:33	386,8
10:06	810,5	10:34	965,8	11:06	447,6	11:33	383,2
10:07	901,2	10:34	941,4	11:07	411,7	11:34	380,4
10:08	898,7	10:35	947,3	11:07	298,8	11:35	352,0
10:08	888,7	10:35	950,6	11:08	295,5	11:35	376,1
10:09	935,2	10:36	955,8	11:09	291,9	11:36	391,3
10:09	894,3	10:37	953,0	11:09	275,1	11:37	377,1
10:10	932,4	10:37	945,9	11:10	284,0	11:37	368,1
10:11	905,2	10:38	949,9	11:11	278,8	11:38	383,7
10:11	916,3	10:38	940,6	11:11	303,8	11:38	388,6
10:12	920,6	10:41	929,4	11:12	285,4	11:39	386,8
10:13	943,9	10:41	922,0	11:12	274,3	11:40	366,0
10:13	953,4	10:42	922,3	11:13	306,0	11:40	378,4
10:14	935,3	10:43	916,0	11:14	292,9	11:41	374,4
10:15	954,4	10:43	916,3	11:14	342,2	11:42	372,3
10:15	965,3	10:44	911,4	11:15	291,5	11:42	373,2
10:16	977,4	10:44	911,4	11:16	313,1	11:43	353,7
10:16	978,2	10:45	914,3	11:16	329,3	11:44	359,8
10:17	972,6	10:45	911,9	11:17	356,2	11:44	366,5
10:18	1001,5	10:46	909,1	11:17	291,5	11:45	363,8
10:18	1027,9	10:47	907,9	11:18	299,8	11:45	364,5
10:19	1049,3	10:47	903,6	11:19	323,4	11:46	362,6
10:19	1006,1	10:48	902,9	11:19	348,3	11:47	346,2
10:20	993,4	10:48	898,7	11:20	366,9	11:47	350,9
10:21	1003,5	10:49	896,4	11:21	398,6	11:48	338,2
10:22	1008,5	10:49	893,9	11:21	396,9	11:49	344,4
10:22	1030,7	10:55	885,6	11:22	413,8	11:49	318,8
10:23	998,8	10:55	886,0	11:23	408,8	11:50	335,3
10:23	1004,1	10:56	860,6	11:23	397,5	11:51	357,5
10:24	975,4	10:57	868,2	11:24	446,6	11:51	344,4
10:25	955,9	10:57	837,9	11:25	433,5	11:52	319,4
10:25	956,6	10:58	817,5	11:25	420,6	11:53	328,4
10:26	954,7	10:58	785,5	11:26	416,4	11:53	332,8
10:27	959,0	10:59	722,5	11:26	412,3	11:54	348,0
10:27	972,6	11:00	721,8	11:27	399,4	11:54	349,2
10:28	954,3	11:00	677,9	11:28	406,3		
10:28	968,1	11:01	636,2	11:28	383,1		

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Anexo C: Características dos módulos fotovoltaicos consultados

Marca	Modelo	Tipo Célula	Potência [W]	Dimensões [mm]	Eficiência [%]	Preço [€]	€/W
Kyocera	KD 185 GH-2PU	Policr.	185	1338*990*36	14,0	676,9	3,7
Kyocera	KD 210 GH-2PU	Policr.	210	1500*990*36	14,1	768	3,7
REC Solar	REC Premium 215	Policr.	215	1665*991*43	13,0	811,9	3,8
Sanyo	HIP 215 NKHE1	HCI	215	1580*798*35	17,1	876	4,1
Sanyo	HIP 230 HDE1	HCI	230	1610*861*35	16,6	937,01	4,1
Sanyo	HIP 235 HDE4	HCI	235	1610*861*35	17,0	957,9	4,1
Sanyo	HIP 240 HDE5	HCI	240	1610*861*35	17,3	978	4,1
Schott Solar	Poly 170	Policr.	170	1620*810*50	13,0	600,9	3,5
Schott Solar	Poly 175	Policr.	175	1620*810*50	13,3	634	3,6
Schott Solar	Poly 200	Policr.	200	1685*993*50	12,0	766,9	3,8
Schott Solar	Poly 225	Policr.	225	1685*993*50	13,4	815	3,6
Sharp	ND210	Policr.	210	1652*994*46	12,8	719,9	3,4
Sharp	NT175E1	Mono	175	1575*826*46	13,5	599,9	3,4
Sharp	NU-E235	Mono	235	1652*994*46	14,3	694	3,0
Sharp	NU-180E1	Mono	180	1318*994*46	13,7	616,9	3,4
Sharp	ND 170 (E1F)	Policr.	170	1318*994*46	13,0	592,9	3,5
Solar World	SW 205 Poly	Policr.	205	1675*1001*34	12,2	805,9	3,9
Solar World	SW 200 Poly	Policr.	200	1675*1001*34	11,9	824,9	4,1
Solar World	SW 225 Poly	Policr.	225	1675*1001*34	13,4	843	3,7
SunTech	STP 180 S-24/AD	Mono	180	1580*808*35	14,1	541,5	3,0
SunTech	STP 200-18	Policr.	200	1482*992*35	13,6	601,9	3,0
SunTech	STP 210-18/UD	Policr.	210	1482*992*36	14,3	631,9	3,0
Trina Solar	TSM DC01 180	Mono	180	1581*809*40	14,1	551,9	3,1
Trina Solar	TSM DC01 185	Mono	185	1581*809*40	14,5	567	3,1
Solon	Solon Blue 230/07	Policr.	225	1640*1000*42	13,7	787	3,5
Solon	Solon Black 230/07	Mono	225	1640*1000*42	13,7	787	3,5

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Anexo D: Ficha técnica do modelo STP190-18/UD da SUNTECH



STP210 - 18/UD
STP200 - 18/UD
STP190 - 18/UD

Electrical Characteristics

Characteristics	STP210-18/UD	STP200-18/UD	STP190-18/UD
Open - Circuit Voltage (Voc)	33.6V	33.4V	33.0V
Optimum Operating Voltage (Vmp)	26.4V	26.2V	26.0V
Short - Circuit Current (Isc)	8.33A	8.12A	7.80A
Optimum Operating Current (Imp)	7.95A	7.63A	7.31A
Maximum Power at STC (Pmax)	210Wp	200Wp	190Wp
Operating Temperature	-40°C to +85°C	-40°C to +85°C	-40°C to +85°C
Maximum System Voltage	1000V DC	1000V DC	1000V DC
Maximum Series Fuse Rating	20A	20A	20A
Power Tolerance	±3 %	±3 %	±3 %

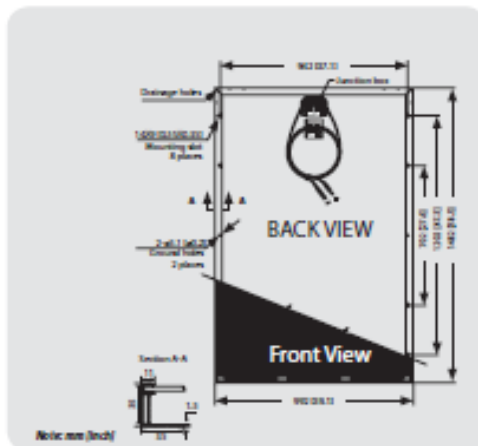
STC: Irradiance 1000W/m², Module temperature 25°C, AM=1.5

Mechanical Characteristics

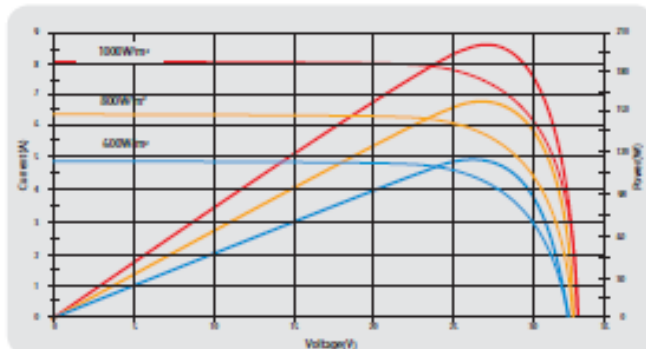
Solar Cell	Poly-crystalline 156x156mm (6inch)
No. of Cells	54 (6x9)
Dimensions	1482x992x35mm (58.3x39.1x1.4inch)
Weight	16.8kg (37.0lbs.)
Front Glass	3.2 mm (0.13inch) tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction Box	IP67 rated
Output Cables	H+S RADFOX® SMART cable 4.0mm ² (0.006inch ²), symmetrical lengths (-) 1000mm (39.4inch) and (+) 1000mm (39.4inch), RADFOX® SOLAR Integrated twist locking connectors

Temperature Coefficients

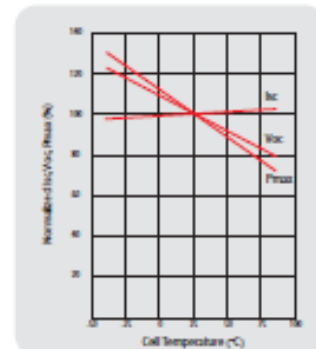
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.47 %/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.34 %/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.045 %/°C



Current-Voltage & Power-Voltage Curve (200W)



Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax



Specifications are subjected to change without further notice

www.suntech-power.com | E-mail: sales@suntech-power.com

STP-DS-STD-N01.02 Rev 2009

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Anexo E: Cálculo da capacidade da bateria

