

**Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para
uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por
painéis fotovoltaicos**

Marco Filipe Pinto da Silva

Relatório da Dissertação Final do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Clito Afonso



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 em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Aos meus Pais, irmão e namorada por todo o apoio prestado ao longo do curso.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Resumo

As caravanas quando sujeitas a condições meteorológicas adversas podem atingir níveis de desconforto elevados. Para que se consiga atingir o conforto térmico, é necessário recorrer-se a um sistema de refrigeração ou aquecimento. O presente estudo tem como objectivo o desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas apoiado por painéis fotovoltaicos.

Uma caravana não tem uma localização geográfica fixa por isso o sistema de refrigeração foi dimensionado tendo em conta a região de Moura, mais desfavorável em Portugal. Para o cálculo das cargas térmicas, foram medidas as infiltrações na caravana. As cargas térmicas foram então calculadas, tendo sido obtido uma potência total de 2488W. Foram ainda medidas as temperaturas do ar interior da caravana.

Posteriormente foi seleccionado o sistema de refrigeração termoelétrico, que para não estar sobredimensionamento, foi escolhido para uma potência de 2200W. O sistema de refrigeração será apoiado energeticamente por três painéis fotovoltaicos da Sanyo, perfazendo no total uma potência instalada de 720W. São painéis constituídos por células HCI de elevada eficiência, atingindo 17,3%.

O presente estudo contempla também simulações em CFD, realizadas no software FLUENT. Para tal foram criados vários modelos representativos da caravana no software GAMBIT e simulados sob diversas condições. Pretendia-se com as simulações avaliar a evolução das temperaturas do ar no seu interior assim como o comportamento do sistema de refrigeração. Verificou-se que o modelo de radiação disponibilizado pelo FLUENT é de difícil utilização, sendo usado um método alternativo baseado no conceito de temperatura ar-sol. Mediante as condições introduzidas nas simulações, os resultados estão dentro do esperado quando comparados com os valores medidos experimentalmente.

Torna-se por isso indispensável o uso de um sistema de refrigeração nas caravanas.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Development of an ambient cooling system for a caravan based on a thermoelectric cooler supported by photovoltaic panels.

Abstract

Caravans when subjected to adverse weather conditions can reach high levels of discomfort. In order to achieve thermal comfort, it is necessary to use a cooling or heating system. The aim of this thesis is the development of an ambient cooling system for a caravan based on a thermoelectric cooler supported by photovoltaic panels.

Since caravan's don't have a fixed location, the cooling system has been designed for Moura, Alentejo, the most adverse region in Portugal. For the calculation of thermal loads, the infiltrations were measured. The interior air temperatures was also been measured. The thermal load calculated for Moura reached 2488W.

Later the thermoelectric cooling system was selected. In order to avoid oversizing, it was selected a 2200W thermoelectric cooler. The cooling system is supported by three photovoltaic modules from Sanyo, reaching a 720Wp. Panels are made of HCl cells providing high efficiency, reaching 17.3%.

This study also includes CFD simulations carried out in software FLUENT. For that purpose, several models were designed in GAMBIT software and simulated under various conditions. The aim was to simulate the evolution of air temperatures inside the caravan and the behaviour of the cooling system. It was found that the radiation model provided by FLUENT is difficult to use, being used an alternative method. With the conditions introduced in the simulations, the results are as expected when compared with the values measured experimentally.

It is therefore necessary to use a cooling system in caravans.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoeléctricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível devido à colaboração de várias pessoas, às quais quero agradecer.

Agradeço ao Professor Clito Félix Afonso, meu orientador, pelo apoio e disponibilidade mostrada ao longo deste trabalho, sem o qual a realização deste projecto não seria possível. Agradeço também ao Professor Szabolcs Varga pela colaboração e ajuda prestadas aquando da aprendizagem do software FLUENT, e ao Professor Óscar Mota pela contribuição e ajuda prestada ao longo deste estudo.

Devo ainda agradecer ao Professor Armando Oliveira pela ajuda prestada na análise do sistema fotovoltaico, ao Professor Mário Guindeira e à Eng.^a Isabel Martins pela colaboração e disponibilidade mostradas aquando das medições experimentais e à D. Amélia Silva da Campinanda por todas as informações fornecidas sobre caravanas e caravanismo.

Agradeço ainda a todos aqueles que me apoiaram e ajudaram ao longo deste difícil trajecto, em especial aos meus amigos Carlos Leite e Márcio Castro pela ajuda e camaradagem prestadas.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Índice de conteúdos

1.	Introdução.....	1
1.1.	A Campinanda	1
1.2.	Enquadramento	2
1.3.	Descrição e objectivos do projecto	5
1.4.	Organização e temas abordados no relatório	6
2.	Estado da arte.....	7
2.1.	Sistemas Termoelétricos	7
2.1.1.	Sistema de refrigeração termoelétrico	8
2.1.2.	Fenómenos termoelétricos	12
2.1.3.	Relações termodinâmicas	14
2.1.4.	Potência de arrefecimento	20
2.1.5.	COP	22
2.1.6.	Figura de mérito	22
2.2.	Sistemas Fotovoltaicos	24
2.2.1.	Introdução.....	24
2.2.2.	Energia fotovoltaica.....	25
2.2.3.	Efeito fotovoltaico	29
2.2.4.	Células fotovoltaicas	30
2.2.5.	Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	34
2.2.6.	Equipamento fotovoltaico.....	37
3.	Trabalhos experimentais.....	43
3.1.	Dimensões e propriedades dos materiais da caravana	43
3.2.	Medição das infiltrações	44
3.3.	Medição de temperaturas	47
4.	Cargas térmicas.....	49
4.1.	Cálculo das cargas térmicas de arrefecimento	49
4.1.1.	Ganhos pela envolvente opaca	49
4.1.2.	Ganhos pelos envidraçados	49
4.1.3.	Ganhos associados às infiltrações	50
4.1.4.	Ganhos internos	50
4.2.	Coefficientes de transmissão térmica.....	50

4.2.1.	Resistências térmicas	50
4.2.2.	Coeficientes de transmissão térmica da caravana	51
4.3.	Cargas térmicas totais.....	52
5.	Seleção de equipamento	55
5.1.	Seleção do sistema termoelétrico.....	55
5.2.	Seleção dos painéis fotovoltaicos	58
5.2.1.	Cálculo do sistema fotovoltaico	58
5.2.2.	Escolha dos painéis	61
5.3.	Considerações finais sobre os sistemas	64
6.	Simulações	65
6.1.	Processo de simulação.....	65
6.2.	Definição do tipo de malha	66
6.3.	Definição das propriedades dos materiais para simulação.....	66
6.4.	Desenvolvimento do modelo da Caravana	68
6.4.1.	Modelo 1 - Modelo simples	69
6.4.2.	Modelo 2 - Modelo com ar envolvente	70
6.4.3.	Modelo 3 - Modelo com janelas e ar envolvente	73
6.4.4.	Modelo 4 – Modelo final	76
6.5.	Validação do modelo.....	80
6.6.	Simulação para Moura.....	84
6.7.	Simulação com Sistema de Refrigeração	86
6.8.	Análise das simulações.....	89
7.	Conclusões e perspectivas futuras.....	91
8.	Referências e Bibliografia.....	93
Anexo A.	Resultados dos testes do Gás Traçador	97
Anexo B.	Resultados das medições de temperatura do ar no interior da caravana.....	99
Anexo C.	Desenho técnico do Sistema Termoelétrico.....	103
Anexo D.	Cargas térmicas, produção e consumo de energia para os dias mais desfavoráveis em Moura e no Porto.....	105
Anexo E.	Dados de outros módulos consultados	107
Anexo F.	Desenho técnico e curvas características do Módulo HIT-240HDE4 da Sanyo....	109
Anexo G.	Dados e resultados das simulações.....	111
Anexo H.	Dados meteorológicos do Porto e Moura para os dias de referência.	137

Índice de figuras

Figura 1.1. Estrutura da caravana Caravelair Antarés Luxe 400 [2]	2
Figura 1.2. Evolução das importações de petróleo em Portugal entre 2003 e 2009 [3]	3
Figura 1.3. Perspectiva da evolução das emissões de carbono relativas à queima de combustíveis fósseis [6]	3
Figura 1.4. Evolução dos preços do petróleo nas últimas décadas [8]	4
Figura 2.1. Módulo termoelétrico em modo de refrigeração [12]	9
Figura 2.2. Módulo termoelétrico em modo de aquecimento [12]	9
Figura 2.3. Design típico de um módulo termoelétrico, de uma etapa (a) e em cascata (b) [11]	10
Figura 2.4. Gama de temperaturas de utilização dos módulos termoelétricos [11]	11
Figura 2.5. Efeito de Seebeck [16]	12
Figura 2.6. Circuito termoelétrico fechado usado para a análise dos fenómenos termoelétricos [22]	15
Figura 2.7. Módulo termoelétrico [15]	20
Figura 2.8. Evolução dos custos associados à electricidade Fotovoltaica [24]	26
Figura 2.9. Crescimento das tecnologias de energias renováveis até 2040. [27]	27
Figura 2.10. Capacidade acumulada a nível mundial até 2008 [27]	27
Figura 2.11: Crescimento do mercado fotovoltaico em Portugal [28]	28
Figura 2.12. Crescimento anual a nível mundial até 2013 [27]	28
Figura 2.13. Ligação p-n dos materiais semicondutores [23]	29
Figura 2.14. Efeito fotovoltaico [23]	30
Figura 2.15. Célula de Silício monocristalina [31]	31
Figura 2.16. Células orgânicas de película fina [33]	33
Figura 2.17. Célula concentradora [34]	34
Figura 2.18. Célula flexível [35]	34
Figura 2.19. Central fotovoltaica de Moura [38]	35
Figura 2.20. Sistema fotovoltaico autónomo [39]	36
Figura 2.21. Módulo com substrato e cobertura em vidro (EVA) [25]	38
Figura 2.22. Efeito das ligações em paralelo (a) e série (b) entre células. [23]	39
Figura 2.23. Curva característica Intensidade de corrente - Tensão de uma célula solar fotovoltaica [24]	39
Figura 2.24. Influência do aumento da irradiação (a) e da temperatura (b) no funcionamento das células [23]	40

Figura 3.1. Representação dos valores da concentração de gás traçador durante o período de teste sem isolamento	45
Figura 3.2. Orifícios presentes no interior da caravana	45
Figura 3.3. Representação dos valores da concentração de gás traçador durante o período de teste com isolamento.....	46
Figura 5.1. Representação esquemática do funcionamento do módulo AAC-151-4XT-HC...	55
Figura 5.2. Módulo Ar-Ar AAC-151-4XT-HC da EIC Solutions	56
Figura 5.3. Posição de montagem na vertical	57
Figura 5.4. Montagem na horizontal.....	57
Figura 5.5. Consumo e produção acumulada no Porto	59
Figura 5.6. Consumo e produção acumulada na região de Moura.....	60
Figura 5.7. Produção de energia para o caso ideal para Porto e Moura.....	61
Figura 5.8. Energia produzida pelos módulos de cada fabricante	62
Figura 5.9. Módulo HIT-240HDE5 da Sanyo.....	62
Figura 5.10. Estrutura das células do módulo HIT-240HDE5 da Sanyo.....	63
Figura 5.11. Variação da potência produzida ao longo do dia.....	63
Figura 5.12. Produção e consumo no Porto e Moura com 3 módulos da Sanyo.	64
Figura 6.1. Processo usado para a realização de simulações em CFD.....	66
Figura 6.2. Modelo simples e respectiva malha.....	69
Figura 6.3. Fluxos de calor solar incidentes no interior da caravana às 8h	70
Figura 6.4. Ligação entre volumes do modelo.....	70
Figura 6.5. Modelo da caravana com ar envolvente	71
Figura 6.6. Malha do modelo com ar envolvente à caravana	71
Figura 6.7. Perfil de temperatura no interior da caravana às 15h	72
Figura 6.8. Fluxos de calor solares incidentes nas paredes da caravana 15h.....	73
Figura 6.9. Janela da traseira do modelo.....	73
Figura 6.10. Modelo com as janelas e ar envolvente e vista lateral da malha	74
Figura 6.11. Temperaturas no interior da caravana às 15h	75
Figura 6.12. Fluxos de calor solar nas paredes e no interior da caravana às 15h	75
Figura 6.13. Temperaturas no interior e nas paredes da caravana	76
Figura 6.14. Modelo final da caravana	76
Figura 6.15. Pormenor da parede e da malha do modelo.....	77
Figura 6.16. Vista geral da malha do modelo	77
Figura 6.17. Temperaturas obtidas nas simulações e medidas experimentalmente para o dia 23 de Setembro.....	78