Tabela E: Cálculo da capacidade de armazenamento da bateria

Mês	Dia	Hora	T [°C]	Q _{env} [W]	Q _{evld} [W]	Q _{infil} [W]	Q _{inter} [W]	Q _{total} [W]	E _{cv} [Wh]	η _{PV}	E _{PV} [Wh]	Balanço
7	22	14	34,6	859,88	504,83	403,96	100,00	1868,67	406,23	11,9%	400,07	-6,16
7	22	15	34,8	887,07	531,65	412,37	100,00	1931,10	419,80	11,9%	386,74	-33,06
7	22	16	34,2	811,97	490,34	387,13	100,00	1789,43	389,01	12,4%	292,73	-96,28
7	22	17	33,1	692,59	410,50	340,84	100,00	1543,93	335,64	12,9%	205,07	-130,57
7	22	18	31,4	576,68	396,73	269,31	100,00	1342,71	291,89	13,3%	139,03	-152,87
7	22	19	29,3	296,16	120,16	180,94	100,00	697,26	151,58	13,9%	36,34	-115,24
7	22	20	27,2	127,35	23,54	92,57	100,00	343,47	74,67	14,2%	0,00	-74,67
7	22	21	25,6	34,73	6,42	25,25	100,00	166,40	36,17	14,3%	0,00	-36,17
7	22	22	24,4	-34,73	-6,42	-25,25	100,00	33,60	7,30	14,3%	0,00	-7,30
7	22	23	23,4	-92,62	-17,12	-67,33	100,00	-77,07	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	22	24	22,7	-133,14	-24,61	-96,78	100,00	-154,53	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	23	1	22,3	-156,30	-28,89	-113,61	480,00	181,20	39,39	14,5%	0,00	-39,39
7	23	2	21,9	-179,45	-33,17	-130,44	480,00	136,93	29,77	14,5%	0,00	-29,77
7	23	3	21,5	-202,61	-37,45	-147,28	480,00	92,67	20,15	14,5%	0,00	-20,15
7	23	4	21,1	-225,76	-41,73	-164,11	480,00	48,40	10,52	14,6%	0,00	-10,52
7	23	5	21,1	-225,76	-41,73	-164,11	480,00	48,40	10,52	14,6%	0,00	-10,52
7	23	6	21,5	-114,47	69,14	-147,28	480,00	287,39	62,48	14,4%	46,19	-16,29
7	23	7	22,5	18,24	161,60	-105,20	480,00	554,65	120,58	14,0%	128,21	7,64
7	23	8	24,1	168,49	233,85	-37,87	480,00	844,47	183,58	13,5%	211,14	27,56
7	23	9	26,2	331,71	316,86	50,49	480,00	1179,06	256,32	13,1%	280,48	24,16
7	23	10	28,4	507,72	386,95	143,07	100,00	1137,73	247,33	12,5%	371,59	124,25
7	23	11	30,7	643,14	416,42	239,85	100,00	1399,40	304,22	12,1%	424,40	120,18
7	23	12	32,7	733,70	407,09	324,01	100,00	1564,80	340,17	11,7%	453,38	113,21
7	23	13	34,3	828,42	442,01	391,33	100,00	1761,76	382,99	11,6%	457,94	74,94
7	23	14	35,3	893,24	521,78	433,41	100,00	1948,44	423,57	12,0%	364,83	-58,74
7	23	15	35,5	877,11	501,80	441,83	100,00	1920,74	417,55	12,3%	296,39	-121,16
7	23	16	35	835,21	476,29	420,79	100,00	1832,29	398,32	12,5%	264,64	-133,68
7	23	17	33,9	714,92	383,52	374,50	100,00	1572,95	341,95	12,9%	189,34	-152,61
7	23	18	32,2	547,86	274,67	302,97	100,00	1225,50	266,41	13,4%	112,00	-154,41
7	23	19	30,1	343,90	130,06	214,60	100,00	788,56	171,43	13,8%	38,91	-132,51
7	23	20	28,1	179,45	33,17	130,44	100,00	443,07	96,32	14,1%	0,00	-96,32
7	23	21	26,5	86,83	16,05	63,12	100,00	266,00	57,83	14,2%	0,00	-57,83
7	23	22	25,3	17,37	3,21	12,62	100,00	133,20	28,96	14,3%	0,00	-28,96
7	23	23	24,4	-34,73	-6,42	-25,25	100,00	33,60	7,30	14,3%	0,00	-7,30
7	23	24	23,6	-81,04	-14,98	-58,91	100,00	-54,93	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	24	1	22,6	-138,93	-25,68	-100,99	480,00	214,40	46,61	14,5%	0,00	-46,61
7	24	2	21,6	-196,82	-36,38	-143,07	480,00	103,73	22,55	14,5%	0,00	-22,55
7	24	3	20,6	-254,70	-47,08	-185,15	480,00	-6,93	0,00	14,6%	0,00	0,00

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

7	24	4	19,5	-318,38	-58,85	-231,43	480,00	-128,66	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	24	5	19,5	-318,38	-58,85	-231,43	480,00	-128,66	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	24	6	20	-204,72	49,75	-210,40	480,00	114,64	24,92	14,5%	47,08	22,16
7	24	7	21,2	-31,17	173,24	-159,90	480,00	462,16	100,47	14,0%	139,77	39,30
7	24	8	23	135,34	243,14	-84,16	480,00	774,32	168,33	13,5%	233,96	65,63
7	24	9	25,3	314,36	318,84	12,62	480,00	1125,82	244,74	13,0%	320,31	75,56
7	24	10	27,9	481,38	390,15	122,03	100,00	1093,56	237,73	12,5%	371,71	133,98
7	24	11	30,5	630,86	430,06	231,43	100,00	1392,36	302,69	12,2%	408,13	105,44
7	24	12	32,8	743,40	452,20	328,22	100,00	1623,82	353,00	12,0%	402,94	49,93
7	24	13	34,6	846,11	469,83	403,96	100,00	1819,89	395,63	11,7%	423,80	28,17
7	24	14	35,8	935,81	534,41	454,45	100,00	2024,67	440,15	11,8%	396,16	-43,98
7	24	15	36	936,47	543,16	462,87	100,00	2042,49	444,02	12,1%	335,52	-108,50
7	24	16	35,4	881,13	509,82	437,62	100,00	1928,58	419,26	12,4%	286,41	-132,84
7	24	17	34,1	784,86	471,79	382,92	100,00	1739,57	378,17	12,7%	228,56	-149,61
7	24	18	32,2	634,27	424,36	302,97	100,00	1461,60	317,74	13,2%	144,01	-173,73
7	24	19	29,8	386,19	239,36	201,98	100,00	927,53	201,64	13,8%	47,64	-154,00
7	24	20	27,5	144,72	26,75	105,20	100,00	376,67	81,88	14,1%	0,00	-81,88
7	24	21	25,7	40,52	7,49	29,46	100,00	177,47	38,58	14,3%	0,00	-38,58
7	24	22	24,3	-40,52	-7,49	-29,46	100,00	22,53	4,90	14,3%	0,00	-4,90
7	24	23	23,3	-98,41	-18,19	-71,53	100,00	-88,13	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	24	24	22,4	-150,51	-27,82	-109,41	100,00	-187,73	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	25	1	20,6	-254,70	-47,08	-185,15	480,00	-6,93	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	25	2	18,8	-358,90	-66,34	-260,89	480,00	-206,13	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	25	3	17	-463,10	-85,60	-336,63	480,00	-405,33	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	25	4	15,1	-573,08	-105,93	-416,58	480,00	-615,60	0,00	15,0%	0,00	0,00
7	25	5	15,1	-573,08	-105,93	-416,58	480,00	-615,60	0,00	15,0%	0,00	0,00
7	25	6	15,7	-489,04	-37,42	-391,33	480,00	-437,80	0,00	14,8%	44,54	44,54
7	25	7	17,3	-346,95	45,45	-324,01	480,00	-145,50	0,00	14,4%	115,41	115,41
7	25	8	19,8	-98,32	183,47	-218,81	480,00	346,34	75,29	13,9%	207,37	132,08
7	25	9	23	171,88	302,15	-84,16	480,00	869,88	189,10	13,2%	309,97	120,87
7	25	10	26,4	397,51	381,24	58,91	100,00	937,66	203,84	12,6%	375,58	171,74
7	25	11	29,9	600,98	425,64	206,19	100,00	1332,81	289,74	12,1%	419,36	129,62
7	25	12	33,1	762,72	439,62	340,84	100,00	1643,17	357,21	11,8%	432,95	75,73
7	25	13	35,5	902,37	491,48	441,83	100,00	1935,69	420,80	11,7%	418,12	-2,68
7	25	14	37,1	1017,45	547,28	509,16	100,00	2173,89	472,58	11,6%	414,28	-58,31
7	25	15	37,4	1036,85	572,80	521,78	100,00	2231,43	485,09	11,8%	366,62	-118,47
7	25	16	36,6	956,60	532,13	488,12	100,00	2076,84	451,49	12,3%	289,37	-162,12
7	25	17	34,9	840,31	494,08	416,58	100,00	1850,97	402,38	12,7%	234,10	-168,28
7	25	18	32,3	636,80	420,13	307,18	100,00	1464,10	318,28	13,2%	142,93	-175,35
7	25	19	29	327,12	206,52	168,32	100,00	801,95	174,34	13,9%	46,74	-127,60
7	25	20	25,9	52,10	9,63	37,87	100,00	199,60	43,39	14,2%	0,00	-43,39
7	25	21	23,5	-86,83	-16,05	-63,12	100,00	-66,00	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	25	22	21,6	-196,82	-36,38	-143,07	100,00	-276,27	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	25	23	20,2	-277,86	-51,36	-201,98	100,00	-431,20	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	25	24	19	-347,32	-64,20	-252,47	100,00	-564,00	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	26	1	17,8	-416,79	-77,04	-302,97	480,00	-316,80	0,00	14,8%	0,00	0,00

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num
sistema de compressão de vapor

7	26	2	16,6	-486,25	-89,88	-353,46	480,00	-449,60	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	26	3	15,4	-555,72	-102,72	-403,96	480,00	-582,40	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	26	4	14,2	-625,18	-115,56	-454,45	480,00	-715,20	0,00	15,0%	0,00	0,00
7	26	5	14,2	-625,18	-115,56	-454,45	480,00	-715,20	0,00	15,0%	0,00	0,00
7	26	6	14,8	-553,89	-61,11	-429,21	480,00	-564,20	0,00	14,8%	48,80	48,80
7	26	7	16,6	-296,54	131,95	-353,46	480,00	-38,05	0,00	14,3%	153,23	153,23
7	26	8	19,4	-55,97	229,96	-235,64	480,00	418,35	90,95	13,7%	252,86	161,92
7	26	9	22,9	193,86	322,31	-88,37	480,00	907,81	197,35	13,1%	337,84	140,49
7	26	10	26,7	434,36	395,97	71,53	100,00	1001,86	217,80	12,5%	401,83	184,03
7	26	11	30,6	652,33	434,98	235,64	100,00	1422,95	309,34	12,0%	441,49	132,15
7	26	12	34,1	828,30	448,20	382,92	100,00	1759,42	382,48	11,6%	456,96	74,48
7	26	13	36,9	989,68	496,26	500,74	100,00	2086,68	453,63	11,4%	449,55	-4,08
7	26	14	38,6	1113,30	575,17	572,27	100,00	2360,75	513,21	11,4%	421,66	-91,54
7	26	15	38,9	1137,35	609,56	584,90	100,00	2431,81	528,65	11,7%	375,43	-153,22
7	26	16	38,1	1069,90	583,63	551,24	100,00	2304,76	501,04	12,1%	311,44	-189,60
7	26	17	36,1	907,00	505,00	467,08	100,00	1979,07	430,23	12,6%	232,15	-198,09
7	26	18	33,2	661,70	378,55	345,05	100,00	1485,30	322,89	13,2%	141,27	-181,62
7	26	19	29,6	302,82	97,87	193,56	100,00	694,26	150,93	13,8%	45,52	-105,41
7	26	20	26,2	69,46	12,84	50,49	100,00	232,80	50,61	14,2%	0,00	-50,61
7	26	21	23,5	-86,83	-16,05	-63,12	100,00	-66,00	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	26	22	21,4	-208,39	-38,52	-151,48	100,00	-298,40	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	26	23	19,8	-301,01	-55,64	-218,81	100,00	-475,46	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	26	24	18,5	-376,27	-69,55	-273,51	100,00	-619,33	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	27	1	17,7	-422,58	-78,11	-307,18	480,00	-327,86	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	27	2	16,8	-474,68	-87,74	-345,05	480,00	-427,46	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	27	3	16	-520,98	-96,30	-378,71	480,00	-516,00	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	27	4	15,1	-573,08	-105,93	-416,58	480,00	-615,60	0,00	15,0%	0,00	0,00
7	27	5	15,1	-573,08	-105,93	-416,58	480,00	-615,60	0,00	15,0%	0,00	0,00
7	27	6	15,7	-502,69	-52,70	-391,33	480,00	-466,72	0,00	14,8%	47,44	47,44
7	27	7	17,2	-262,99	136,77	-328,22	480,00	25,57	5,56	14,3%	151,71	146,15
7	27	8	19,5	-50,72	230,72	-231,43	480,00	428,56	93,17	13,7%	251,73	158,57
7	27	9	22,4	164,53	317,89	-109,41	480,00	853,01	185,44	13,1%	337,77	152,34
7	27	10	25,6	370,48	385,12	25,25	100,00	880,85	191,49	12,6%	403,78	212,29
7	27	11	28,9	554,08	418,72	164,11	100,00	1236,90	268,89	12,1%	445,30	176,41
7	27	12	31,9	701,10	426,59	290,35	100,00	1518,04	330,01	11,8%	462,40	132,39
7	27	13	34,2	833,54	469,30	387,13	100,00	1789,96	389,12	11,6%	456,32	67,19
7	27	14	35,6	939,80	545,00	446,04	100,00	2030,83	441,49	11,6%	428,71	-12,77
7	27	15	35,9	963,48	578,54	458,66	100,00	2100,68	456,67	11,9%	381,52	-75,15
7	27	16	35,1	895,85	552,60	425,00	100,00	1973,45	429,01	12,3%	315,78	-113,23
7	27	17	33,5	755,94	476,87	357,67	100,00	1690,49	367,50	12,8%	234,44	-133,06
7	27	18	31,1	538,96	354,32	256,68	100,00	1249,97	271,73	13,3%	141,77	-129,96
7	27	19	28,1	215,09	80,60	130,44	100,00	526,13	114,38	13,9%	44,76	-69,62
7	27	20	25,2	11,58	2,14	8,42	100,00	122,13	26,55	14,3%	0,00	-26,55
7	27	21	22,9	-121,56	-22,47	-88,37	100,00	-132,40	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	27	22	21,2	-219,97	-40,66	-159,90	100,00	-320,53	0,00	14,6%	0,00	0,00

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

7	27	23	19,8	-301,01	-55,64	-218,81	100,00	-475,46	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	27	24	18,8	-358,90	-66,34	-260,89	100,00	-586,13	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	28	1	18,3	-387,84	-71,69	-281,93	480,00	-261,46	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	28	2	17,8	-416,79	-77,04	-302,97	480,00	-316,80	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	28	3	17,3	-445,73	-82,39	-324,01	480,00	-372,13	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	28	4	16,9	-468,89	-86,67	-340,84	480,00	-416,40	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	28	5	16,9	-468,89	-86,67	-340,84	480,00	-416,40	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	28	6	17,4	-387,10	-16,05	-319,80	480,00	-242,96	0,00	14,7%	36,71	36,71
7	28	7	18,7	-231,83	89,63	-265,10	480,00	72,71	15,81	14,3%	114,65	98,85
7	28	8	20,9	-6,36	204,22	-172,52	480,00	505,34	109,86	13,7%	218,60	108,74
7	28	9	23,6	197,45	293,72	-58,91	480,00	912,26	198,32	13,2%	300,49	102,17
7	28	10	26,5	394,42	368,52	63,12	100,00	926,06	201,32	12,7%	369,22	167,91
7	28	11	29,5	559,57	416,00	189,36	100,00	1264,93	274,98	12,3%	385,21	110,23
7	28	12	32,2	701,73	420,16	302,97	100,00	1524,85	331,49	11,9%	427,64	96,15
7	28	13	34,3	821,41	464,13	391,33	100,00	1776,88	386,28	11,8%	411,92	25,65
7	28	14	35,7	918,75	526,43	450,25	100,00	1995,43	433,79	11,9%	377,50	-56,29
7	28	15	35,9	922,93	532,62	458,66	100,00	2014,21	437,87	12,1%	329,78	-108,09
7	28	16	35,2	803,01	421,31	429,21	100,00	1753,53	381,20	12,7%	223,04	-158,16
7	28	17	33,7	694,62	371,52	366,09	100,00	1532,23	333,09	13,0%	180,82	-152,28
7	28	18	31,5	544,53	334,85	273,51	100,00	1252,90	272,37	13,4%	121,13	-151,24
7	28	19	28,8	333,43	241,16	159,90	100,00	834,49	181,41	13,9%	43,52	-137,89
7	28	20	26,1	63,68	11,77	46,29	100,00	221,73	48,20	14,2%	0,00	-48,20
7	28	21	24	-57,89	-10,70	-42,08	100,00	-10,67	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	28	22	22,4	-150,51	-27,82	-109,41	100,00	-187,73	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	28	23	21,2	-219,97	-40,66	-159,90	100,00	-320,53	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	28	24	20,2	-277,86	-51,36	-201,98	100,00	-431,20	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	29	1	19,2	-335,75	-62,06	-244,06	480,00	-161,86	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	29	2	18,3	-387,84	-71,69	-281,93	480,00	-261,46	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	29	3	17,3	-445,73	-82,39	-324,01	480,00	-372,13	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	29	4	16,3	-503,62	-93,09	-366,09	480,00	-482,80	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	29	5	16,3	-503,62	-93,09	-366,09	480,00	-482,80	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	29	6	16,8	-447,67	-52,98	-345,05	480,00	-365,70	0,00	14,8%	27,52	27,52
7	29	7	18,2	-311,37	31,21	-286,14	480,00	-86,30	0,00	14,4%	90,47	90,47
7	29	8	20,3	-87,42	165,83	-197,77	480,00	360,64	78,40	13,9%	187,62	109,22
7	29	9	23	84,09	241,09	-84,16	480,00	721,02	156,74	13,6%	223,92	67,18
7	29	10	25,9	339,97	359,69	37,87	100,00	837,54	182,07	12,9%	337,19	155,11
7	29	11	28,9	529,38	408,16	164,11	100,00	1201,64	261,23	12,3%	399,60	138,37
7	29	12	31,6	663,93	424,04	277,72	100,00	1465,68	318,63	12,1%	405,23	86,61
7	29	13	33,6	782,36	451,48	361,88	100,00	1695,72	368,63	11,8%	427,80	59,16
7	29	14	35	890,23	520,17	420,79	100,00	1931,19	419,82	11,8%	416,19	-3,64
7	29	15	35,2	888,00	531,29	429,21	100,00	1948,50	423,59	12,1%	339,98	-83,61
7	29	16	34,5	838,23	511,85	399,75	100,00	1849,83	402,14	12,4%	298,45	-103,69
7	29	17	33,1	623,47	308,88	340,84	100,00	1373,19	298,52	13,1%	157,79	-140,73
7	29	18	30,9	414,56	165,59	248,27	100,00	928,42	201,83	13,6%	78,80	-123,03
7	29	19	28,1	236,09	126,69	130,44	100,00	593,23	128,96	14,0%	34,91	-94,05
7	29	20	25,5	28,94	5,35	21,04	100,00	155,33	33,77	14,3%	0,00	-33,77

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num
sistema de compressão de vapor

7	29	21	23,4	-92,62	-17,12	-67,33	100,00	-77,07	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	29	22	21,8	-185,24	-34,24	-134,65	100,00	-254,13	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	29	23	20,6	-254,70	-47,08	-185,15	100,00	-386,93	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	29	24	19,7	-306,80	-56,71	-223,02	100,00	-486,53	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	30	1	18,8	-358,90	-66,34	-260,89	480,00	-206,13	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	30	2	17,9	-411,00	-75,97	-298,76	480,00	-305,73	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	30	3	17	-463,10	-85,60	-336,63	480,00	-405,33	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	30	4	16,1	-515,20	-95,23	-374,50	480,00	-504,93	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	30	5	16,1	-515,20	-95,23	-374,50	480,00	-504,93	0,00	14,9%	0,00	0,00
7	30	6	16,7	-418,92	-12,44	-349,26	480,00	-300,61	0,00	14,7%	43,19	43,19
7	30	7	18,3	-205,67	138,20	-281,93	480,00	130,61	28,39	14,2%	139,53	111,14
7	30	8	20,7	4,61	227,70	-180,94	480,00	531,37	115,52	13,7%	236,64	121,12
7	30	9	23,8	240,90	318,75	-50,49	480,00	989,15	215,03	13,0%	333,03	118,00
7	30	10	27,2	455,20	394,33	92,57	100,00	1042,11	226,55	12,5%	392,61	166,07
7	30	11	30,7	651,82	455,50	239,85	100,00	1447,16	314,60	12,1%	410,55	95,95
7	30	12	33,8	807,67	459,91	370,30	100,00	1737,87	377,80	11,8%	434,34	56,54
7	30	13	36,2	950,82	526,03	471,28	100,00	2048,14	445,25	11,7%	407,87	-37,38
7	30	14	37,7	1055,45	572,22	534,40	100,00	2262,07	491,76	11,6%	404,36	-87,40
7	30	15	38	1070,43	593,58	547,03	100,00	2311,04	502,40	11,9%	351,18	-151,22
7	30	16	37,2	1012,51	566,83	513,36	100,00	2192,70	476,67	12,1%	310,01	-166,66
7	30	17	35,5	871,84	500,07	441,83	100,00	1913,74	416,03	12,6%	228,73	-187,30
7	30	18	33	666,97	411,43	336,63	100,00	1515,04	329,36	13,2%	136,90	-192,46
7	30	19	29,8	338,54	149,85	201,98	100,00	790,37	171,82	13,8%	40,60	-131,22
7	30	20	26,7	98,41	18,19	71,53	100,00	288,13	62,64	14,2%	0,00	-62,64
7	30	21	24,3	-40,52	-7,49	-29,46	100,00	22,53	4,90	14,3%	0,00	-4,90
7	30	22	22,5	-144,72	-26,75	-105,20	100,00	-176,67	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	30	23	21	-231,55	-42,80	-168,32	100,00	-342,66	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	30	24	19,9	-295,22	-54,57	-214,60	100,00	-464,40	0,00	14,6%	0,00	0,00
7	31	1	19,4	-324,17	-59,92	-235,64	480,00	-139,73	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	31	2	18,9	-353,11	-65,27	-256,68	480,00	-195,06	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	31	3	18,4	-382,06	-70,62	-277,72	480,00	-250,40	0,00	14,7%	0,00	0,00
7	31	4	17,9	-411,00	-75,97	-298,76	480,00	-305,73	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	31	5	17,9	-411,00	-75,97	-298,76	480,00	-305,73	0,00	14,8%	0,00	0,00
7	31	6	18,3	-369,96	-49,72	-281,93	480,00	-221,61	0,00	14,7%	10,51	10,51
7	31	7	19,5	-255,08	16,80	-231,43	480,00	10,29	2,24	14,4%	60,22	57,98
7	31	8	21,3	-136,49	55,13	-155,69	480,00	242,94	52,81	14,2%	86,40	33,59
7	31	9	23,6	32,63	133,79	-58,91	480,00	587,50	127,72	13,9%	131,79	4,07
7	31	10	26,1	311,69	325,09	46,29	100,00	783,07	170,23	13,1%	289,61	119,38
7	31	11	28,6	437,65	347,05	151,48	100,00	1036,18	225,26	12,9%	276,08	50,83
7	31	12	30,9	469,90	240,03	248,27	100,00	1058,20	230,04	13,3%	160,57	-69,47
7	31	13	32,7	568,64	258,48	324,01	100,00	1251,13	271,98	13,2%	153,14	-118,85
7	31	14	33,9	716,54	387,91	374,50	100,00	1578,96	343,25	12,7%	234,88	-108,37
7	31	15	34	610,68	226,96	378,71	100,00	1316,35	286,16	13,3%	105,39	-180,77
7	31	16	33,5	567,82	201,64	357,67	100,00	1227,13	266,77	13,4%	86,09	-180,67
7	31	17	32,2	542,01	257,49	302,97	100,00	1202,47	261,41	13,3%	128,34	-133,07