Figura 6.18. Perfil de temperaturas às 15h para $\alpha_{\text{conv}} = 6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	79
Figura 6.19. Perfil de temperaturas às 15h para $\alpha_{\text{conv}} = 12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	79
Figura 6.20. Temperatura ambiente e no interior da caravana registada no dia 14 de outubro de 2009	80
Figura 6.21. Radiação solar global horizontal no dia 14 de Outubro	81
Figura 6.22. Valores de temperatura obtidos nas simulações e a temperatura medidas no interior e exterior da caravana.	82
Figura 6.23. Perfil de temperaturas às 17h para $\alpha_{\text{conv}} = 6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	82
Figura 6.24. Perfil de temperaturas às 17h para $\alpha_{\text{conv}} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	82
Figura 6.25. Perfil de temperaturas às 17h para $\alpha_{\text{conv}} = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	82
Figura 6.26. Radiação solar global horizontal em Moura no dia mais desfavorável.	82
Figura 6.27. Temperaturas médias obtidas nas simulações para o dia mais desfavorável em Moura.	82
Figura 6.28. Perfil de temperaturas às 15h para $\alpha_{\text{conv}} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ em Moura.	82
Figura 6.29. Perfil de temperaturas às 15h para $\alpha_{\text{conv}} = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ em Moura.	82
Figura 6.30. Modelo com Junção fria do sistema de refrigeração.....	82
Figura 6.31. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 10 segundos.....	82
Figura 6.32. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 30 segundos.....	82
Figura 6.33. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 120 segundos.....	82
Figura 6.34. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 750 segundos.....	82

Índice de tabelas

Tabela 3.1. Dimensões da caravana.....	43
Tabela 3.2. Materiais constituintes da caravana	44
Tabela 3.3. Propriedades dos materiais constituintes da caravana	44
Tabela 4.1. Resistências térmicas associadas à convecção interior e exterior [10].....	51
Tabela 4.2. Resultados das resistências térmicas e coeficientes de transmissão térmicas para todas as paredes	51
Tabela 4.3. Resultados das resistências térmicas e coeficientes de transmissão térmicas para todas as janelas	52
Tabela 4.4. Valores de radiação global incidente em cada superfície.....	52
Tabela 4.5. Ganhos pela envolvente opaca.....	53
Tabela 4.6. Ganhos pelos envidraçados	53
Tabela 4.7. Ganhos associados às infiltrações.....	54

Tabela 5.1. Valores usados no cálculo do balanço energético [52]	59
Tabela 5.2. Características dos módulos usados para comparação [53]	61
Tabela 5.3. Dados obtidos em cada fabricante.....	62
Tabela 5.4. Dados técnicos do módulo HIT-240HDE5	63
Tabela 6.1. Dimensões do modelo e da caravana	67
Tabela 6.2. Propriedades equivalentes dos materiais da caravana e do modelo	68
Tabela 6.3. Propriedades equivalentes dos materiais das janelas da caravana e do modelo ...	68

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
A_i	Área de cada superfície	m^2
A_{modelo}	Área de cada superfície do modelo	m^2
A_{PV}	Área do painel fotovoltaico	m^2
$A_{\text{p,n}}$	Área superficial do elemento semiconductor	m^2
A_{real}	Área real de cada superfície	m^2
C	Concentração de gás	ppm
C_0	Concentração inicial de gás	ppm
C_p	Calor específico	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$C_{p \text{ eq}}$	Calor específico equivalente	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$C_{p,i}$	Calor específico de cada elemento	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
E	Campo eléctrico do módulo	V
$\dot{E}_{\text{elétrica}}$	Potencia eléctrica produzida	W
e_i	Espessura de cada elemento da parede	m
e_{modelo}	Espessura da parede do modelo	m
I	Intensidade de corrente	A
\dot{I}	Radiação solar incidente	W.m^{-2}
\bar{I}	Infiltração média de ar	s
I_i	Intensidade da Radiação Solar incidente	W.m^{-2}
I_{inf}	Taxa de infiltrações	s
I_{opt}	Intensidade de corrente óptima	A
I_{SC}	Intensidade de corrente máxima no circuito	A
k	Condutividade térmica de cada elemento	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
K	Coefficiente de perdas do módulo	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
L	Comprimento de cada elemento	m
\dot{m}	Caudal mássico de ar	kg.s^{-1}
p	Pressão estática	Pa
P_{AC}	Potência de saída efectiva	W
P_{DC}	Potência de entrada efectiva	W

q_i	Potência de arrefecimento do módulo termoelétrico	W
$q_{i,max}$	Potência de arrefecimento máximo do módulo termoelétrico	W
$Q_{Condução}$	Calor transferido por condução	W
$\dot{Q}_{Envolvente}$	Potência calorífica pela envolvente opaca	W
$\dot{Q}_{Envidraçados}$	Potência calorífica pelos envidraçados	W
$\dot{Q}_{incidente}$	Radiação solar incidente no módulo	W
\dot{Q}_{inf}	Potência calorífica devido às infiltrações	W
$\dot{Q}_{Internos}$	Potência calorífica devido a ganhos internos	W
Q_J	Calor gerado por efeito de Joule	W
Q_τ	Calor por efeito de Thomson	W.m ⁻¹
\dot{Q}_{TEC}	Potência do sistema termoelétrico	W
\dot{Q}_{Total}	Carga térmica total	W
r	Resistência de contacto	$\Omega.cm^2$
R	Resistência do circuito	Ω
$R_{Condução\ equivalente}$	Resistência térmica de condução pelas paredes	m ² °C.W ⁻¹
$R_{Conv,ext}$	Resistência térmica de convecção exterior	m ² °C.W ⁻¹
$R_{Conv,int}$	Resistência térmica de convecção interior	m ² °C.W ⁻¹
R_{eq}	Resistência equivalente de cada parede	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
R_T	Resistência total do circuito	Ω
U	Condutância térmica do sistema	K.W ⁻¹
U_i	Coefficiente de transmissão térmica de cada superfície	W.m ⁻² .K ⁻¹
v	Velocidade do ar	m.s ⁻¹
V	Volume de ar infiltrado	m ³
\dot{V}	Caudal volúmico de ar	m ³ .s ⁻¹
V_{OC}	Tensão máxima com circuito aberto	V
t	Tempo de medição da concentração de gás	s
T	Temperatura absoluta	K
T_{ar-sol}	Temperatura fictícia ar-sol	K
T_C	Temperatura do lado frio do módulo termoelétrico	K
T_{ext}	Temperatura do ar exterior	K
T_H	Temperatura do lado quente do módulo termoelétrico	K
T_i	Temperatura da junção	K
T_{int}	Temperatura do ar interior	K

T_m	Temperatura média	K
T_{ref}	Temperatura de referência	K
∇T	Gradiente de Temperatura	K
W	Potencia eléctrica fornecida	W
y	Razão entre áreas dos elementos semicondutores	
Z	Figura de mérito	
Z_{MAX}	Figura de mérito máxima	

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidades
α	Coeficiente de absorção	
α_{conv}	Coeficiente de convecção	$W.m^{-2}.K^{-1}$
α_i	Coeficiente de Seebeck	
α_i	Coeficiente de absorção das janelas	
β	Coeficiente de temperatura	K^{-1}
ΔS	Variação da entropia	$J.K^{-1}$
ΔV	Diferença de potencial	V
ΔT	Diferença de temperatura	K
η	Rendimento do módulo fotovoltaico	
η_{conv}	Rendimento do conversor	
η_{ref}	Rendimento de referência de um módulo fotovoltaico	
λ_{eq}	Condutibilidade térmica equivalente	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_i	Condutibilidade térmica de cada elemento das paredes	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_{p,n}$	Condutibilidade térmica dos semicondutores	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ	Massa específica	$kg.m^{-3}$
ρ_{eq}	Massa específica equivalente da parede	$kg.m^{-3}$
$\rho_{eq,modelo}$	Massa específica equivalente da parede do modelo	$kg.m^{-3}$
$\rho_{p,i}$	Massa específica equivalente da parede de cada camada da superfície	$kg.m^{-3}$
$\rho_{p,n}$	Resistividade térmica dos elementos termoelétricos	$\Omega.cm^{-1}$
σ	Condutibilidade eléctrica	$cm.\Omega^{-1}$
τ	Coeficiente de Thomson	$V.K^{-1}$

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

τ_i	Coefficiente de transmissão térmica das janelas	
$\tau\alpha$	Rendimento óptico do módulo fotovoltaico	
Φ_{AB}	Coefficiente de Peltier do Conjunto	V
Φ_i	Coefficiente de Peltier de cada material	V

Abreviaturas

Símbolo	Descrição	Unidades
AC	Corrente alternada	A
CFD	Computational Fluid Dynamic	
COP	Coefficient Of performance	
DC	Corrente contínua	A
DO	Discrete Ordinates	
EFG	Edge defined Film-Fed Growth	
EPIA	European Photovoltaic Industry Association	
EVA	Etileno Vinil Acetato	
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	
HCI	Heterojunção com uma Camada fina Intrínseca	
MPP	Maximum Power Point	
NOCT	Normal Operating Cell Temperature	
PV	Sistema Fotovoltaico	
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios	
SOC	State Of Charge	
SRT	Solar Ray Tracing	
TEC	Sistema de Refrigeração Termoelétrico	

1. Introdução

O caravanismo é cada vez mais procurado e encarado como um modo de passar férias e viajar, sendo que para tal, os seus ocupantes devem usufruir das melhores condições de conforto possíveis. Uma caravana está sujeita às mais diversas condições climatéricas, desde frio ao calor extremo, precisando por isso de estar munida de um sistema de refrigeração ou aquecimento, para promover o conforto térmico dos seus ocupantes. Assim sendo, surge este estudo para o desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana, sendo usado para tal um sistema de refrigeração termoelétrico. A energia eléctrica para este sistema será fornecida por painéis fotovoltaicos.

Este estudo foi realizado para uma caravana de gama média-baixa cedida pela Campinanda. Para escolher o modelo do sistema de refrigeração termoelétrico que melhor se adequa às necessidades da mesma, é necessário conhecer as cargas térmicas a que a caravana estará sujeita. Foram então calculadas as cargas térmicas para as condições de projecto na estação de arrefecimento, para a região mais desfavorável do país, Moura. Para avaliar a potência calorífica associada às infiltrações, foram realizadas medições experimentais recorrendo para tal à técnica dos gases traçadores. Foram ainda executadas medições de temperatura no interior da caravana. Foi usado um “datalogger” para a realização das mesmas, tendo estas medições como objectivo o conhecimento da evolução das temperaturas do ar no interior da caravana. As medições foram efectuadas na FEUP

Posteriormente, foi escolhido o sistema de refrigeração termoelétrico tendo como suporte o valor das cargas térmicas. Para seleccionar o sistema fotovoltaico foram considerados vários parâmetros tais como a energia eléctrica necessária para alimentar o sistema de refrigeração, dados meteorológicos e limitações físicas da caravana.

De modo a prever as temperaturas do ar atingidas no interior da caravana, foram realizadas simulações num software CFD. Para tal foi usado o FLUENT da empresa Ansys. Para realizar tais simulações, foram construídos vários modelos representativos da caravana no software GAMBIT, também pertencente à empresa Ansys, que foram sujeitos a um processo de validação tendo como referência as temperaturas medidas experimentalmente e do ambiente. Foram então realizadas três simulações, para diferentes coeficientes de convecção, tendo como objectivo a validação do modelo para o Porto. Validado o modelo, foram realizadas simulações para a região mais desfavorável, Moura, para prever a evolução da temperatura do ar no interior da caravana. Foram ainda realizadas simulações com o sistema de refrigeração integrado, para que se possa averiguar a evolução do campo de temperaturas no interior da caravana.