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

7	31	18	30,3	366,17	144,85	223,02	100,00	834,04	181,31	13,7%	54,51	-126,80
7	31	19	28	197,05	71,33	126,24	100,00	494,62	107,53	14,0%	13,38	-94,14
7	31	20	25,7	40,52	7,49	29,46	100,00	177,47	38,58	14,3%	0,00	-38,58
7	31	21	24	-57,89	-10,70	-42,08	100,00	-10,67	0,00	14,4%	0,00	0,00
7	31	22	22,6	-138,93	-25,68	-100,99	100,00	-165,60	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	31	23	21,5	-202,61	-37,45	-147,28	100,00	-287,33	0,00	14,5%	0,00	0,00
7	31	24	20,7	-248,92	-46,01	-180,94	100,00	-375,86	0,00	14,6%	0,00	0,00
8	1	1	20,7	-248,92	-46,01	-180,94	480,00	4,14	0,90	14,6%	0,00	-0,90
8	1	2	20,7	-248,92	-46,01	-180,94	480,00	4,14	0,90	14,6%	0,00	-0,90
8	1	3	20,7	-248,92	-46,01	-180,94	480,00	4,14	0,90	14,6%	0,00	-0,90
8	1	4	20,7	-248,92	-46,01	-180,94	480,00	4,14	0,90	14,6%	0,00	-0,90
8	1	5	20,7	-248,92	-46,01	-180,94	480,00	4,14	0,90	14,6%	0,00	-0,90
8	1	6	20,8	-212,42	-4,63	-176,73	480,00	86,22	18,74	14,4%	40,11	21,37
8	1	7	21,7	-8,72	177,75	-138,86	480,00	510,17	110,91	14,0%	142,64	31,73
8	1	8	23,3	165,36	270,17	-71,53	480,00	844,00	183,48	13,5%	241,58	58,10
8	1	9	25,3	331,71	355,36	12,62	480,00	1179,69	256,46	12,9%	328,16	71,70
8	1	10	27,7	492,24	416,22	113,61	100,00	1122,08	243,93	12,4%	395,41	151,48
8	1	11	30	618,29	440,09	210,40	100,00	1368,77	297,56	12,0%	439,38	141,82
8	1	12	32,1	712,02	436,15	298,76	100,00	1546,93	336,29	11,8%	458,79	122,51
8	1	13	33,9	815,50	473,66	374,50	100,00	1763,67	383,41	11,6%	454,07	70,67
8	1	14	35,1	911,37	549,56	425,00	100,00	1985,93	431,72	11,7%	426,86	-4,87
8	1	15	35,5	940,50	583,20	441,83	100,00	2065,54	449,03	11,9%	378,74	-70,29
8	1	16	34,9	883,57	557,22	416,58	100,00	1957,37	425,51	12,3%	311,79	-113,72
8	1	17	33,7	763,65	477,50	366,09	100,00	1707,23	371,14	12,8%	229,04	-142,10
8	1	18	31,8	573,32	353,25	286,14	100,00	1312,71	285,37	13,3%	135,71	-149,66
8	1	19	29,5	290,63	87,70	189,36	100,00	667,69	145,15	13,9%	38,48	-106,67
8	1	20	27,6	150,51	27,82	109,41	100,00	387,73	84,29	14,1%	0,00	-84,29
8	1	21	26,1	63,68	11,77	46,29	100,00	221,73	48,20	14,2%	0,00	-48,20
8	1	22	25	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	21,74	14,3%	0,00	-21,74
8	1	23	24	-57,89	-10,70	-42,08	100,00	-10,67	0,00	14,4%	0,00	0,00
8	1	24	23,3	-98,41	-18,19	-71,53	100,00	-88,13	0,00	14,4%	0,00	0,00
Total												-1931,6

Anexo F: Resultados das medições de temperatura no interior da caravana

Tabela F1: Resultados das medições de temperatura realizadas no interior da caravana em 23 de Setembro de 2009

Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]
23.09.09	0:00	20,18	23.09.09	8:00	17,91	23.09.09	16:00	40,85
23.09.09	0:15	19,97	23.09.09	8:15	17,96	23.09.09	16:15	41,56
23.09.09	0:30	19,82	23.09.09	8:30	18,00	23.09.09	16:30	41,99
23.09.09	0:45	19,67	23.09.09	8:45	18,05	23.09.09	16:45	42,15
23.09.09	1:00	19,52	23.09.09	9:00	18,14	23.09.09	17:00	42,15
23.09.09	1:15	19,26	23.09.09	9:15	18,33	23.09.09	17:15	40,99
23.09.09	1:30	19,11	23.09.09	9:30	18,53	23.09.09	17:30	39,22
23.09.09	1:45	18,91	23.09.09	9:45	18,76	23.09.09	17:45	37,73
23.09.09	2:00	18,76	23.09.09	10:00	19,06	23.09.09	18:00	36,14
23.09.09	2:15	18,62	23.09.09	10:15	19,47	23.09.09	18:15	34,84
23.09.09	2:30	18,43	23.09.09	10:30	19,77	23.09.09	18:30	33,69
23.09.09	2:45	18,33	23.09.09	10:45	20,13	23.09.09	18:45	32,62
23.09.09	3:00	18,24	23.09.09	11:00	20,50	23.09.09	19:00	31,53
23.09.09	3:15	18,19	23.09.09	11:15	20,87	23.09.09	19:15	30,73
23.09.09	3:30	18,10	23.09.09	11:30	21,19	23.09.09	19:30	29,87
23.09.09	3:45	18,05	23.09.09	11:45	21,58	23.09.09	19:45	29,13
23.09.09	4:00	17,96	23.09.09	12:00	21,91	23.09.09	20:00	28,50
23.09.09	4:15	17,91	23.09.09	12:15	22,31	23.09.09	20:15	27,80
23.09.09	4:30	17,87	23.09.09	12:30	22,67	23.09.09	20:30	27,20
23.09.09	4:45	17,82	23.09.09	12:45	23,02	23.09.09	20:45	26,62
23.09.09	5:00	17,77	23.09.09	13:00	23,51	23.09.09	21:00	25,99
23.09.09	5:15	17,73	23.09.09	13:15	24,65	23.09.09	21:15	25,51
23.09.09	5:30	17,73	23.09.09	13:30	26,91	23.09.09	21:30	25,05
23.09.09	5:45	17,73	23.09.09	13:45	28,97	23.09.09	21:45	24,65
23.09.09	6:00	17,73	23.09.09	14:00	31,08	23.09.09	22:00	24,26
23.09.09	6:15	17,77	23.09.09	14:15	33,01	23.09.09	22:15	23,88
23.09.09	6:30	17,77	23.09.09	14:30	34,62	23.09.09	22:30	23,57
23.09.09	6:45	17,82	23.09.09	14:45	36,03	23.09.09	22:45	23,33
23.09.09	7:00	17,82	23.09.09	15:00	37,29	23.09.09	23:00	23,02
23.09.09	7:15	17,87	23.09.09	15:15	38,60	23.09.09	23:15	22,78
23.09.09	7:30	17,87	23.09.09	15:30	39,49	23.09.09	23:30	22,55
23.09.09	7:45	17,91	23.09.09	15:45	40,16	23.09.09	23:45	22,31

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Tabela F2: Resultados das medições de temperatura realizadas no interior da caravana em 14 de Outubro de 2009

Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]
14.10.09	00:00	19,30	14.10.09	08:00	16,88	14.10.09	16:00	39,10
14.10.09	00:15	19,15	14.10.09	08:15	16,79	14.10.09	16:15	39,88
14.10.09	00:30	19,01	14.10.09	08:30	16,66	14.10.09	16:30	40,56
14.10.09	00:45	18,86	14.10.09	08:45	16,57	14.10.09	16:45	40,85
14.10.09	01:00	18,72	14.10.09	09:00	16,52	14.10.09	17:00	40,29
14.10.09	01:15	18,62	14.10.09	09:15	16,52	14.10.09	17:15	38,72
14.10.09	01:30	18,53	14.10.09	09:30	16,52	14.10.09	17:30	36,82
14.10.09	01:45	18,43	14.10.09	09:45	16,61	14.10.09	17:45	35,25
14.10.09	02:00	18,38	14.10.09	10:00	16,70	14.10.09	18:00	34,00
14.10.09	02:15	18,33	14.10.09	10:15	16,88	14.10.09	18:15	32,71
14.10.09	02:30	18,24	14.10.09	10:30	17,05	14.10.09	18:30	31,44
14.10.09	02:45	18,19	14.10.09	10:45	17,27	14.10.09	18:45	30,46
14.10.09	03:00	18,10	14.10.09	11:00	17,50	14.10.09	19:00	29,62
14.10.09	03:15	18,05	14.10.09	11:15	17,77	14.10.09	19:15	28,81
14.10.09	03:30	17,96	14.10.09	11:30	18,05	14.10.09	19:30	27,95
14.10.09	03:45	17,87	14.10.09	11:45	18,33	14.10.09	19:45	27,20
14.10.09	04:00	17,82	14.10.09	12:00	18,57	14.10.09	20:00	26,34
14.10.09	04:15	17,77	14.10.09	12:15	18,86	14.10.09	20:15	25,71
14.10.09	04:30	17,73	14.10.09	12:30	19,11	14.10.09	20:30	25,11
14.10.09	04:45	17,68	14.10.09	12:45	19,40	14.10.09	20:45	24,45
14.10.09	05:00	17,63	14.10.09	13:00	19,71	14.10.09	21:00	23,94
14.10.09	05:15	17,59	14.10.09	13:15	20,24	14.10.09	21:15	23,39
14.10.09	05:30	17,55	14.10.09	13:30	21,58	14.10.09	21:30	22,91
14.10.09	05:45	17,55	14.10.09	13:45	23,94	14.10.09	21:45	22,43
14.10.09	06:00	17,50	14.10.09	14:00	26,34	14.10.09	22:00	21,98
14.10.09	06:15	17,45	14.10.09	14:15	28,65	14.10.09	22:15	21,63
14.10.09	06:30	17,41	14.10.09	14:30	30,56	14.10.09	22:30	21,24
14.10.09	06:45	17,37	14.10.09	14:45	32,36	14.10.09	22:45	20,97
14.10.09	07:00	17,27	14.10.09	15:00	34,00	14.10.09	23:00	20,66
14.10.09	07:15	17,18	14.10.09	15:15	35,37	14.10.09	23:15	20,39
14.10.09	07:30	17,10	14.10.09	15:30	36,71	14.10.09	23:30	20,01
14.10.09	07:45	17,00	14.10.09	15:45	37,98	14.10.09	23:45	19,71

Anexo G: Parâmetros das simulações

Modelo 2 - Modelo com ar envolvente

Tabela. G.0.1: Parâmetros da simulação - modelo 2

Solver Setting	
Solver Formulation Time Unsteady Formulation Velocity Formulation Gradient Option Porous Formulation	Segregated Implicit Unsteady 1st Order Implicit Absolute Breen-Gauss Cell Based Superficial Velocity
Operating Conditions	
Operating Pressure [Pa] Reference Pressure Location Gravity Gravitational Acceleration	101325 (0,0,0) (X=0, Y=-9,81,Z=0)
Energy Model	
Energy Equation	Activo
Solution Controls	
Equations	Energy Flow
Under Relaxation Factors Pressure Velocity Coupling	Default SIMPLE

Radiation Model	
Model Solar Load Sun Direction Vector	Discret Ordinates-DO Solar Ray Tracing Use Direction Computed From Solar Calculator
Illumination Parameters	
Direct Solar Radiation Diffuse Solar Irradiation Spectral Fraction	Solar Calculator Solar Calculator 0,5
Solar Calculator	
Global Position Longitude Latitude Timezone	41,3 -8,6 1
Grid Orientation North East	(0,1,0) (1,0,0)
Starting Date and Time Day Month Hour Minute	1 6 8 0
Solar Irradiation Method	Fair Weather Conditions

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Tabela G.0.2: Propriedades dos materiais da simulação - modelo 2

Materials					
	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν [kg/m.s]	α
Ar "Sólido"	1,225	1006,43	7,5	1,7894	0
Ar	Gás ideal	1006,43	0,0242	1,79E-05	0
Paredes	2719	871	202,4	-	0,8

Tabela G.0.3: Condições de fronteira da simulação - modelo 2

Boundary conditions				
Zone	Thermal	Radiation	Solar BC Parameters	
			α	τ
Exterior ar sólido	Temperature Perfil de temperatura	Semi-transparent	0	1
Restantes	Coupled	Opaque	0,8	-

Tabela G.0.4: Perfil de temperatura - modelo 2

Hora	Step Time [s]	Temperatura [K]
08:00	0	292
08:30	1800	294
09:00	3600	296
09:30	5400	298
10:00	7200	297
10:30	9000	298
11:00	10800	301
11:30	12600	300
12:00	14400	301
12:30	16200	301
13:00	18000	300
13:30	19800	300
14:00	21600	299
14:30	23400	298
15:00	25200	298
15:30	27000	297
16:00	28800	297
16:30	30600	297
17:00	32400	297
17:30	34200	296
18:00	36000	295
18:30	37800	296
19:00	39600	295
19:30	41400	295
20:00	43200	294

Modelo 3 - Modelo com ar envolvente e janelas

Tabela G.0.5:Parâmetros da simulação - modelo 3

Solver Setting		
Solver Formulation	Time	Segregated Implicit Unsteady 1st Order Implicit Absolute Breen-Gauss Cell Based Superficial Velocity
Velocity Formulation	Gradient Option	Porous Formulation
Unsteady Formulation		
Operating Conditions		
Operating Pressure	Reference Pressure Location	Gravity
Gravitational Acceleration		
101325	(0,0,0)	(X=0, Y=-9,81,Z=0)
Energy Model		
Energy Equation		Activo
Solution Controls		
Equations		Energy Flow
Under Relaxation Factors	Pressure Velocity Coupling	Default SIMPLE

Radiation Model		
Model	Solar Load	Sun Direction Vector
Discret Ordinates-DO	Solar Ray Tracing	Use Direction Computed From Solar Calculator
Illumination Parameters		
Direct Solar Radiation	Diffuse Solar Irradiation	Spectral Fraction
Solar Calculator	Solar Calculator	0,5
Solar Calculator		
Global Position	Longitude Latitude Timezone	41,3 -8,6 1
Grid Orientation	North East	(0,1,0) (1,0,0)
Starting Date and Time	Day Month Hour Minute	23 9 14 0
Solar Irradiation Method		Fair Weather Conditions

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Tabela G.0.6: Propriedades dos materiais da simulação – modelo 3

Materials					
	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν [kg/m.s]	α
Ar "Sólido"	1,225	1006,43	7,5	1,7894	0
Ar	Gás ideal	1006,43	0,0242	1,79E-05	0
Paredes	700	2310	0,163	-	0,4
Janelas	1185	1470	0,2	-	0,2

Boundary conditions				
Zone	Thermal	Radiation	Solar BC Parameters	
			α	τ
Exterior ar sólido	Temperature Perfil de temperatura	Semi-transparent	0	1
Janelas	Coupled	Semi-transparent	0	0,8
Restantes	Coupled	Opaque	0,8	

Tabela G.0.7: Perfil de temperatura da simulação – modelo 3

Hora	Step Time [s]	Temperatura [K]
8	0	293,15
9	3600	298,15
10	7200	302,15
11	10800	303,15
12	14400	305,65
13	18000	303,65
14	21600	303,15
15	25200	301,15
16	28800	300,65
17	32400	300,15
18	36000	299,15
19	39600	297,15
20	43200	295,65
21	46800	294,65
22	50400	294,15
23	54000	293,65
24	57600	292,15

Modelo 4: Modelo com janelas 23 setembro

Tabela G.0.8: Parâmetros de simulação - modelo 4

Solver Setting	
Solver Formulation Time Unsteady Formulation Velocity Formulation Gradient Option Porous Formulation	Segregated Implicit Unsteady 1st Order Implicit Absolute Breen-Gauss Cell Based Superficial Velocity
Operating Conditions	
Operating Pressure Reference Pressure Location Gravity Gravitational Acceleration	101325 (0,0,0) (X=0, Y=-9,81,Z=0)
Energy Model	
Energy Equation	Activo
Solution Controls	
Equations	Energy Flow
Under Relaxation Factors Pressure Velocity Coupling	Default SIMPLE

Tabela G.0.9: Propriedades dos materiais de simulação – modelo 4

Materials					
	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν	α
Ar	Gás ideal	1006,43	0,0242	1,79E-05	-
Paredes	216,67	1485,1	0,0486	-	-
Chão	320,5	2274,8	0,0728	-	-
Tecto	255	1943	0,0605	-	-
Janelas	1185	1470	0,2	-	-

Tabela G.0.10: Condições de fronteira da simulação - modelo 4

Boundary conditions	
Zone	Thermal
Paredes	Convection Perfil de Temperatura
Chão	
Tecto	
Janelas	

Tabela G.0.11:Perfis de temperatura da simulação para $\alpha=6$ e $\alpha=10$ W/m².K

$\alpha=6$				$\alpha=10$			
Hora	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]	Hora	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
08:00	0	291,06	17,91	08:00	0	291,06	17,91
08:30	1800	291,56	18,41	08:30	1800	291,74	18,59
09:00	3600	292,87	19,72	09:00	3600	293,29	20,14
09:30	5400	294,57	21,42	09:30	5400	295,18	22,03
10:00	7200	296,37	23,22	10:00	7200	297,11	23,96
10:30	9000	298,14	24,99	10:30	9000	298,91	25,76
11:00	10800	299,54	26,39	11:00	10800	300,26	27,11
11:30	12600	300,67	27,52	11:30	12600	301,33	28,18
12:00	14400	301,79	28,64	12:00	14400	302,44	29,29
12:30	16200	302,84	29,69	12:30	16200	303,43	30,28
13:00	18000	303,34	30,19	13:00	18000	303,78	30,63
13:30	19800	303,95	30,80	13:30	19800	304,08	30,93
14:00	21600	304,23	31,08	14:00	21600	304,23	31,08
14:30	23400	308,76	35,61	14:30	23400	306,92	33,77
15:00	25200	315,47	42,32	15:00	25200	310,45	37,30
15:30	27000	319,32	46,17	15:30	27000	311,82	38,67
16:00	28800	320,99	47,84	16:00	28800	312,22	39,07
16:30	30600	321,54	48,39	16:30	30600	312,09	38,94
17:00	32400	321,24	48,09	17:00	32400	311,49	38,34
17:30	34200	320,41	47,26	17:30	34200	310,78	37,63
18:00	36000	318,78	45,63	18:00	36000	309,76	36,61
18:30	37800	316,91	43,76	18:30	37800	308,24	35,09
19:00	39600	314,04	40,89	19:00	39600	305,57	32,42
19:30	41400	310,05	36,90	19:30	41400	302,89	29,74
20:00	43200	305,48	32,33	20:00	43200	300,22	27,07
20:30	45000	301,93	28,78	20:30	45000	298,46	25,31
21:00	46800	299,52	26,37	21:00	46800	297,35	24,20
21:30	48600	297,95	24,80	21:30	48600	296,57	23,42
22:00	50400	296,86	23,71	22:00	50400	296,03	22,88
22:30	52200	296,06	22,91	22:30	52200	295,62	22,47
23:00	54000	295,44	22,29	23:00	54000	295,31	22,16
23:30	55800	294,91	21,76	23:30	55800	295,02	21,87
0:00	57600	294,33	21,18	0:00	57600	294,63	21,48

Tabela G.0.12: Parametros de simulação - modelo

Solver Setting		
Solver Formulation	Unsteady Formulation	Segregated Implicit Unsteady
Time		1st Order Implicit
Velocity Formulation		Absolute
Gradient Option		Breen-Gauss Cell Based
Porous Formulation		Superficial Velocity
Operating Conditions		
Operating Pressure		101325
Reference Pressure Location		(0,0,0)
Gravity	Gravitational Acceleration	(X=0, Y=-9,81,Z=0)
Energy Model		
Energy Equation		Activo
Solution Controls		
Equations		Energy Flow
Under Relaxation Factors		Default
Pressure Velocity Coupling		SIMPLE

Tabela G.0.13: Propriedades dos materiais de simulação - modelo

Materials					
	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν	α
Ar	Gás ideal	1006,43	0,0242	1,79E-05	-
Paredes	109,39	1485,13	1,671	-	-
Chão	639,39	2274,82	3,376	-	-
Tecto	306,54	1899,33	2,362	-	-
Janela Frente	132,04		0,022	-	-
Janela direita	101,57	1460	0,017	-	-
Janela esquerda	59,25		0,010	-	-
Janela traseira	42,32		0,007	-	-

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Tabela G.0.14: Condições de fronteira da simulação – modelo 4

Boundary conditions	
Zone	Thermal
Paredes	Convection Perfis de Temperatura
Chão	Convection Perfis de Temperatura
Tecto	Convection Perfis de Temperatura
Janelas	Convection Perfis de Temperatura

Simulação com $\alpha=6\text{W/m}^2\text{K}$

Tabela G.0.15: Perfis de temperatura das paredes na simulação para $\alpha=6\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Temperatura Paredes [K]				
		Ambiente	Tecto	Direita	Esquerda	Frente
14	0	300,95	340,68	331,02	308,35	350,48
15	3600	301,85	334,18	342,12	308,52	343,18
16	7200	301,05	323,45	344,58	306,38	331,05
17	10800	299,75	310,68	334,22	303,02	315,55
18	14400	296,95	298,02	297,48	297,42	297,48
19	18000	295,35	295,35	295,35	295,35	295,35
20	21600	292,45	292,45	292,45	292,45	292,45
21	25200	293,45	293,45	293,45	293,45	293,45
22	28800	292,65	292,65	292,65	292,65	292,65

Tabela G.0.16: Perfis de temperatura das janelas na simulação para $\alpha=6\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Temperatura Janelas [K]			
		Direita	Esquerda	Frente	Traseira
14	0	469,02	325,34	659,42	318,62
15	3600	526,94	323,86	600,98	317,77
16	7200	544,40	318,66	518,16	313,78
17	10800	492,42	310,54	414,09	307,55
18	14400	299,93	298,49	300,81	298,06
19	18000	295,35	295,35	295,35	295,35
20	21600	292,45	292,45	292,45	292,45
21	25200	293,45	293,45	293,45	293,45
22	28800	292,65	292,65	292,65	292,65

Tabela G.0.17: Resultados das temperaturas para a localização do sensor de temperatura obtidos pela simulação para $\alpha=6\text{W/m}^2\text{K}$ – modelo

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
14:00	0	299,49	26,34
14:15	900	301,34	28,19
14:30	1800	306,37	33,22
14:45	2700	311,69	38,54
15:00	3600	316,21	43,06
15:15	4500	319,71	46,56
15:30	5400	322,19	49,04
15:45	6300	324,03	50,88
16:00	7200	325,56	52,41
16:15	8100	326,41	53,26
16:30	9000	326,64	53,49
16:45	9900	326,41	53,26
17:00	10800	325,73	52,58
17:15	11700	324,76	51,61
17:30	12600	323,19	50,04
17:45	13500	321,06	47,91
18:00	14400	318,44	45,29
18:15	15300	315,46	42,31
18:30	16200	312,54	39,39
18:45	17100	309,95	36,8
19:00	18000	307,67	34,52
19:15	18900	305,68	32,53
19:30	19800	303,94	30,79
19:45	20700	302,38	29,23
20:00	21600	300,92	27,77
20:15	22500	299,6	26,45
20:30	23400	298,46	25,31
20:45	24300	297,56	24,41
21:00	25200	296,86	23,71
21:15	26100	296,32	23,17
21:30	27000	295,88	22,73
21:45	27900	295,48	22,33
22:00	28800	295,10	21,95

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Simulação com $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$