1.1. A Campinanda

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, apresenta-se como a representante oficial e em exclusivo em Portugal das marcas do prestigiado Grupo de Lazer Francês “TRIGANO”: Caravanas CARAVELAIR, Autocaravanas CHALLENGER e 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 (esta Norma especifica requisitos para um sistema de gestão da qualidade), [1].

Para garantir o seu estatuto e, com o objectivo de aumentar a cota de mercado, a Campinanda investiu desde sempre em soluções inovadoras e pessoal qualificado, 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 seu crescimento sustentável sempre baseada nas novas tecnologias.

Numa estratégia de melhoria dos seus produtos, e para garantir uma liderança, não só comercial, mas também tecnológica, a Campinanda estabeleceu um ambicioso plano de desenvolvimento das suas caravanas e autocaravanas. Este plano, tem como objectivo uma revolução no actual conceito de caravanismo, e passa por uma remodelação das caravanas ao nível da electrónica, da mecânica, do design e do ponto de vista energético, que será objecto de análise neste estudo ao nível da refrigeração ambiente.

A caravana cedida pela Campinanda para o desenvolvimento deste projecto é uma Caravelair Antarés Luxe 400. A representação esquemática da mesma é apresentada na Figura 1.1



Figura 1.1. Estrutura da caravana Caravelair Antarés Luxe 400 [2]

Esta caravana é de gama média-baixa, com capacidade para 4 pessoas, possuindo para o efeito uma cama de casal e um sofá-cama também ele de casal, assim como dispõe de uma casa de banho com duche. Em termos de equipamentos, a caravana está equipada com um fogão a gás, um frigorífico com 86 litros de capacidade e três modos de funcionamento possíveis (12V, 230V ou gás), um cilindro com capacidade para 5 litros e um aquecedor com 300W de potência. As dimensões da caravana serão apresentadas mais à frente a propósito do cálculo das cargas térmicas.

1.2. Enquadramento

Aquando da Revolução Industrial, assistiu-se a uma crescente industrialização e modernização das sociedades a nível mundial, sendo que as necessidades energéticas tiveram um aumento bastante significativo. Estas necessidades energéticas têm sido supridas com o recurso a combustíveis de origem fóssil, nomeadamente o carvão, o petróleo e o gás natural.

Devido à recorrente utilização destes combustíveis, estima-se que as reservas naturais dos mesmos se esgotem dentro de poucas décadas, visto serem recursos naturais não renováveis.

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios, obrigando assim o país a uma forte dependência energética do exterior, principalmente no que se refere a importações de fontes primárias de origem fóssil. A Figura 1.2 é representativa da evolução das importações de petróleo entre 2003 e 2009 em milhares de barris por dia, em Portugal.

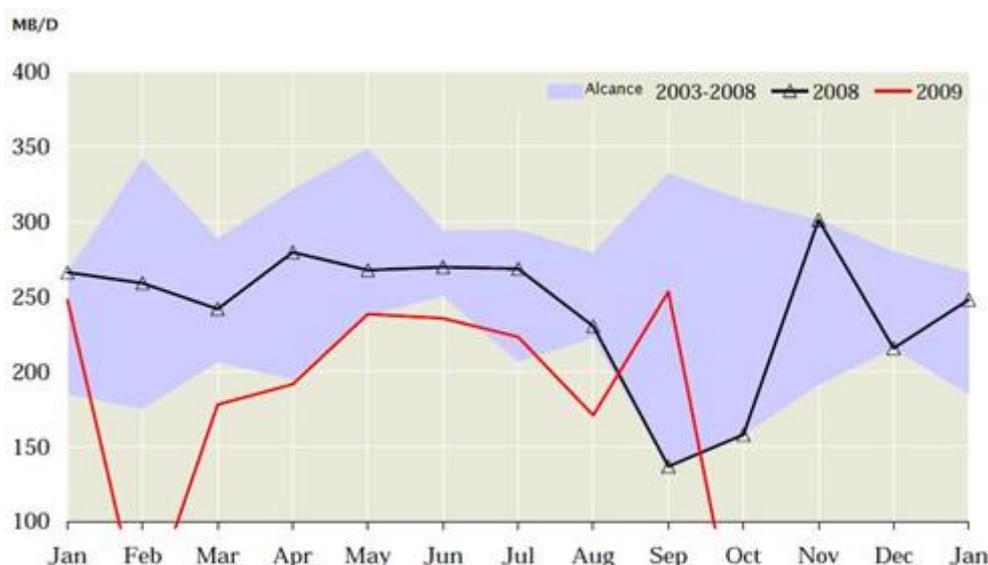


Figura 1.2. Evolução das importações de petróleo em Portugal entre 2003 e 2009 [3]

Em termos de consumo de energia primária, o petróleo apresenta ainda um papel fundamental na estrutura de abastecimento, representando uma parcela significativa do consumo total de energia primária, sendo seguida pelo gás natural e pelo carvão, [4].

O intenso consumo de combustíveis fósseis ao longo dos anos conduziu a um aumento substancial da concentração de CO₂, tal como mostra a Figura 1.3, na atmosfera e paralelamente ao aumento de outros gases de efeito estufa, provocando assim alterações climáticas à escala mundial, [5].

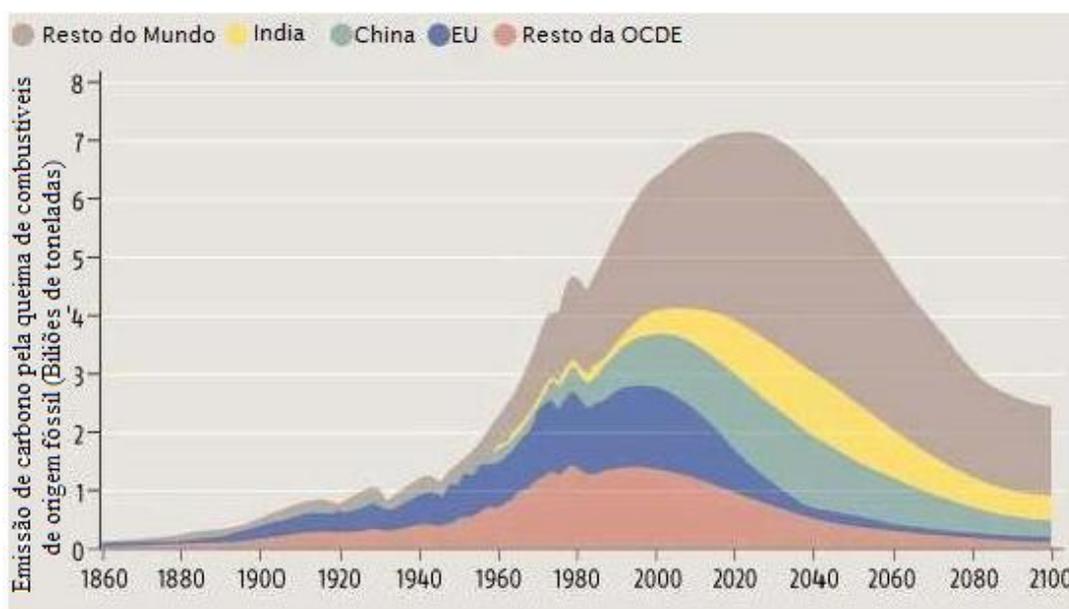


Figura 1.3. Perspectiva da evolução das emissões de carbono relativas à queima de combustíveis fósseis [6]

Tendo em conta a dependência energética, o elevado consumo de energia primária de origem fóssil e as alterações climáticas, é estritamente necessário apostar e aproveitar o enorme potencial que Portugal tem em fontes renováveis de energia, particularmente a energia solar e eólica. A introdução de tecnologias com baixo nível de carbono e a melhoria da eficiência energética também irá contribuir para uma maior diversificação das fontes de energia e uma redução significativa das emissões de CO₂, [4].

Posto isto, é essencial procurar soluções alternativas para melhorar a eficiência energética dos principais sectores consumidores de energia, nomeadamente a indústria e os transportes.

Relativamente ao sector dos transportes, este representa cerca de um terço do consumo energético de grande parte dos países europeus, sendo também estes os responsáveis por cerca de um quinto da emissão de gases com efeito estufa. Estes são também responsáveis por grande parte da poluição atmosférica urbana, bem como da poluição sonora. Contudo, os transportes constituem um elemento fundamental para a sociedade moderna sendo, de facto, indispensável o seu uso, no sentido em que, permite aceder aos empregos, bens e serviços, educação e actividades de turismo e lazer. Para justificar tal facto, verifica-se que o volume de transportes na Europa tem aumentado consideravelmente, sendo esse crescimento mais rápido do que os progressos realizados ao nível da eficiência energética dos diversos meios de transporte. Em consequência disso, o consumo de energia e as emissões de gases também têm aumentado, [7]. Assim, tem-se assistido a nível europeu e mundial a uma crescente sensibilização para a utilização de transportes públicos, uso racional dos veículos, promoção de biocombustíveis, inovações tecnológicas, energias alternativas e de veículos mais ecológicos (eléctricos e híbridos) para deste modo contribuírem de forma apreciável para uma diminuição das emissões de gases.

Como mencionado anteriormente, tanto Portugal como a maioria dos países europeus enfrentam hoje em dia graves dificuldades em termos de política energética e ambiental, resultantes do agravamento do preço do petróleo e do significativo aumento do consumo de energia e da utilização de transportes individuais. A evolução do preço dos barris de petróleo (em Dólares) é apresentada na Figura 1.4 sendo importante destacar o pico histórico alcançado em Junho de 2008, aquando da guerra no Iraque.

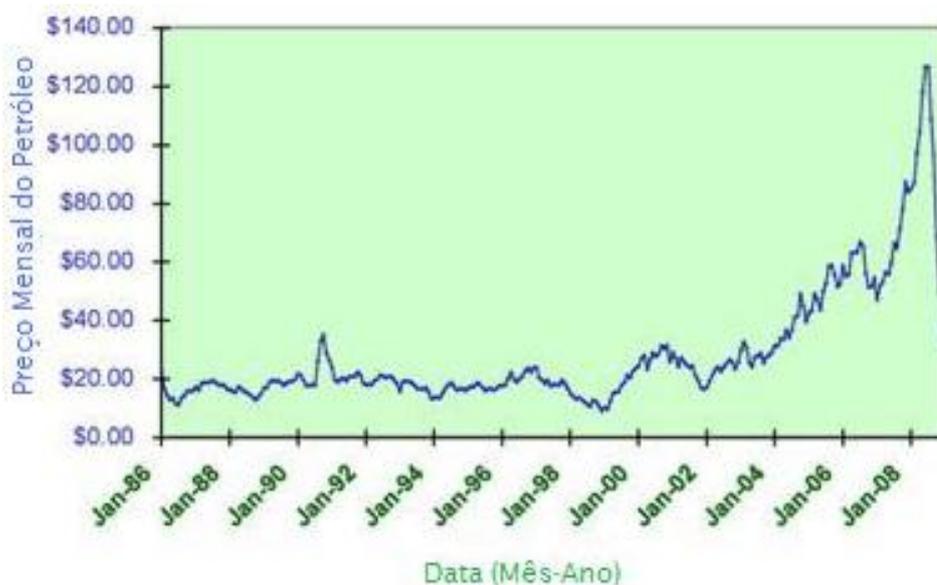


Figura 1.4. Evolução dos preços do petróleo nas últimas décadas [8]

De facto, em Portugal, o sector dos transportes representa cerca de dois terços do consumo de petróleo, o que evidencia a elevada dependência energética do país. Assim, a procura de soluções alternativas e mais “amigas” do ambiente em termos energéticos é primordial sendo que estas passam inevitavelmente pelo recurso a fontes renováveis de energia, [9].

Assim, e no caso de uma caravana que é utilizada essencialmente com fins de lazer e recreio, estão sempre associados consumos de energia eléctrica de modo a garantir, sempre que possível, o conforto mínimo dos seus ocupantes. As caravanas não são independentes em termos energéticos, o que obriga os seus utilizadores a recorrerem a parques de campismo para suprir essa demanda energética, tendo assim vários custos associados.

Um dos aspectos mais importantes na utilização de uma caravana é o conforto dos seus ocupantes. Assim sendo, uma das características a ter em consideração é a temperatura no seu interior, uma vez que as caravanas estão constantemente expostas a todas as adversidades atmosféricas. Dai que, a utilização de um sistema de refrigeração (ou um sistema de aquecimento) ambiente torna-se extremamente relevante. Ao uso deste sistema está associado um consumo de energia, que levará a um aumento significativo da demanda energética da caravana.