Tabela G.0.18: Perfis de temperatura das paredes na simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Temperatura Paredes [K]				
		Ambiente	Tecto	Direita	Esquerda	Frente
14	0	300,95	324,79	318,99	305,39	330,67
15	3600	301,85	321,25	326,01	305,85	326,65
16	7200	301,05	314,49	327,17	304,25	319,05
17	10800	299,75	306,31	320,43	301,71	309,23
18	14400	296,95	297,59	297,27	297,23	297,27
19	18000	295,35	295,35	295,35	295,35	295,35
20	21600	292,45	292,45	292,45	292,45	292,45
21	25200	293,45	293,45	293,45	293,45	293,45
22	28800	292,65	292,65	292,65	292,65	292,65

Tabela G.0.19: Perfis de temperatura das janelas na simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Temperatura Janelas [K]			
		Direita	Esquerda	Frente	Traseira
14	0	467,82	325,09	657,44	318,32
15	3600	525,33	323,60	599,33	317,50
16	7200	542,66	318,45	516,96	313,57
17	10800	491,04	310,41	413,46	307,42
18	14400	299,91	298,47	300,79	298,05
19	18000	295,35	295,35	295,35	295,35
20	21600	292,45	292,45	292,45	292,45
21	25200	293,45	293,45	293,45	293,45
22	28800	292,65	292,65	292,65	292,65

Tabela G.0.20: Resultados das temperaturas para a localização do sensor de temperatura obtidos pela simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ – modelo

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
14:00	0	299,49	26,34
14:15	900	301,44	28,29
14:30	1800	305,93	32,78
14:45	2700	310,58	37,43
15:00	3600	314,47	41,32
15:15	4500	317,40	44,25
15:30	5400	319,62	46,47
15:45	6300	320,88	47,73
16:00	7200	321,84	48,69
16:15	8100	322,51	49,36
16:30	9000	322,45	49,30
16:45	9900	321,88	48,73
17:00	10800	321,14	47,99
17:15	11700	320,13	46,98
17:30	12600	318,52	45,37
17:45	13500	316,39	43,24
18:00	14400	313,82	40,67
18:15	15300	310,99	37,84
18:30	16200	308,29	35,14
18:45	17100	305,95	32,8
19:00	18000	303,96	30,81
19:15	18900	302,24	29,09
19:30	19800	300,74	27,59
19:45	20700	299,39	26,24
20:00	21600	298,15	25,00
20:15	22500	297,03	23,88
20:30	23400	296,10	22,95
20:45	24300	295,40	22,25
21:00	25200	294,91	21,76
21:15	26100	294,58	21,43
21:30	27000	294,33	21,18
21:45	27900	294,10	20,95
22:00	28800	293,88	20,73

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Simulação com $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
-------------	-----------	-----------------	------------------

Tabela G.0.21: Perfis de temperatura das paredes na simulação para $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Temperatura Paredes [K]				
		Ambiente	Tecto	Direita	Esquerda	Frente
14	0	300,95	310,49	308,17	302,73	312,84
15	3600	301,85	309,61	311,51	303,45	311,77
16	7200	301,05	306,43	311,49	302,33	308,25
17	10800	299,75	302,37	308,02	300,53	303,54
18	14400	296,95	297,21	297,08	297,06	297,08
19	18000	295,35	295,35	295,35	295,35	295,35
20	21600	292,45	292,45	292,45	292,45	292,45
21	25200	293,45	293,45	293,45	293,45	293,45
22	28800	292,65	292,65	292,65	292,65	292,65

Tabela G.0.22 Perfis de temperatura das janelas na simulação para $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Temperatura Janelas [K]			
		Direita	Esquerda	Frente	Traseira
14	0	466,73	324,82	655,65	318,05
15	3600	523,88	323,36	597,83	317,26
16	7200	541,09	318,26	515,88	313,37
17	10800	489,79	310,28	412,89	307,30
18	14400	299,89	298,45	300,76	298,03
19	18000	295,35	295,35	295,35	295,35
20	21600	292,45	292,45	292,45	292,45
21	25200	293,45	293,45	293,45	293,45
22	28800	292,65	292,65	292,65	292,65

Tabela G.0.23: Resultados das temperaturas para a localização do sensor de temperatura obtidos pela simulação para $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$ – modelo

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

14:00	0	299,49	26,34
14:15	900	302,18	29,03
14:30	1800	306,81	33,66
14:45	2700	310,75	37,6
15:00	3600	313,7	40,55
15:15	4500	315,78	42,63
15:30	5400	317,17	44,02
15:45	6300	318,01	44,86
16:00	7200	318,24	45,09
16:15	8100	318,13	44,98
16:30	9000	317,61	44,46
16:45	9900	316,84	43,69
17:00	10800	315,78	42,63
17:15	11700	314,44	41,29
17:30	12600	312,68	39,53
17:45	13500	310,34	37,19
18:00	14400	307,85	34,7
18:15	15300	305,17	32,02
18:30	16200	302,84	29,69
18:45	17100	301,01	27,86
19:00	18000	299,54	26,39
19:15	18900	298,4	25,25
19:30	19800	297,35	24,2
19:45	20700	296,48	23,33
20:00	21600	295,65	22,5
20:15	22500	294,88	21,73
20:30	23400	294,26	21,11
20:45	24300	293,85	20,7
21:00	25200	293,62	20,47
21:15	26100	293,51	20,36
21:30	27000	293,46	20,31
21:45	27900	293,39	20,24
22:00	28800	293,39	20,24

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Modelo – Simulação para Moura sem sistema de refrigeração

Tabela G.0.24: Parâmetros da simulação - modelo

Solver Setting	
Solver Formulation Time	Segregated Implicit Unsteady
Unsteady Formulation	1st Order Implicit
Velocity Formulation	Absolute
Gradient Option	Breen-Gauss Cell Based
Porous Formulation	Superficial Velocity
Operating Conditions	
Operating Pressure	101325
Reference Pressure Location	(0,0,0)
Gravity	Gravitational Acceleration (X=0, Y=-9,81,Z=0)
Energy Model	
Energy Equation	Activo
Solution Controls	
Equations	Energy Flow
Under Relaxation Factors	Default
Pressure Velocity Coupling	SIMPLE

Tabela G.0.25: Propriedades dos materiais de simulação – modelo

materials					
	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν	α
Ar	Gás ideal	1006,43	0,0242	1,79E-05	-
Paredes	109,39	1485,13	1,671	-	-
Chão	639,39	2274,82	3,376	-	-
Tecto	306,54	1899,33	2,362	-	-
Janela Frente	132,04		0,022	-	-
Janela direita	101,57	1460	0,017	-	-
Janela esquerda	59,25		0,010	-	-
Janela traseira	42,32		0,007	-	-

Tabela G.0.26: Condições de fronteira da simulação – modelo 4

Boundary conditions	
Zone	Thermal
Paredes	Convection
	Perfis de Temperatura
Chão	Convection
	Perfis de Temperatura
Tecto	Convection
	Perfis de Temperatura
Janelas	Convection
	Perfis de Temperatura

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Simulação com $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$

Tabela G.0.27: Perfis de temperatura das paredes na simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Perfis Temperatura [K]					
		Tecto	Direita	Esquerda	Frente	Traseira	Ambiente
1	0	290,95	290,95	290,95	290,95	290,95	290,95
2	3600	289,75	289,75	289,75	289,75	289,75	289,75
3	7200	288,55	288,55	288,55	288,55	288,55	288,55
4	10800	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35
5	14400	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35
6	18000	291,27	289,47	289,63	289,47	289,63	287,95
7	21600	300,55	293,31	311,15	293,31	297,51	289,75
8	25200	311,15	297,31	322,23	297,51	299,07	292,55
9	28800	322,09	301,49	327,01	304,81	301,49	296,05
10	32400	332,29	305,49	326,97	312,85	305,49	299,85
11	36000	340,91	309,31	323,43	319,95	309,31	303,75
12	39600	346,93	313,01	317,69	325,37	313,01	307,25
13	43200	349,73	320,49	315,81	328,17	315,81	310,05
14	46800	348,91	331,43	317,31	327,95	317,31	311,75
15	50400	344,49	339,17	317,69	325,05	317,69	312,05
16	54000	337,29	342,21	316,69	320,01	316,69	311,25
17	57600	327,85	338,93	314,01	314,21	315,77	309,25
18	61200	317,15	327,75	309,91	309,91	314,11	306,35
19	64800	306,07	304,43	304,27	304,27	304,43	302,75
20	68400	299,35	299,35	299,35	299,35	299,35	299,35
21	72000	296,65	296,65	296,65	296,65	296,65	296,65
22	75600	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55
23	79200	292,95	292,95	292,95	292,95	292,95	292,95
24	82800	291,65	291,65	291,65	291,65	291,65	291,65

Tabela G.0.28: Perfis de temperatura das janelas na simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Perfis Temperatura [K]			
		Direita	Esquerda	Frente	Traseira
1	0	290,95	290,95	290,95	290,95
2	3600	289,75	289,75	289,75	289,75
3	7200	288,55	288,55	288,55	288,55
4	10800	287,35	287,35	287,35	287,35
5	14400	287,35	287,35	287,35	287,35
6	18000	287,95	287,95	287,95	287,95
7	21600	292,34	291,49	293,59	290,85
8	25200	310,68	405,00	406,26	300,22
9	28800	325,65	438,08	511,96	308,57
10	32400	336,85	431,22	597,33	315,50
11	36000	344,82	401,84	660,24	321,12
12	39600	350,17	358,58	694,45	325,40
13	43200	397,37	335,28	697,25	328,20
14	46800	478,62	335,89	668,24	329,12
15	50400	535,53	333,80	609,53	327,70
16	54000	552,86	328,65	527,16	323,77
17	57600	500,54	319,91	422,96	316,92
18	61200	309,31	307,87	310,19	307,45
19	64800	302,75	302,75	302,75	302,75
20	68400	299,35	299,35	299,35	299,35
21	72000	296,65	296,65	296,65	296,65
22	75600	294,55	294,55	294,55	294,55
23	79200	292,95	292,95	292,95	292,95
24	82800	291,65	291,65	291,65	291,65

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Tabela G.0.29: Resultados das temperaturas para a localização do sensor de temperatura obtidos pela simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ – modelo

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]	Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
00:00	0	290,95	17,8	12:00	4320	324,18	51,03
00:30	1800	291,27	18,12	12:30	4500	325,95	52,8
01:00	3600	291,67	18,52	13:00	4680	328,04	54,89
01:30	5400	291,73	18,58	13:30	4860	329,45	56,3
02:00	7200	291,56	18,41	14:00	5040	330,84	57,69
02:30	9000	291,27	18,12	14:30	5220	331,69	58,54
03:00	10800	290,9	17,75	15:00	5400	331,35	58,2
03:30	12600	290,52	17,37	15:30	5580	330,95	57,8
04:00	14400	290,25	17,1	16:00	5760	329,67	56,52
04:30	16200	290,14	16,99	16:30	5940	327,35	54,2
05:00	18000	290,37	17,22	17:00	6120	324,21	51,06
05:30	19800	290,93	17,78	17:30	6300	320,23	47,08
06:00	21600	292,04	18,89	18:00	6480	315,74	42,59
06:30	23400	293,66	20,51	18:30	6660	311,24	38,09
07:00	25200	296,01	22,86	19:00	6840	307,54	34,39
07:30	27000	298,94	25,79	19:30	7020	304,64	31,49
08:00	28800	302,17	29,02	20:00	7200	302,44	29,29
08:30	30600	305,56	32,41	20:30	7380	300,71	27,56
09:00	32400	309,04	35,89	21:00	7560	299,28	26,13
09:30	34200	312,2	39,05	21:30	7740	298,05	24,9
10:00	36000	314,89	41,74	22:00	7920	297	23,85
10:30	37800	317,59	44,44	22:30	8100	296,1	22,95
11:00	39600	319,89	46,74	23:00	8280	295,31	22,16
11:30	41400	322,17	49,02	23:30	8460	294,64	21,49