Com o intuito de reduzir a necessidade energética da caravana e conseqüentemente os custos relativos à energia, a implementação de um sistema de produção de energia com recurso a fontes renováveis para alimentação do sistema refrigeração seria um grande passo para o desenvolvimento deste mercado tão procurado por todo o mundo

Actualmente, o campismo não significa somente a utilização de uma tenda, mas toda e qualquer actividade que envolva equipamentos de campismo, do mais simples ao mais complexo ou sofisticado. Isto é, pressupõe a utilização de tendas, caravanas ou autocaravanas, seja em locais adequados para o efeito ou em campismo livre. O caravanismo é uma das modalidades de campismo já mais sofisticadas pois com a utilização de uma caravana, já é possível levar algumas das comodidades caseiras que as pessoas normalmente não estão dispostas a dispensar. Posto isto, é fundamental que uma caravana proporcione aos seus utilizadores autonomia e condições de conforto, quer ao nível material, quer ao nível do bem-estar térmico.

1.3. Descrição e objectivos do projecto

O objectivo primordial deste estudo é o desenvolvimento de um sistema de refrigeração para a caravana, acima apresentada. Este será baseado num sistema de refrigeração termoeléctrico. O mesmo será alimentado, em termos energéticos por um painel fotovoltaico que será dimensionado para a potência requerida pelo sistema de refrigeração. Os sistemas vão de encontro às preocupações ambientais acima citadas, não representando qualquer tipo de ameaça para o ambiente.

Para o dimensionamento do sistema de refrigeração será essencial conhecer os parâmetros necessários para calcular a carga térmica a que caravana estará sujeita em condições climatéricas adversas de temperatura e radiação solar. Ainda em relação às cargas térmicas, será necessário avaliar experimentalmente as infiltrações de ar na caravana.

Posteriormente será necessário simular a evolução das temperaturas no interior da caravana, assim como avaliar o comportamento do sistema de refrigeração, de modo a obtermos o melhor campo de temperaturas possível (de preferência um campo uniforme), sendo usado para tal o software FLUENT 6.3.26. Serão então realizadas várias simulações com e sem sistema de refrigeração, de forma a podermos compará-las com o caso real.

1.4. Organização e temas abordados no relatório

Este relatório apresenta o estudo realizado sobre o desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num sistema termoelétrico assistido por painéis fotovoltaicos. Este documento está ordenado e apresentado da seguinte forma: Introdução, Estado da arte, Trabalhos experimentais, Cargas térmicas, Selecção de equipamento, Simulações e Conclusões e perspectivas futuras.

Assim, no presente capítulo, foi feita uma introdução ao estudo realizado, o enquadramento e os objectivos traçados para o mesmo.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte dos sistemas termoelétricos e fotovoltaicos, objecto de análise neste estudo.

O capítulo 3 apresenta os trabalhos experimentais realizados. Nele são descritas as medições de temperatura efectuadas no interior da caravana tal como a medição das infiltrações. São ainda apresentadas as dimensões da caravana assim como as propriedades dos materiais constituintes da mesma.

O capítulo 4 refere-se ao cálculo das cargas térmicas presentes na caravana para as condições de projecto. Cada componente das cargas térmicas é descrita e apresentada a respectiva expressão de cálculo, sendo no final apresentados os resultados obtidos.

Depois de apresentadas as cargas térmicas, no capítulo 5 é apresentada a selecção dos sistemas termoelétrico e fotovoltaico. Neste, são apresentados os principais parâmetros que influenciam a escolha dos sistemas, os sistemas escolhido e a descrição dos mesmos.

No capítulo 6 são apresentadas as simulações realizadas no software CFD, FLUENT. Aqui é apresentado de forma sucinta o processo normalmente adoptado para a realização de simulações em CFD. De seguida é apresentada a descrição e escolha do tipo de malha a usar nos vários modelos assim como as propriedades equivalentes dos materiais usados nos mesmos. Posteriormente são descritos os vários modelos usados nas simulações até ao modelo final. As simulações efectuadas com o mesmo para a sua validação assim como para a região mais desfavorável são apresentadas de seguida. Finalmente, é apresentada uma simulação com o sistema de refrigeração.

Por último, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste estudo.

2. Estado da arte

Depois de definida a abordagem ao problema e o seu enquadramento, será apresentado o estado da arte dos principais sistemas a usar neste projecto. O princípio de funcionamento, fenómenos físicos envolvidos, as vantagens e desvantagens e as suas aplicações, serão alguns dos tópicos que serão descritos para os Sistemas Termoelétricos e Fotovoltaicos.

2.1. Sistemas Termoelétricos

Um sistema termoelétrico baseia-se no efeito de Peltier, descoberto em 1834, que usa a energia eléctrica directamente para a produção de frio sem necessidade de refrigerantes, nem de partes móveis, [10].

Os fenómenos termoelétricos descobertos no século XIX por Seebeck, Peltier e W. Thomson (Lord Kelvin) só conheceram algumas aplicações para a refrigeração e geração de electricidade em meados do século XX através da evolução e chegada de novos materiais semicondutores. [11] No entanto, o seu reduzido COP limitou bastante o seu desenvolvimento. [12] Nas últimas décadas, com a crise do petróleo e com as crescentes preocupações ambientais, surgiu um novo interesse por fontes de energia mais “amigas do ambiente”, acompanhada por um renovado interesse pelos sistemas termoelétricos, tanto para geração de electricidade, como para refrigeração.

Relativamente ao arrefecimento termoelétrico, este alcançava sucesso nos frigoríficos termoelétricos, em sistemas de ar condicionado e em numerosas aplicações onde a possibilidade de variar a capacidade de refrigeração do dispositivo, para coincidir com a aplicação específica, provou ser um factor importante, [13]. No que se refere ao arrefecimento termoelétrico em larga escala, este dificilmente conseguirá igualar os clássicos sistemas de refrigeração, com COP elevado, apesar de em algumas aplicações o facto de serem sistemas modulares e fiáveis pode ter algumas vantagens, [14].

Assim, estes sistemas possuem diversas vantagens únicas que os distinguem das restantes tecnologias, contudo têm também desvantagens que inibem a sua utilização em áreas importantes. As grandes vantagens destes sistemas são o facto de não possuírem qualquer parte móvel, tornando assim os sistemas bastante fiáveis com cerca de 100.000 horas de utilização em regime estacionário e a sua flexibilidade pois, apesar do seu COP máximo ser atingido apenas para uma carga específica, o COP não sofre quedas bruscas se as condições de carga variarem. Para além destas, os sistemas de refrigeração termoelétricos não necessitam de qualquer fluído de trabalho não requerendo assim manutenção periódica, invertendo o sentido da corrente podem funcionar como aquecedor, permitem um controlo de temperatura preciso, podem funcionar em ambientes bastante severos ou em espaços demasiado pequenos onde os sistemas convencionais não podem ser utilizados e podem ser usados em qualquer posição, [11], [12].

O facto de possuírem um COP bastante reduzido, na ordem de 0,4 e sempre inferior à unidade, afigura-se como uma das principais desvantagens quando comparados com sistemas convencionais de compressão de vapor. Normalmente estão limitados na sua capacidade de extracção de calor, especialmente módulos que tenham como objectivo o arrefecimento Ar-Ar, pois a capacidade de extracção de calor está limitada pelo dissipador, geralmente um dissipador de alhetas. O custo elevado é também um entrave nestes sistemas, especialmente se as potências requeridas forem elevadas.

Os sistemas termoelétricos têm um vasto campo de aplicações. Assim, estes sistemas são usados para refrigeração e geração de energia nas mais diversas áreas, desde aplicações militares e aeroespaciais, até frigoríficos domésticos e portáteis. São usados ainda para arrefecimento de componentes electrónicos e como controladores de temperatura, particularmente em instrumentação científica. Aplicações a nível de ar condicionado e refrigeração portátil têm ainda a vantagem de poderem ser alimentados directamente por energia eléctrica produzida em sistemas fotovoltaicos, tornando assim este sistema “amigo do ambiente”, tal como já foi referido, [11], [12].

De seguida, será analisado o sistema de refrigeração termoelétrico.

2.1.1. Sistema de refrigeração termoelétrico

Um sistema de refrigeração termoelétrico é frequentemente comparado com os convencionais sistemas de refrigeração. Os sistemas convencionais contêm três componentes fundamentais – um evaporador, um compressor e um condensador. O evaporador ou secção fria é o local onde o refrigerante pressurizado expande ou evapora e é durante esta mudança de fase que calor é absorvido do local a refrigerar. No compressor, o refrigerante vindo do evaporador é comprimido passando do estado gasoso a líquido, seguindo para o condensador. Chegado ao condensador, o calor absorvido no evaporador, a par do calor produzido durante a compressão, são rejeitados para o ambiente. Um sistema termoelétrico possuiu componentes análogos. Na junção fria, energia sob a forma de calor é absorvida por electrões após a passagem dos mesmos, de um nível de energia baixo num elemento semiconductor do tipo p, para um nível de energia superior num elemento semiconductor do tipo n. Uma fonte de energia fornece a energia necessária para que os electrões se possam movimentar dentro do sistema. Na junção quente o calor absorvido é rejeitado por um dissipador de calor, assim que os electrões passem de um nível de energia elevado no elemento do tipo n para um elemento do tipo p. Assim, podemos definir um sistema de refrigeração termoelétrico como sendo um sistema sólido, sem parte móveis e sem necessidade de utilizar nenhum fluido ou gás para refrigerar.

As leis termodinâmicas aplicadas aos sistemas convencionais de refrigeração por compressão de vapor, absorção ou qualquer outro dispositivo que envolva transferência de calor também se aplicam a um sistema de refrigeração termoelétrico, [15].

O arrefecimento termoelétrico é alcançado quando uma corrente eléctrica contínua passa através de um ou mais pares de materiais semicondutores do tipo n e do tipo p. Na Figura 2.1 é apresentado um diagrama representativo de um par de materiais semicondutores. No entanto um módulo termoelétrico pode conter entre um até várias centenas de pares de materiais semicondutores do tipo n e p, que são ligados electricamente em série e termicamente em paralelo.

No modo de refrigeração, a corrente contínua passa do material semiconductor do tipo n para o de tipo p. A temperatura T_C (temperatura do lado frio) na interligação do condutor desce e desta forma calor é absorvido do espaço a refrigerar. Esta absorção de calor (arrefecimento) ocorre quando os electrões passam de um nível de energia baixo no material do tipo p através da interligação do condutor para um nível de energia superior no material do tipo n. Posteriormente este calor absorvido é transferido através dos materiais semicondutores, por transporte de electrões, para o outro lado da junção a uma temperatura T_H (temperatura do

lado quente) e libertado com o regresso dos electrões para um nível de energia menor no material do tipo p. Este fenómeno é conhecido como efeito de Peltier.

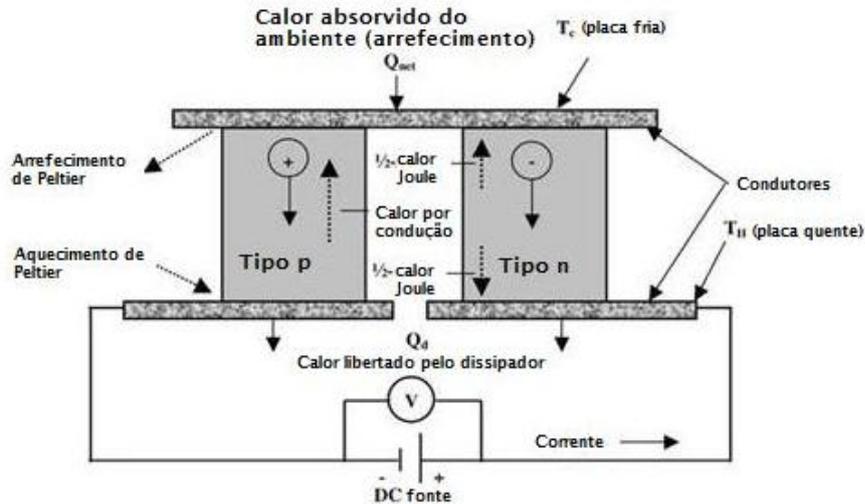


Figura 2.1. Módulo termoelétrico em modo de refrigeração [12]

Outro fenómeno muito importante no arrefecimento termoelétrico é o efeito de Seebeck. Quando um diferencial de temperaturas é estabelecido entre o lado quente e frio de dois materiais semicondutores diferentes, uma força electromotriz é gerada. Esta força electromotriz gerada é conhecida como tensão de Seebeck e é directamente proporcional ao diferencial de temperaturas. A constante de proporcionalidade é conhecida como o coeficiente de Seebeck.