Representações do perfil de temperaturas no interior da caravana para $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2.\text{K}$

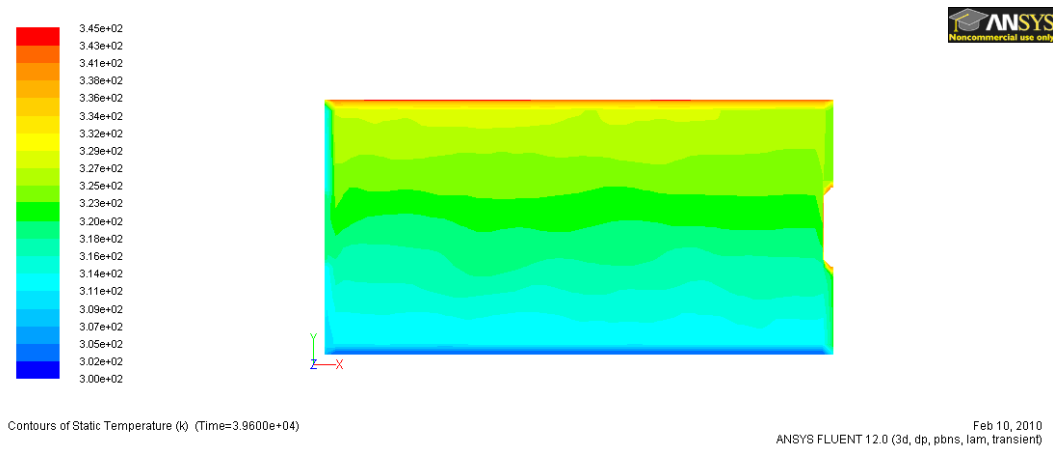


Figura G.0.1: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 11h00
Resultados do modelo

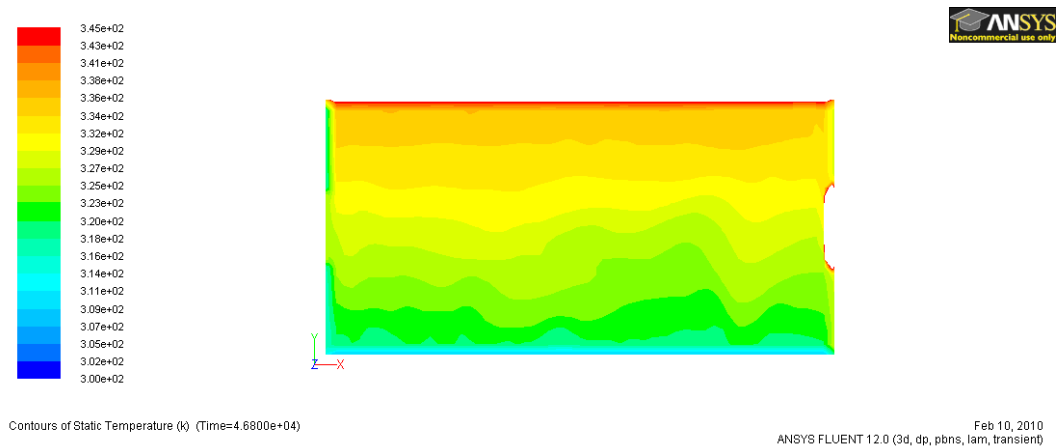


Figura G.0.2: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 13h00
Resultados do modelo

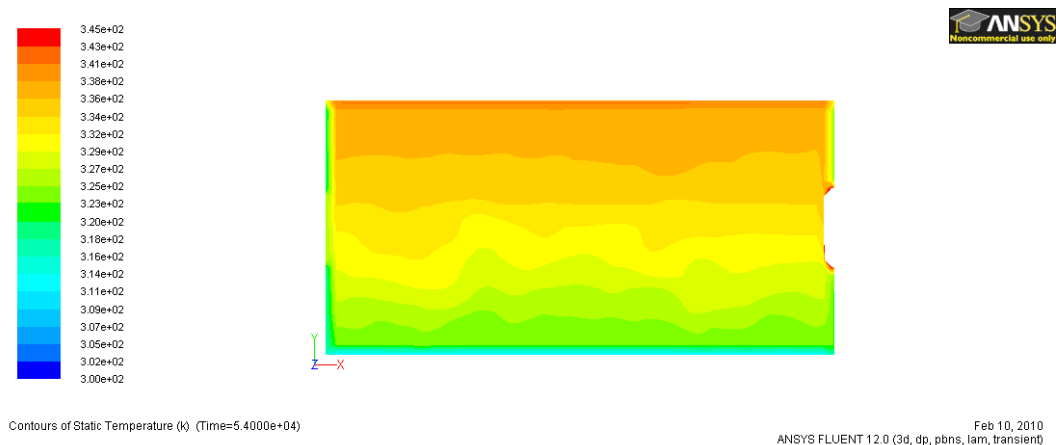


Figura G.0.3: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 17h00
Resultados do modelo

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

Simulação com $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$

Tabela G.0.30: Perfis de temperatura das paredes na simulação para $\alpha=10\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Perfis Temperatura [K]					
		Tecto	Direita	Esquerda	Frente	Traseira	Ambiente
1	0	290,95	290,95	290,95	290,95	290,95	290,95
2	3600	289,75	289,75	289,75	289,75	289,75	289,75
3	7200	288,55	288,55	288,55	288,55	288,55	288,55
4	10800	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35
5	14400	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35	287,35
6	18000	289,278	288,558	288,622	288,558	288,622	287,95
7	21600	294,07	291,174	298,31	291,174	292,854	289,75
8	25200	299,99	294,454	304,422	294,534	295,158	292,55
9	28800	306,466	298,226	308,434	299,554	298,226	296,05
10	32400	312,826	302,106	310,698	305,05	302,106	299,85
11	36000	318,614	305,974	311,622	310,23	305,974	303,75
12	39600	323,122	309,554	311,426	314,498	309,554	307,25
13	43200	325,922	314,226	312,354	317,298	312,354	310,05
14	46800	326,614	319,622	313,974	318,23	313,974	311,75
15	50400	325,026	322,898	314,306	317,25	314,306	312,05
16	54000	321,666	323,634	313,426	314,754	313,426	311,25
17	57600	316,69	321,122	311,154	311,234	311,858	309,25
18	61200	310,67	314,91	307,774	307,774	309,454	306,35
19	64800	304,078	303,422	303,358	303,358	303,422	302,75
20	68400	299,35	299,35	299,35	299,35	299,35	299,35
21	72000	296,65	296,65	296,65	296,65	296,65	296,65
22	75600	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55
23	79200	292,95	292,95	292,95	292,95	292,95	292,95
24	82800	291,65	291,65	291,65	291,65	291,65	291,65

Tabela G.0.31: Perfis de temperatura das janelas na simulação para $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$ - modelo

Hora	Tempo [s]	Perfis Temperatura [K]			
		Direita	Esquerda	Frente	Traseira
1	0	290,95	290,95	290,95	290,95
2	3600	289,75	289,75	289,75	289,75
3	7200	288,55	288,55	288,55	288,55
4	10800	287,35	287,35	287,35	287,35
5	14400	287,35	287,35	287,35	287,35
6	18000	287,95	287,95	287,95	287,95
7	21600	292,32	291,47	293,57	290,83
8	25200	310,56	403,76	405,69	300,10
9	28800	325,46	436,51	510,88	308,38
10	32400	336,61	429,77	595,84	315,26
11	36000	344,55	400,76	658,46	320,86
12	39600	349,89	358,01	692,51	325,13
13	43200	396,80	335,00	695,31	327,93
14	46800	477,54	335,63	666,46	328,86
15	50400	534,08	333,56	608,04	327,46
16	54000	551,29	328,46	526,08	323,58
17	57600	499,30	319,79	422,39	316,80
18	61200	309,29	307,86	310,17	307,43
19	64800	302,75	302,75	302,75	302,75
20	68400	299,35	299,35	299,35	299,35
21	72000	296,65	296,65	296,65	296,65
22	75600	294,55	294,55	294,55	294,55
23	79200	292,95	292,95	292,95	292,95
24	82800	291,65	291,65	291,65	291,65

Tabela G.0.32: Resultados das temperaturas para a localização do sensor de temperatura obtidos pela simulação para $\alpha=25\text{W/m}^2\text{K}$ – modelo

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]	Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
00:00	0	290,95	17,8	12:00	4320	321,18	48,03
00:30	1800	290,91	17,76	12:30	4500	322,62	49,47
01:00	3600	290,66	17,51	13:00	4680	324,33	51,18
01:30	5400	290,27	17,12	13:30	4860	325,71	52,56
02:00	7200	289,89	16,74	14:00	5040	326,59	53,44
02:30	9000	289,27	16,12	14:30	5220	327,14	53,99
03:00	10800	288,72	15,57	15:00	5400	327,07	53,92
03:30	12600	288,19	15,04	15:30	5580	326,24	53,09
04:00	14400	287,87	14,72	16:00	5760	324,51	51,36
04:30	16200	287,73	14,58	16:30	5940	322,01	48,86
05:00	18000	287,86	14,71	17:00	6120	318,26	45,11
05:30	19800	288,37	15,22	17:30	6300	314,19	41,04
06:00	21600	289,65	16,5	18:00	6480	310,48	37,33
06:30	23400	291,69	18,54	18:30	6660	307,2	34,05
07:00	25200	294,72	21,57	19:00	6840	304,57	31,42
07:30	27000	298,23	25,08	19:30	7020	302,35	29,2
08:00	28800	301,76	28,61	20:00	7200	300,51	27,36
08:30	30600	305,16	32,01	20:30	7380	298,91	25,76
09:00	32400	308,27	35,12	21:00	7560	297,56	24,41
09:30	34200	310,9	37,75	21:30	7740	296,35	23,2
10:00	36000	313,4	40,25	22:00	7920	295,31	22,16
10:30	37800	315,43	42,28	22:30	8100	294,26	21,11
11:00	39600	317,57	44,42	23:00	8280	293,52	20,37
11:30	41400	319,52	46,37	23:30	8460	292,84	19,69

Representações do perfil de temperaturas no interior da caravana para $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

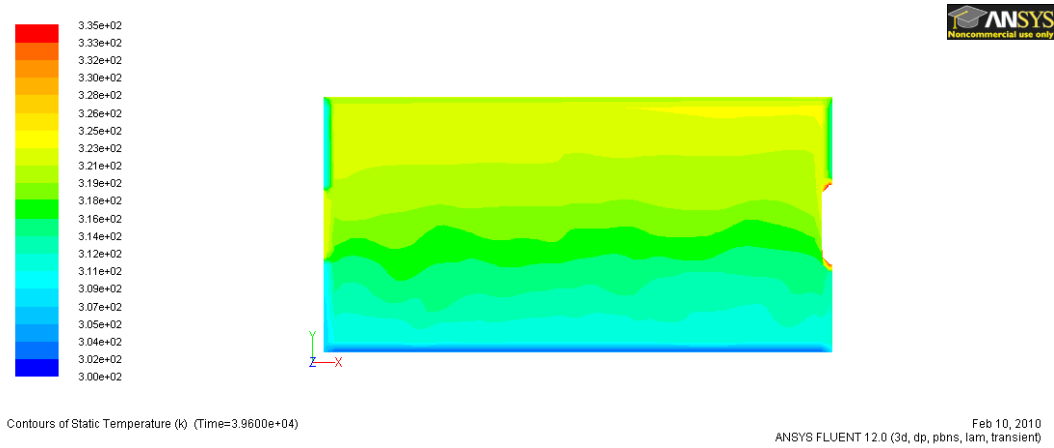


Figura G.0.4: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 11h00
Resultados do modelo