O efeito de Peltier é controlado pelo coeficiente de Peltier, definido como o produto do coeficiente de Seebeck do material semicondutor pela temperatura absoluta. O coeficiente de Peltier refere-se ao efeito de arrefecimento quando a corrente passa do material do tipo n para o material do tipo p, e ao efeito de aquecimento quando a corrente passa do material do tipo p para o material do tipo n. Invertendo o sentido da corrente, as temperaturas do lado quente e frio também invertem passando assim a funcionar como um aquecedor, tal como mostrado na Figura 2.2.

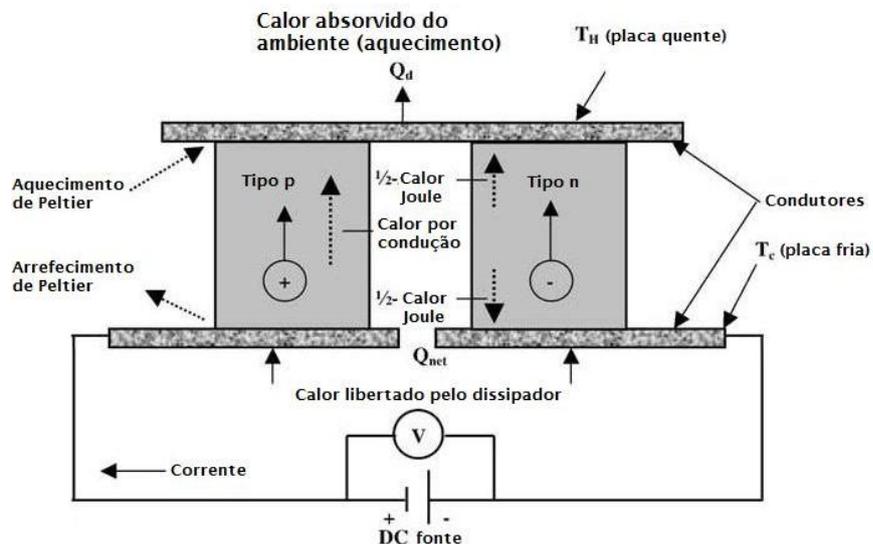


Figura 2.2. Módulo termoelétrico em modo de aquecimento [12]

Idealmente, a quantidade de calor absorvido no lado frio e o calor dissipado no lado quente dependem do produto do coeficiente de Peltier e da corrente que flui através do material semiconductor. Na prática, isto não acontece porque o valor líquido de calor absorvido no lado frio, devido ao efeito de Peltier, é reduzido devido a dois efeitos: o de condução e o de Joule. Devido à diferença de temperaturas entre o lado quente e frio do material semiconductor, calor será conduzido através do material semiconductor do lado quente para o lado frio. À medida que a corrente aumenta, a diferença de temperaturas e o calor por condução também aumentam, pois o efeito de arrefecimento de Peltier aumenta. Por outro lado, as perdas de calor por condução são proporcionais ao quadrado da corrente e por isso poderão ser um factor dominante nas perdas. Para qualquer corrente fornecida, o equilíbrio térmico é estabelecido no lado frio, quando o efeito de Peltier nesse mesmo lado for igual à soma do calor por condução mais metade do calor, devido ao efeito de Joule. A outra metade do calor perdido por efeito de Joule vai para o lado quente.

O COP usado para definir a “eficiência” de refrigeração é o quociente entre o calor absorvido no lado frio e a potência eléctrica aplicada ao sistema. As propriedades dos materiais semicondutores – resistividade eléctrica, condutividade térmica e o coeficiente de Seebeck, que definem a máxima capacidade de refrigeração, dependem da temperatura. Para qualquer material semiconductor, existe uma gama de temperaturas para a qual este mesmo material atinge a sua melhor performance. Os materiais termoelétricos mais usados para a refrigeração na gama de temperaturas de -120 a 230°C é o telureto de bismuto (BiSb_2).

Módulos termoelétricos

Um módulo termoelétrico normalmente é constituído por mais do que um par de semicondutores. Dentro de um módulo, cada semiconductor é chamado de elemento e cada par de elementos é chamado de termopar. Usualmente, os módulos termoelétricos são classificados de sistemas simples (uma única etapa) ou em cascata (várias etapas) como podemos ver na Figura 2.3.

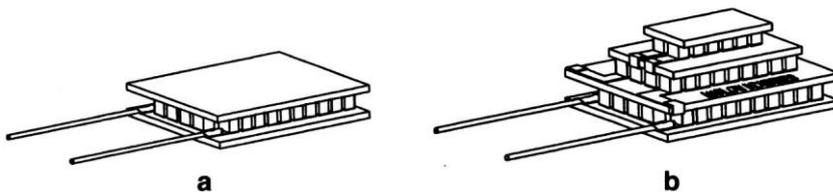


Figura 2.3. Design típico de um módulo termoelétrico, de uma etapa (a) e em cascata (b) [11]

Um módulo de uma só etapa, tal como representa a Figura acima 2.3 (a), é constituído por diversos termopares que estão ligados termicamente em paralelo e electricamente em série, de modo a aumentar a tensão no módulo. Estes termopares estão interligados com bons condutores eléctricos, tais como o cobre. Os condutores devem ser bem isolados electricamente da superfície a ser arrefecida, caso contrário o módulo poderá sofrer um curto-circuito. No entanto, o material isolante deve ser um bom condutor térmico, de modo a minimizar a diferença de temperatura entre o condutor e a superfície a ser arrefecida. Na figura acima apresentada, o módulo possui duas placas cerâmicas que isolam as suas superfícies, sendo que tipicamente o material utilizado é a Alumina, pois proporciona um isolamento eléctrico e condutância térmica que satisfazem os requisitos.

Os tamanhos dos módulos termoelétricos variam consoante o número de termopares incluídos nos mesmos. Módulos com apenas um termopar podem ter tamanhos da ordem de $1,5 \text{ mm}^2$, enquanto um módulo constituído por vários termopares podem chegar a 51 mm^2 . O limite em termos de produção de módulos de pequena dimensão está relacionado com problemas mecânicos e de montagens dos mesmos.

Um factor que limita a utilização destes módulos está relacionado com a figura de mérito. Independentemente da potência eléctrica fornecida ao módulo, a diferença de temperaturas máxima estará sempre limitada pela figura de mérito, por isso caso seja necessária uma diferença de temperaturas maior, a solução poderá passar pela utilização de outro tipo de materiais ou por sistemas em cascata.

Módulos em cascata

Os módulos em cascata são usados essencialmente quando se pretende obter diferenciais de temperaturas bastante elevadas, que os módulos de uma só etapa não são capazes de alcançar. Módulos em cascata ou multi-etapas, como o representado na Figura 2.3 (b), são basicamente módulos de uma só etapa empilhados numa matriz vertical. Estão normalmente dispostos em pirâmide, pois os módulos inferiores têm que ter capacidade para libertar o calor dissipado pelos módulos imediatamente acima. Quantas mais etapas tiverem os módulos, temperaturas mais baixas são alcançadas. Tipicamente o limite de etapas para um módulo em cascata é de oito a dez etapas. Na Figura 2.4 podemos observar a evolução das temperaturas com o aumento do número de etapas presentes num módulo termoelétrico em cascata, verificando que se podem atingir temperaturas na ordem dos -140°C , [11].

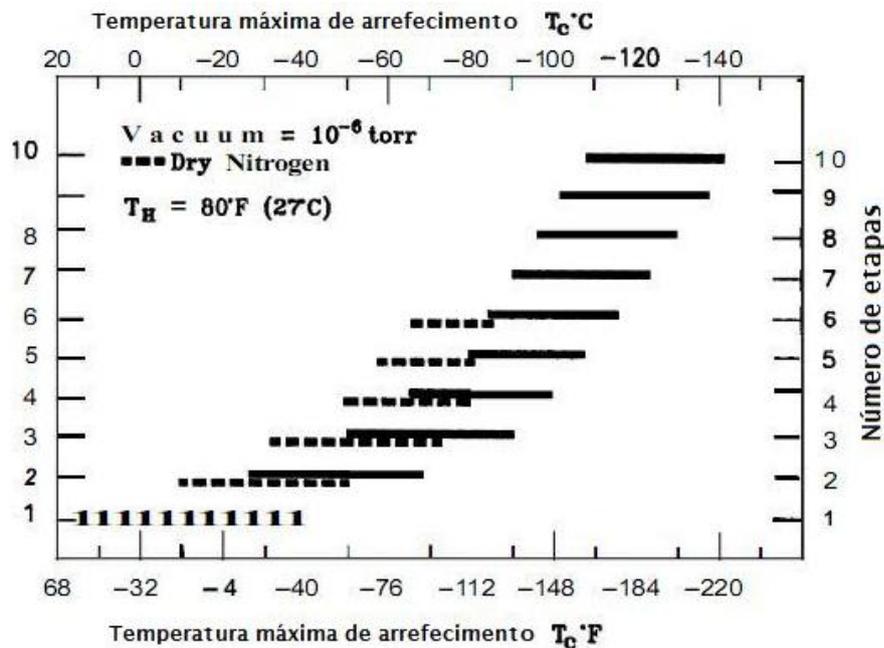


Figura 2.4. Gama de temperaturas de utilização dos módulos termoelétricos [11]

2.1.2. Fenómenos termoelétricos

Os fenómenos termoelétricos são conhecidos desde o século XIX e são a base dos sistemas termoelétricos.

Efeito de Seebeck

O primeiro fenómeno termoelétrico conhecido é o de Seebeck. Em 1821, o físico estoniano Thomas Johann Seebeck constatou existir uma diferença de voltagem entre os dois extremos de um circuito fechado formado por dois materiais condutores, quando as junções entre eles estivessem sujeitas a um gradiente de temperaturas. Assim, o efeito de Seebeck trata da conversão directa de diferenciais de calor em electricidade. Uma das maiores aplicações deste fenómeno é o termopar que é actualmente bastante usado para medição e/ou controlo de temperatura.

Quando a junção entre dois metais ou semicondutores diferentes A e B estão sujeitas a uma diferença de temperaturas, é criada uma força electromotriz termoelétrica, V . Esta voltagem é conhecida como tensão de Seebeck e é directamente proporcional ao diferencial de temperaturas. Um esquema demonstrativo deste efeito é apresentado na Figura 2.5.

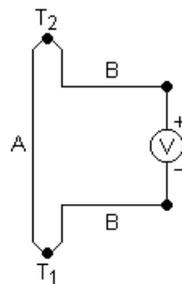


Figura 2.5. Efeito de Seebeck [16]

Esta tensão pode ser obtida pela seguinte equação:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} [\alpha_B(T) - \alpha_A(T)] dT \quad (2.1)$$

Onde α_A e α_B são os coeficientes de Seebeck, também designados por potência termoelétrica, dos materiais A e B respectivamente, e T_1 e T_2 as temperaturas das junções. Estes coeficientes não são lineares e dependem da temperatura absoluta, material e estrutura molecular do condutor. No entanto podem ser considerados constantes numa determinada gama de temperaturas de utilização, levando assim a que a equação acima apresentada se simplifique:

$$V = (\alpha_B - \alpha_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

Um termopar permite assim determinar a diferença de temperatura entre as duas junções, medindo-se a diferença de potencial gerada pelo efeito de Seebeck. Se essa diferença for pequena, de tal modo que,

$$T_2 = T_1 + \Delta T \quad (2.3)$$

E se nos terminais for verificada uma diferença de potencial ΔV , então a potência termoelétrica do conjunto pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{AB} = \alpha_B - \alpha_A = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.4)$$

A equação anterior pode ainda ser escrita em relação ao campo elétrico, E , e ao gradiente de temperatura, ∇T :

$$\alpha = \frac{E}{|\nabla T|} \quad (2.5)$$

Se existir um diferencial de temperaturas nas junções, uma corrente elétrica será gerada devido ao efeito de Seebeck, o que terá como consequência uma geração de calor irreversível nos condutores devido ao efeito de Joule, que pode ser expresso da seguinte forma, [10]:

$$Q_j = I^2 \cdot R \quad (2.6)$$

Outro efeito far-se-á sentir de forma irreversível devido à diferença de temperaturas entre as junções. Calor fluirá por condução da junção a alta temperatura para a mais baixa temperatura. Este efeito irreversível é o efeito de condução e é expresso pela seguinte equação:

$$Q_{\text{Condução}} = U \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.7)$$

Efeito de Peltier

Alguns anos após ser conhecido o efeito de Seebeck, outro novo efeito termoelétrico foi descoberto. Desta vez foi o francês Jean Peltier que em 1834, constatou a existência de uma diferença de temperaturas entre as junções de um circuito fechado constituído por dois condutores diferentes, sempre que fosse atravessado por uma corrente elétrica. Este efeito é o processo inverso do efeito de Seebeck e é conhecido como o efeito de Peltier. Este efeito ocorre aquando da passagem de uma corrente elétrica através de dois metais ou condutores diferentes, um de tipo-n (que apresenta um excesso de electrões) e outro de tipo-p (que apresenta um défice de electrões) que se encontram ligados em duas junções. Esta corrente é a força motriz para a transferência de calor entre junções, o que faz com que uma arrefeça e a outra aqueça. Isto permite que este efeito seja utilizado para o arrefecimento termoelétrico. A direcção do fluxo de calor é controlada pela polaridade da corrente elétrica. Se esta for trocada, as temperaturas das junções serão igualmente alteradas, [10].

O efeito de Peltier é controlado pelo coeficiente de Peltier, definido como o produto do coeficiente de Seebeck do material semiconductor e a temperatura. O coeficiente de Peltier relaciona-se com um efeito de arrefecimento, quando a corrente passa do material do tipo-n para o material do tipo-p e com um efeito de aquecimento, quando a corrente passa do material do tipo-p para o de tipo-n. Este coeficiente representa a variação do calor reversível na junção do condutor, quando é atravessado por uma unidade de corrente numa unidade de tempo, [11].

Pode então ser definido pela seguinte equação:

$$\Phi_i = \alpha_i \cdot T \quad (2.8)$$

Provou-se experimentalmente que a transferência de calor em cada junção é proporcional à intensidade da corrente eléctrica:

$$Q = \Phi_{AB} \cdot I = (\Phi_B - \Phi_A) \cdot I \quad (2.9)$$

De modo geral, os condutores do tipo p possuem coeficientes de Peltier positivo e os condutores do tipo n negativos.

Efeito de Thomson

Posteriormente, e através de análises termodinâmicas, William Thomson (Lord Kelvin) provou que os efeitos de Seebeck e Peltier estavam relacionados entre si. Descobriu ainda um terceiro fenómeno termoelétrico que passou a ser conhecido como o efeito de Thomson. Este efeito consiste no seguinte: sempre que uma corrente eléctrica passa num condutor em que exista um gradiente de temperatura uniforme, verifica-se uma absorção ou emissão de calor, dependendo esta do tipo de material, [10].

O efeito de Thomson é a variação de calor reversível dentro de cada condutor homogéneo que está sujeito a um gradiente de temperaturas e é atravessado por unidade de corrente. Thomson apelidou o efeito de “calor específico de electricidade”. Este efeito não é uma tensão, no entanto, como o efeito de Peltier, pode ser expresso em unidades de energia envolvendo Volts. O efeito de Thomson é uma manifestação da direcção do fluxo de transportadores eléctricos, tendo em conta um gradiente de temperaturas no condutor. Estes absorvem calor quando fluem na direcção oposta ao gradiente térmico, aumentando a sua energia potencial e, quando fluem na mesma direcção do gradiente, libertam calor, diminuindo a sua energia potencial.

O coeficiente de Thomson é a variação do calor reversível dentro de um condutor por unidade de gradiente de temperatura e por unidade de corrente, [11]. Verificou-se experimentalmente que o calor de Thomson por unidade de comprimento, Q_τ , pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$Q_\tau = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dX} \quad (2.10)$$

O efeito de Thomson pode ser positivo, negativo ou nulo, dependendo do material. Assim, o efeito é positivo no caso de materiais como zinco ou cobre, negativo para cobalto, níquel e ferro e nulo caso o material seja chumbo, [10].

2.1.3. Relações termodinâmicas

As relações termodinâmicas entre os efeitos termoelétricos são importantes para uma melhor compreensão dos fenómenos. A termodinâmica relaciona os efeitos termoelétricos, enquanto a mecânica quântica explica os mecanismos envolvidos.

A análise apresentada será essencialmente a de Thomson [17], [18] embora análises mais rigorosas tenham sido realizadas por Benedict [19] e Callen, [20], [21].

Um circuito termoeléctrico pode ser aproximado como uma bomba de calor reversível no seu funcionamento e pode ser tratado como tal. Neste caso, as perdas térmicas devido ao efeito de Joule podem ser desprezadas pois o seu valor e efeito são pequenos. Nos circuitos termoeléctricos fechados a corrente apresenta valores muito baixos. A resistividade eléctrica dos termoelementos normalmente é minimizada para obter uma sensibilidade máxima, por isso a potência dissipada por efeito de Joule (I^2R) é completamente desprezável.

Quando dois materiais condutores diferentes A e B se unem e constituem um circuito fechado, no qual a junção fria está a temperatura T e a junção quente está a temperatura $T+\Delta T$ e ambas são mantidas à mesma temperatura por dois reservatórios de calor, Figura 2.6, a força electromotriz relativa ao efeito de Seebeck gerada pelo diferencial de temperaturas é E_{AB} . A potência relativa ao efeito de Seebeck pode ser obtida a partir de $\frac{dE_{AB}}{dT}$, sendo que a força electromotriz pode ser expressa da seguinte forma:

$$I \cdot E_{AB} = I \cdot \frac{dE_{AB}}{dT} \Delta T \quad (2.11)$$

Tendo em conta uma unidade de corrente a fluir no circuito,

$$E_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} \Delta T \quad (2.12)$$

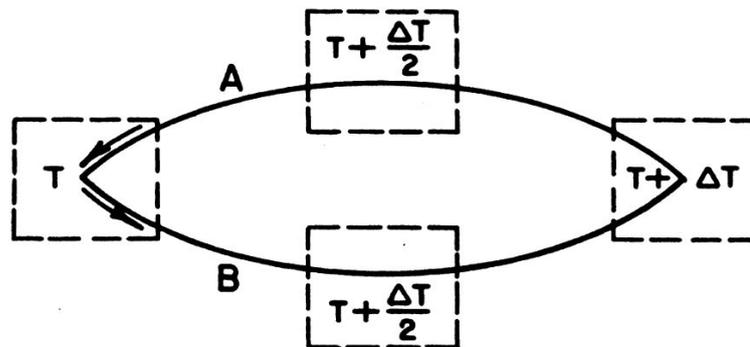


Figura 2.6. Circuito termoeléctrico fechado usado para a análise dos fenómenos termoeléctricos [22]

Os outros factores energéticos envolvidos nos circuitos termoeléctricos fechados são o efeito de Peltier, nas junções dos condutores, e o efeito de Thomson, no interior dos condutores. Estas energias térmicas são expressas da seguinte forma: calor absorvido na junção quente ($\Phi_{AB}(T+\Delta T)$) e calor libertado na junção fria ($-\Phi_{AB}(T)$) são relativos ao efeito de Peltier e calor absorvido no condutor B ($\tau_B(\Delta T)$) e calor libertado no condutor A ($-\tau_A(\Delta T)$) em relação ao efeito de Thomson. Φ e τ referem-se aos coeficientes de Peltier e de Thomson respectivamente.

Como exposto anteriormente, um circuito termoeléctrico pode ser aproximado a uma bomba de calor reversível, podendo desta forma a energia eléctrica e a energia térmica podem ser equacionadas, sendo que para uma unidade de corrente no circuito. Ambas expressam-se da seguinte forma:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} \cdot \Delta T = \Phi_{AB(T+\Delta T)} - \Phi_{AB(T)} + (\tau_B - \tau_A) * \Delta T \quad (2.13)$$

Podemos ainda dividir a equação anterior por ΔT , obtendo assim:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \frac{\Phi_{AB(T+\Delta T)} - \Phi_{AB(T)}}{\Delta T} + (\tau_B - \tau_A) \quad (2.14)$$

O membro da direita da equação representa a condição na qual quando ΔT tende para zero, a taxa instantânea da variação do efeito de Peltier no que à temperatura diz respeito. Assim, a equação 2.14 pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \frac{\Phi_{AB}}{dT} + (\tau_B - \tau_A) \quad (2.15)$$

Este é o teorema termodinâmico fundamental para circuitos termoelétricos fechados, que nos mostra a relação energética entre o efeito eléctrico de Seebeck e os efeitos térmicos de Peltier e de Thomson. Os componentes apresentados na equação anterior 2.15 representam os diferentes fenómenos térmicos que são induzidos pela força electromotriz relativa ao efeito de Seebeck, que unicamente aparecem devido ao gradiente de temperaturas nos condutores A e B. Os efeitos de Peltier e de Thomson podem ser expressos em unidades de energia envolvendo Volts, mas são puramente fenómenos térmicos.

A equação 2.15 só é aplicável a circuitos fechados quando não existe qualquer fonte eléctrica externa.

Em circuitos termoelétricos abertos, as trocas de calor relativas aos efeitos de Peltier e de Thomson são nulas, enquanto a potência devido ao efeito de Seebeck é diferente de zero. Isto acontece pois a corrente é nula, enquanto os coeficientes mantêm-se inalterados. Deste modo, quando não existe corrente no circuito, a equação 2.15 não se mantém igual. Isto demonstra claramente que a força electromotriz relativa ao efeito de Seebeck não deve ser considerada a consequência física dos efeitos de Peltier e de Thomson.

O efeito de Seebeck é a força motriz para as correntes que dão origem aos efeitos térmicos de Peltier e de Thomson em circuitos fechados. A aproximação praticada, tratando os circuitos termoelétricos como sendo termodinamicamente reversíveis, simplifica bastante a análise das suas relações. Por isso a variação da entropia na vizinhança de um circuito termoelétrico fechado pode ser considerada igual a zero. Embora não seja muito preciso, simplifica bastante a análise ao problema e proporciona resultados que estão de acordo com as descobertas experimentais, [18]. Isto facilita a análise das propriedades termodinâmica dos circuitos termoelétricos, baseados nas variações de entropia na sua vizinhança representada por reservatórios térmicos, que será feita na próxima análise.

Dois reservatórios adicionais são colocados em pontos intermédios nos condutores A e B, como apresentado na figura 2.6. Os reservatórios são mantidos a uma temperatura média entre as junções quente e fria fornecendo, assim, um meio para avaliar a variação média da entropia de cada termoelemento do circuito.