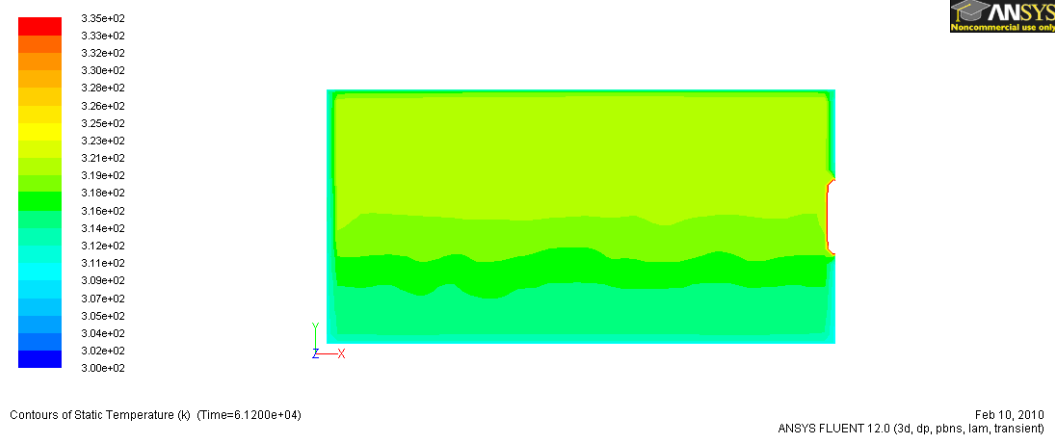


Figura G.0.5: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 11h00
Resultados do modelo

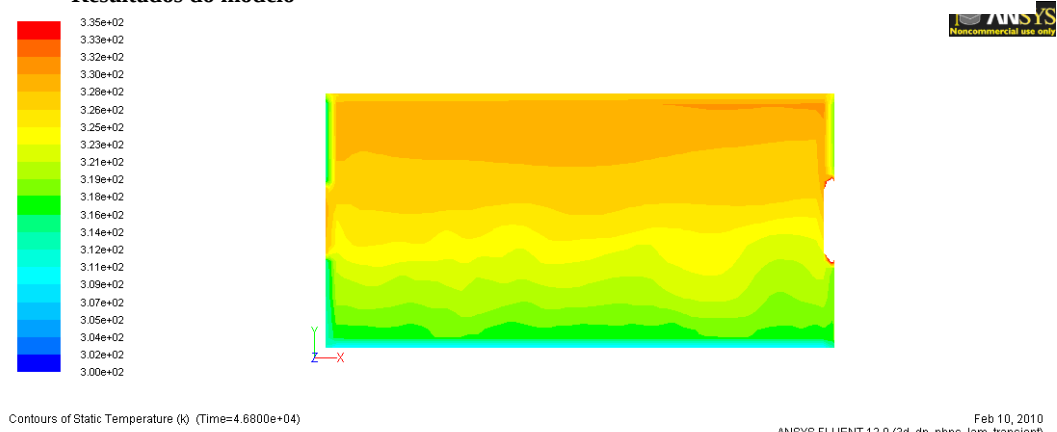


Figura G.0.6: Perfil de temperaturas para Moura - $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ às 11h00
Resultados do modelo

Modelo – Simulação para Moura com sistema de refrigeração

Tabela G.33: Parâmetros da simulação - modelo

Solver Setting	
Solver Formulation Time	Segregated Implicit Unsteady
Unsteady Formulation	1st Order Implicit
Velocity Formulation	Absolute
Gradient Option	Breen-Gauss Cell Based
Porous Formulation	Superficial Velocity
Operating Conditions	
Operating Pressure	101325
Reference Pressure Location	(0,0,0)
Gravity	Gravitational Acceleration (X=0, Y=-9,81, Z=0)
Energy Model	
Energy Equation	Activo
Solution Controls	
Equations	Energy Flow
Under Relaxation Factors	Default
Pressure Velocity Coupling	SIMPLE

Tabela G.34: Propriedades dos materiais de simulação – modelo

Materials					
	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν	α
Ar	Gás ideal	1006,43	0,0242	1,79E-05	-
Paredes	109,39	1485,13	1,671	-	-
Chão	639,39	2274,82	3,376	-	-
Tecto	306,54	1899,33	2,362	-	-
Janela Frente	132,04		0,022	-	-
Janela direita	101,57	1460	0,017	-	-
Janela esquerda	59,25		0,010	-	-
Janela traseira	42,32		0,007	-	-

Tabela G.0.335: Condições de fronteira da simulação

Boundary Conditions					
Paredes	Thermal	Janelas	Thermal	SCV	Momentum
Frente	313,44	Frente	438,73	Evaporador	Pressure Outlet
Direita	320,85	Direita	557,68	Laterais evaporadores	Pressure Inlet
Esquerda	312,31	Esquerda	339,51		
Traseira	312,31	Traseira	331,28		
Chão	310,5				
Tecto	323,51				

Representações do perfil de temperaturas no interior da caravana

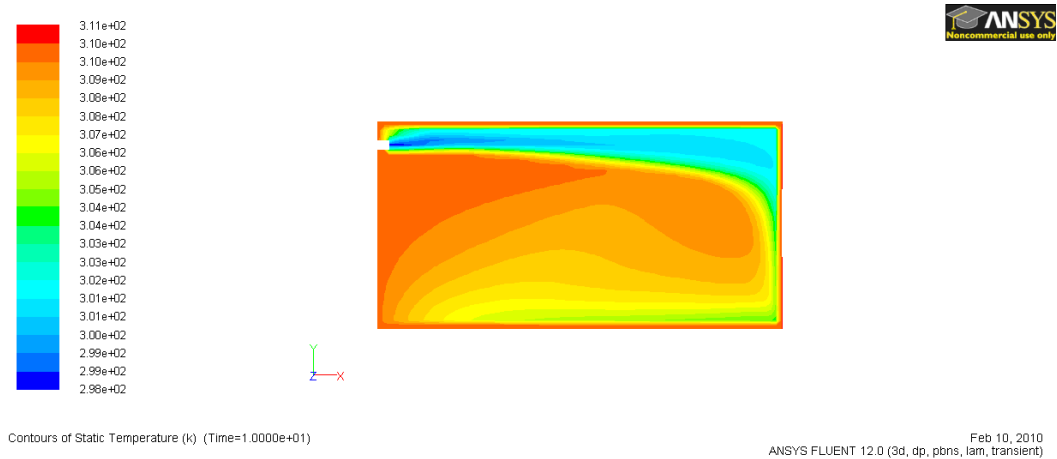


Figura G.0.7 Perfil de temperaturas passados 10s. Resultados do modelo com sistema de refrigeração

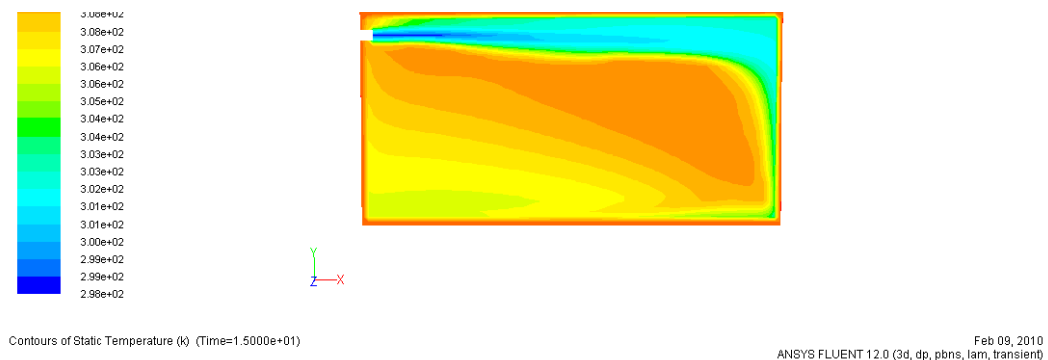


Figura G.0.8: Perfil de temperaturas passados 15s. Resultados do modelo com sistema de refrigeração

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor

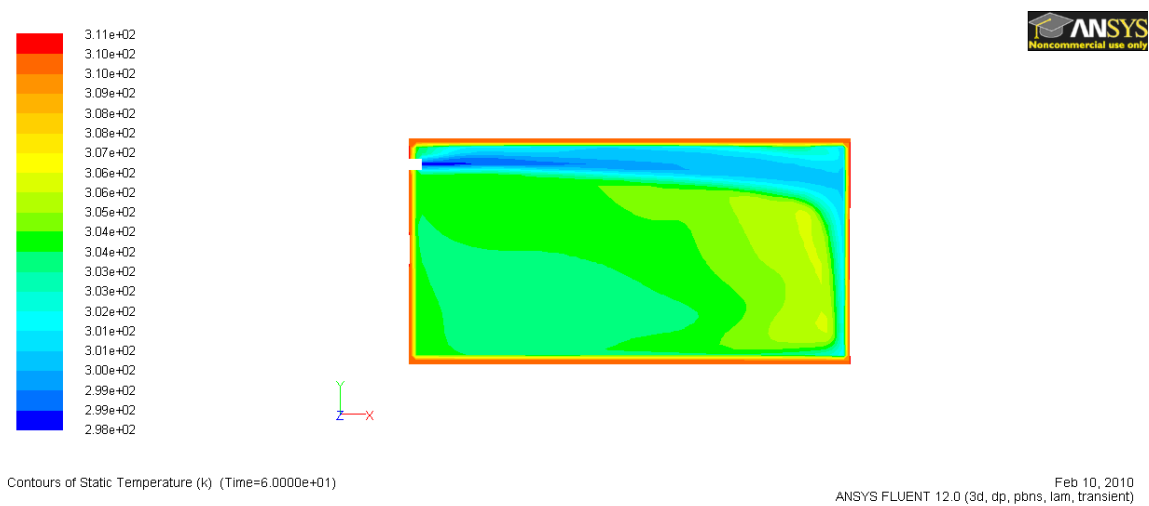


Figura G.9: Perfil de temperaturas passados 60s. Resultados do modelo com sistema de refrigeração

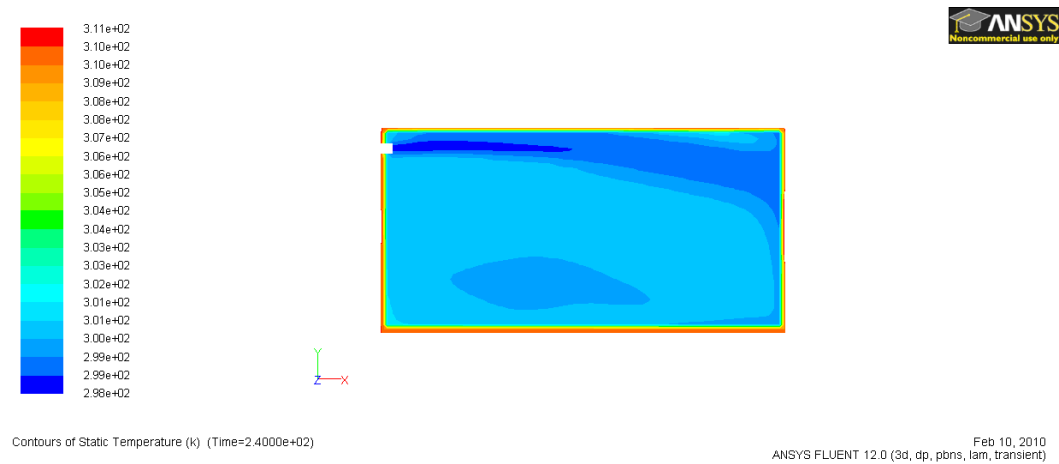


Figura G.10: Perfil de temperaturas passados 240s. Resultados do modelo com sistema de refrigeração

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema de compressão de vapor