Uma unidade de energia eléctrica é forçada a fluir no circuito. A aproximação de reversibilidade permite a assumção de que a variação da entropia, ΔS , de todos os reservatórios (nas junções e ao longo dos condutores) é zero. Isto faz com que na vizinhança de um circuito termoelétrico, a variação da entropia seja dada por:

$$\Delta S \cong \frac{-\Phi_{AB}(T + \Delta T)}{T + \Delta T} + \frac{\Phi_{AB}(T)}{T} - \frac{\tau_B(\Delta T)}{T + \frac{\Delta T}{2}} + \frac{\tau_A(\Delta T)}{T + \frac{\Delta T}{2}} = 0 \quad (2.16)$$

Multiplicando os dois primeiros termos do segundo membro da equação por $\Delta T/\Delta T$, teremos a variação de entropia dada por:

$$\Delta S \cong \left[\frac{-\Phi_{AB}(T + \Delta T) + \Phi_{AB}(T)}{\Delta T} \right] \cdot \Delta T - \frac{\tau_B(\Delta T)}{T + \frac{\Delta T}{2}} + \frac{\tau_A(\Delta T)}{T + \frac{\Delta T}{2}} = 0 \quad (2.17)$$

No limite, quando ΔT tende para zero, o quociente da diferença dentro de parênteses é $-\frac{d}{dT} * \left(\frac{\Phi_{AB}}{T}\right)$. Substituindo na equação anterior obtemos:

$$\Delta S \cong -\frac{d}{dT} \left(\frac{\Phi_{AB}}{T}\right) \cdot \Delta T - \frac{\tau_B(\Delta T)}{T + \frac{\Delta T}{2}} + \frac{\tau_A(\Delta T)}{T + \frac{\Delta T}{2}} = 0 \quad (2.18)$$

De forma a facilitar a expressão 2.18, usa-se a definição do coeficiente de Thomson, $\Delta T=1K$ e, considerando que T é muito maior que $1K$ e que $T+\Delta T=T$ e $T+\Delta T/2=T$, obtemos:

$$\frac{d}{dT} \left(\frac{\Phi_{AB}}{T}\right) \cong \frac{\tau_A}{T} - \frac{\tau_B}{T} \quad (2.19)$$

A derivada anterior reduz a equação a:

$$\frac{T \cdot \frac{d\Phi_{AB}}{dT} - \Phi_{AB}}{T^2} \cong \frac{\tau_A}{T} - \frac{\tau_B}{T} \quad (2.20)$$

Abreviando a equação 2.20 e reorganizando, obtém-se:

$$\frac{\Phi_{AB}}{T} \cong \frac{d\Phi_{AB}}{dT} + \tau_B - \tau_A \quad (2.21)$$

A equação acima apresentada, representa a variação da entropia numa junção termoelétrica num circuito fechado, onde Φ_{AB} é a variação do calor contido numa junção que, dividida pela temperatura absoluta, resulta na variação de entropia da junção para uma determinada temperatura.

A relação presente na equação 2.21 entre os coeficientes de Peltier e de Thomson tem particular interesse para a selecção de materiais para dispositivos de Peltier. Rescrevendo, tem-se:

$$-\frac{\Phi_{AB}}{T} \cong -\frac{d\Phi_{AB}}{dT} + (\tau_B - \tau_A) \quad (2.22)$$

Caso o efeito de Peltier seja máximo, $\frac{d\Phi_{AB}}{dT}=0$. Então tem-se que:

$$\Phi_{AB} \cong (\tau_B - \tau_A) \cdot T \quad (2.23)$$

Caso exista informação para os coeficientes de Thomson, a melhor combinação de termoelementos pode ser escolhida através de cálculos simples. A equação 2.15, onde figura o teorema fundamental da termodinâmica, foi usada na equação 2.21 para a se chegar à seguinte relação:

$$\frac{\Phi_{AB}}{T} \cong \frac{dE_{AB}}{dT} \quad (2.24)$$

A relação 2.24 representa a tensão medida por um termopar. É em circuitos fechados a medida directa da variação da entropia numa junção termoelétrica e pode ser apresentada como,

$$\Phi_{AB} \cong \frac{dE_{AB}}{dT} \cdot T \quad (2.25)$$

Esta equação é útil para uma melhor percepção do modo de funcionamento dos dispositivos de Peltier e mostra-nos a razão pela qual uma boa escolha e combinação de termoelementos com efeitos de Peltier elevados, deve ser usada para geração de energia eléctrica e para a refrigeração. A eficiência em qualquer dos casos continua a ser é baixa.

Outra relação importante entre o efeito de Seebeck e o de Thomson é obtida derivando a equação 2.25:

$$\frac{d\Phi_{AB}}{dT} \cong \frac{dE_{AB}}{dT} + T \cdot \frac{d^2E_{AB}}{dT^2} \quad (2.26)$$

Reescrevendo a equação anterior, temos:

$$\frac{d\Phi_{AB}}{dT} - \frac{dE_{AB}}{dT} \cong T \cdot \frac{d^2E_{AB}}{dT^2} \quad (2.27)$$

Tendo em consideração a equação 2.15, obtém-se uma expressão idêntica:

$$\frac{d\Phi_{AB}}{dT} - \frac{dE_{AB}}{dT} \cong -(\tau_B - \tau_A) \quad (2.28)$$

Igualando as expressões 2.27 e 2.28, obtém-se:

$$T \cdot \frac{d^2E_{AB}}{dT^2} \cong -(\tau_B - \tau_A) \quad (2.29)$$

Reescrevendo 2.29, obtém-se:

$$\frac{d^2 E_{AB}}{dT^2} \cong \frac{\tau_A - \tau_B}{T} \quad (2.30)$$

A integração da equação anterior fornece a relação procurada na forma:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} \cong \int_0^T \frac{\tau_A - \tau_B}{T} dT \cong \int_0^T \frac{\tau_A}{T} dT - \int_0^T \frac{\tau_B}{T} dT \quad (2.31)$$

Dado que o quociente $\frac{\tau_i}{T}$ representa a entropia, a expressão 2.31 só é possível integrar pois, conforme a terceira lei da termodinâmica, a entropia tende para zero quando a temperatura também se aproximar de zero.

Assim sendo, num circuito fechado simples, a energia termoelétrica de um termopar é responsável pela diferença das entropias de cada componente que o compõem. As restrições presentes na equação 2.15 também se aplicam à equação 2.31. O efeito de Seebeck pode não ser descrito pela diferença algébrica dos efeitos de Thomson.

O uso da equação 2.31 na equação 2.25 leva-nos a outra importante relação entre os coeficientes de Thomson e de Peltier. Para circuitos termoelétricos fechados:

$$\Phi_{AB} \cong \frac{dE_{AB}}{dT} \cdot T \cong \left(\int_0^T \frac{\tau_A}{T} dT - \int_0^T \frac{\tau_B}{T} dT \right) * T \quad (2.32)$$

Simplificando, temos:

$$\Phi_{AB} \cong \Phi_A - \Phi_B \quad (2.33)$$

Assim sendo, os integrais presentes na equação 2.31 são entropias e Φ_A e Φ_B são as entropias de cada componente que formam a junção termoelétrica. Deste modo, o efeito de Peltier surge como o resultado da diferença de entropia dos componentes de uma junção. Calor é libertado quando os transportadores de carga fluem de um componente de elevada entropia para um de baixa entropia, caso contrário, calor é absorvido.

A expressão 2.33 serve como suporte para afirmarmos que o efeito de Peltier não tem qualquer relação com o potencial de contacto. Por outro lado, num circuito fechado, o coeficiente relativo de Seebeck de um termopar é dado pela diferença de entropias de cada componente, como demonstra a equação 2.31. Isto é a base da termodinâmica para o conceito nos termos das energias envolvidas. A tensão de um termopar é a soma algébrica dos coeficientes de Seebeck de cada termoelemento. Verifica-se que a equação 2.31, no caso de circuitos abertos, não é válida pois não existe transferência de calor devido ao efeito de Thomson e para o mesmo caso o coeficiente de Seebeck é diferente de zero.

O coeficiente relativo de Seebeck somente é independente do efeito de Thomson porque existe uma diferença de potencial em cada termoelemento que compõe o termopar, devido à existência de um gradiente de temperaturas num circuito aberto. De forma análoga à equação 2.31, a tensão num circuito aberto é dada por,

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A - \alpha_B \quad (2.34)$$

Sabendo que,

$$\Phi_{AB} \cong \frac{dE_{AB}}{dT} * T \cong (\alpha_A - \alpha_B) \cdot T \quad (2.35)$$

Após substituição, temos:

$$\frac{\tau_A - \tau_B}{T} = \frac{d(\alpha_A - \alpha_B)}{dT} \quad (2.36)$$

α_A e α_B representam os coeficientes absolutos de Seebeck de cada componente. A equação 2.34 afigura-se importante, pois permite o estudo e evolução das propriedades de termoelementos individuais, sem ter necessidade de recorrer a outros termoelementos, [11].

2.1.4. Potência de arrefecimento

Como demonstrado previamente, o efeito de Peltier pode ser usado para refrigeração. A sua utilização está fortemente dependente da escolha dos materiais condutores, p e n, de tal modo que p tenha uma potência termoelétrica positiva, α_p e que n tenha uma potência termoelétrica negativa, α_n , como representado na Figura 2.7.

Assim, a junção fria está ligada a uma placa metálica que está exposta a uma substância ou espaço a refrigerar. Por outro lado, a junção quente está ligada a uma superfície que permite a rejeição de calor ao meio ambiente. O circuito é alimentado por uma corrente contínua proveniente de uma bateria. A junção fria, a junção quente e a bateria podem ser comparadas respectivamente ao evaporador, condensador e compressor de um sistema de compressão de vapor.



Figura 2.7. Módulo termoelétrico [15]

Quando uma corrente eléctrica passa através de um circuito, todos os efeitos termoelétricos fazem-se sentir. Devido ao efeito de Peltier, a placa fria arrefecerá, enquanto a quente aquecerá. As equações de balanço energético podem ser expressas da seguinte forma:

$$q_p = \alpha_p \cdot I \cdot T - \lambda_p \cdot A_p \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.37)$$

$$q_n = -\alpha_n \cdot I \cdot T - \lambda_n \cdot A_n \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.38)$$

Onde, $\alpha_p \cdot I \cdot T$ representa o Efeito de Peltier.

Por condução, calor fluirá da placa quente para a fria. Devido ao efeito de Joule, será gerado calor em cada condutor que posteriormente fluirá para cada uma das junções, sendo que este calor pode ser expresso pelas seguintes equações:

$$-\lambda_p \cdot A_p \cdot \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \cdot \rho_p}{A_p} \quad (2.39)$$

$$-\lambda_n \cdot A_n \cdot \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \cdot \rho_n}{A_n} \quad (2.40)$$

O efeito de Thomson também se fará sentir, no entanto, num caso real é necessário assumir valores médios da potência termoelétrica ($\alpha_p - \alpha_n$), sendo que o coeficiente médio de Thomson será nulo se a diferença de potência termoelétrica for constante.

Resolvendo e combinado as duas equações anteriores verifica-se que:

$$q_1 = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot T_1 - U \cdot (T_2 - T_1) - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R \quad (2.41)$$

$$q_2 = -(\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot T_2 - U \cdot (T_2 - T_1) - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R \quad (2.42)$$

Observando o primeiro termo da equação 2.41, verifica-se que o termo relativo ao arrefecimento de Peltier varia linearmente com a intensidade de corrente e como é evidente o termo de aquecimento de Joule varia com o quadrado da corrente. Quer isto dizer que existe um valor óptimo da intensidade de corrente que maximiza a potência de arrefecimento. Derivando a equação 2.41 em ordem a I e igualando a zero temos:

$$I_q = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_1}{R} \quad (2.43)$$

A potência de arrefecimento máxima será então dada por:

$$(q_1)_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_1^2}{2R} - U \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.44)$$

Verifica-se então, que a potência de arrefecimento máxima não é alcançada para diferenças de temperatura elevadas. O valor óptimo de $(T_2 - T_1)$ é alcançado quando $(q_1)_{max} = 0$. Igualando a potência máxima a zero, obtemos:

$$(T_2 - T_1)_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_1^2}{2 \cdot U \cdot R} \quad (2.45)$$

2.1.5. COP

A performance de qualquer máquina frigorífica é normalmente definida através de um COP, definido como o quociente entre o calor absorvido no lado frio, q_1 , e a potência eléctrica fornecida, W . A potência a fornecer pela bateria terá que ser suficiente para compensar as perdas devidas ao efeito de Joule e interagir com a potência pelo efeito de Seebeck. Assim a potencia eléctrica será dada por:

$$W = (\alpha_p - \alpha_N) \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R \quad (2.46)$$

Podemos definir o COP, como:

$$COP = \frac{q}{W} = \frac{(\alpha_p - \alpha_N) \cdot I \cdot T_1 - U(T_2 - T_1) - \frac{I^2 \cdot R}{2}}{(\alpha_p - \alpha_N) \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R} \quad (2.47)$$

Num caso completamente reversível, ou seja, ausência dos efeitos de Joule e de condução o COP tomaria a seguinte forma:

$$COP = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.48)$$

Este valor particular representa o COP de uma máquina de Carnot.

O valor do COP pode ainda ser maximizado bastando, para isso, encontrar o valor óptimo da intensidade de corrente. Para tal, a equação 2.47 é derivada em relação à corrente e igualada a zero. O valor óptimo é dado pela seguinte expressão:

$$I_{opt} = \frac{(\alpha_p - \alpha_N) \cdot (T_2 - T_1)}{R[(1 + Z \cdot T_m)^{1/2} - 1]} \quad (2.49)$$

Onde Z representa a figura de mérito e é função dos materiais usados no sistema e T_m a temperatura média $\frac{(T_2 + T_1)}{2}$.

Posto isto, o correspondente COP_{MAX} é :

$$COP_{MAX} = \frac{\left[\left(\frac{T_1}{T_2 - T_1} \right) \cdot \left(\sqrt{1 + Z \cdot T_m} - \frac{T_2}{T_1} \right) \right]}{\sqrt{1 + Z \cdot T_m} + 1} \quad (2.50)$$

2.1.6. Figura de mérito

A figura de mérito de um sistema definido por dois condutores, como por exemplo, um termopar, pode ser expressa da seguinte forma:

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_N)^2}{U \cdot R} \quad (2.51)$$

Atendendo à definição da figura de mérito, a equação 2.45 pode ser reescrita como sendo:

$$(T_2 - T_1)_{max} = \frac{1}{2} Z T_1^2 \quad (2.52)$$

As equações 2.50 e 2.52, definem o desempenho de um sistema de arrefecimento termoelétrico e são função da figura de mérito Z . A performance de um sistema termoelétrico pode então ser avaliada a partir da figura de mérito. Para um valor elevado de Z , a junção tem que possuir um valor elevado de potência termoelétrica, um pequeno valor de condução térmica e uma baixa resistência eléctrica.

A figura de mérito não é uma característica de um par de materiais mas, de um par em particular, desde que inclua termos relativos às dimensões dos condutores. Para um determinado par de materiais, o maior valor de Z é alcançado quando $U \cdot R$ é minimizado.

A resistência eléctrica R é constituída principalmente pelas resistências dos elementos e por uma resistência de contacto r [$\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$] em cada junção. Assim, considerando um comprimento L constante para cada um dos condutores, pode escrever-se para cada par, [10]:

$$U = U_p + U_n = k_p \cdot \frac{A_p}{L} + k_n \cdot \frac{A_n}{L} \quad (2.53)$$

$$R_T = R_p + R_n = \rho_p \cdot \frac{L}{A_p} + \frac{2 \cdot r}{A_p} + \rho_n \cdot \frac{L}{A_n} + \frac{2 \cdot r}{A_n} \quad (2.54)$$

Tem-se então que:

$$U \cdot R_T = (k_p \cdot y + k_n) \cdot \left[\frac{\rho_p}{y} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho_p \cdot L} \right) + \rho_n \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho_n \cdot L} \right) \right] \quad (2.55)$$

Em que: $y = \frac{A_p}{A_n}$

Assim Z , será máximo para um valor mínimo de $U \cdot R$. Para que este produto seja mínimo, é necessário que:

$$y = \sqrt{\frac{k_n \cdot \rho_p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho_p \cdot L} \right)}{k_p \cdot \rho_n \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho_n \cdot L} \right)}} \quad (2.56)$$

Atendendo às formulações acima apresentadas, o valor máximo de Z será dado por:

$$Z_{MAX} = \left[\frac{(\alpha_p - \alpha_n)}{\sqrt{k_p \cdot \rho_p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho_p \cdot L} \right)} + \sqrt{k_n \cdot \rho_n \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho_n \cdot L} \right)}} \right]^2 \quad (2.57)$$

No caso específico em que cada par tenha valores iguais de k e de α mas de sinais opostos, a equação resume-se a:

$$Z_{MAX} = \frac{\alpha^2}{k \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_T}{\rho \cdot L}\right)} = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{k \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{\rho \cdot L}\right)} \quad (2.58)$$

Em que: $\sigma = \frac{1}{\rho}$ é a condutividade eléctrica.

Assim, a capacidade de refrigeração de um material semiconductor está dependente do efeito combinado do seu coeficiente de Seebeck, resistividade eléctrica e condutividade térmica na gama de temperaturas, entre o lado quente e o lado frio. Os coeficientes de Seebeck e de Peltier devem possuir valores elevados e de sinais opostos nos dois materiais. Por outro lado, tanto a resistividade eléctrica como a condutividade térmica devem ser baixas para que, deste modo, os efeitos termoelétricos reversíveis sejam dominantes sobre os efeitos térmicos irreversíveis de Joule e de condução.

As propriedades de cada material semiconductor do tipo n e p variam em função da temperatura, por isso, a figura de mérito de cada material é dependente da temperatura. A máxima diferença de temperatura que pode ser alcançada por um par de materiais do tipo n e p é directamente proporcional à “temperatura média” da figura de mérito de cada material semiconductor. Por isto, maximizar a figura de mérito é o principal objectivo na selecção e optimização de materiais termoelétricos, [11].

2.2. Sistemas Fotovoltaicos

2.2.1. Introdução

A origem e continuidade da humanidade foram e serão baseadas na energia solar. Basicamente, todas as formas de energia que conhecemos nos dias de hoje são solares na sua origem. O petróleo, o carvão, o gás natural, entre outros, são resultado de processos fotossintéticos seguidos de complexas reacções químicas, nas quais a vegetação foi submetida a temperaturas e pressões elevadas durante grandes períodos de tempo. O vento e as correntes marítimas são o resultado do aquecimento desigual do ar e dos oceanos, deslocando-se os fluxos dos trópicos para os pólos. Desde o início da história, percebeu-se que o uso da energia solar traria bastantes benefícios para toda a humanidade. Apesar disso, só recentemente e durante os últimos 40 anos, é que a energia solar tem sido dotada de equipamento especializado e usada como uma fonte alternativa de energia, principalmente por ser gratuita e não provocar impactos a nível ambiental.

A maior vantagem da energia solar, quando comparada com as outras formas de energia, é o facto de ser uma forma de “energia limpa” e ser fornecida sem provocar qualquer tipo de poluição ambiental. Durante o último século, os combustíveis fósseis forneceram uma grande parte da energia, pois eram mais baratos e mais convenientes que as energias provenientes de fontes renováveis, até recentemente os problemas ambientais terem provocado uma preocupação cada vez mais generalizada. Sendo que a energia proveniente do sol atinge a superfície da terra sob forma de radiação, esta energia é usada directamente, ou através de diversas tecnologias, para aquecimento de edifícios (de forma activa ou passiva), de águas para uso doméstico ou industrial, de piscinas, de sistemas de refrigeração, para produção de energia eléctrica, para aplicações químicas, entre muitas outras aplicações.

As tecnologias de energias renováveis convertem a energia oriunda do sol e dos seus efeitos directos ou indirectos (radiação solar, vento, chuvas), forças gravitacionais (marés) e o aquecimento do núcleo da terra (geotérmica), como recursos a partir do qual a energia é produzida. Estes recursos têm enorme potencial energético, no entanto, estão geralmente dispersos e não totalmente acessíveis, e a maior parte deles são intermitentes e variam conforme o local. Estas características provocam algumas dificuldades, que no entanto, estão a ser ultrapassadas através de enormes desafios, tanto tecnológicos como económicos. Actualmente, foram realizados bastantes progressos a nível das eficiências de captação e conservação de energia, baixando assim os custos iniciais e de manutenção, melhorando significativamente a fiabilidade e aplicabilidade dos sistemas de energias renováveis, [23].

Os sistemas de energias renováveis que fazem uso das fontes renováveis de energia acima mencionados são essencialmente a Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica, Hídrica, Ondas, Biomassa, Marés e Geotérmica. O maior benefício associado à utilização destes sistemas é a redução da poluição ambiental.

Dos sistemas acima relatados, serão objecto de estudo os sistemas fotovoltaicos.

2.2.2. Energia fotovoltaica

Os módulos fotovoltaicos convertem a energia solar, a fonte de energia mais abundante na terra, directamente em energia eléctrica, fazendo recurso a materiais semicondutores. A conversão de energia fotovoltaica é um processo tecnologicamente “elegante”, pois dispensa as convencionais etapas termodinâmicas ou mecânicas, [24]. Os módulos fotovoltaicos não têm qualquer parte móvel, requerem pouca manutenção, operam de forma silenciosa, em ambientes severos e têm longa duração. A produção de electricidade é feita sem qualquer emissão de gases com efeito de estufa ou quaisquer outros gases nocivos. Devido à sua natureza modular, os sistemas fotovoltaicos podem ser construídos, teoricamente, de qualquer tamanho pois, se necessário, podem ser adicionados mais painéis para atingir as potências desejadas. Estes sistemas podem produzir desde alguns miliwatts (mW) até vários megawatts (MW) de potência, dependendo da aplicação.

Em meados do século passado, surgiram as primeiras aplicações dos sistemas fotovoltaicos, em que, a energia necessária para a produção de um painel era maior do que a energia produzida pelo mesmo durante a sua vida. Durante as últimas décadas, devido a significativas melhorias na eficiência dos painéis e métodos de produção, o tempo de amortização destes sistemas foi reduzido substancialmente, podendo ser de 3 a 5 anos, dependendo do sistema e da disponibilidade de radiação solar do local onde está instalado, [23]. Os preços dos sistemas fotovoltaicos têm diminuído bastante nos últimos anos, por isso, tem-se assistido a uma rápida expansão do mercado fotovoltaico por todo o mundo. Em termos do custo da electricidade fotovoltaica espera-se, que nas próximas décadas o custo por cada kWh produzido também diminua, tornando esta tecnologia ainda mais competitiva e atractiva. A sua evolução é apresentada na Figura 2.8.

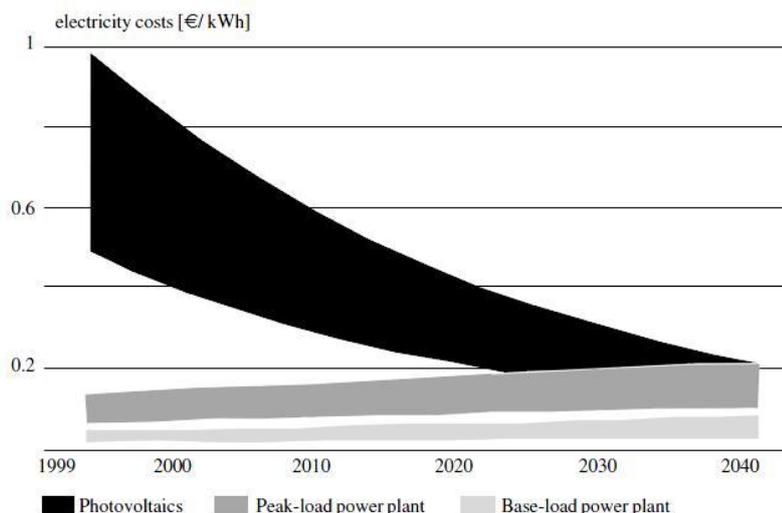


Figura 2.8. Evolução dos custos associados à electricidade Fotovoltaica [24]

Uma das principais limitações do uso generalizado dos sistemas fotovoltaicos é o elevado custo associado à produção das películas de semicondutores necessários para os módulos fotovoltaicos. No entanto, os custos podem ser reduzidos através da utilização de novos materiais semicondutores. Sistemas baseados em tecnologias de película fina, tais como, ligas de silício amorfo, telureto de cádmio ou disselenieto de cobre e índio são especialmente promissores pois são todos adequados para produção massiva e a quantidade de material a usar é mínima.

Apesar dos elevados custos associados aos sistemas fotovoltaicos, em determinadas áreas onde não é possível o acesso à rede pública ou a instalação de sistemas convencionais não é economicamente viável, os sistemas fotovoltaicos afiguram-se como a solução mais acertada. Assim poderemos ter sistemas autónomos para alimentação de habitações ou pequenos dispositivos e sistemas com ligação à rede. Relativamente aos sistemas com ligação à rede, podem acontecer duas situações: a primeira é a produção exclusiva para a rede pública, através de grandes centrais fotovoltaicas ou então através da integração de sistemas em edifícios, onde a produção se destina para alimentação da rede; a segunda passa pelos sistemas instalados em habitações para consumo próprio, reduzindo assim a energia consumida à rede e os seus custos associados, [23].

As células solares são constituídas por duas ou mais finas camadas de material semicondutor. Os materiais semicondutores têm a capacidade de absorver a radiação solar e de ceder uma parte da energia absorvida aos portadores de corrente eléctrica – electrões e lacunas. O par de camadas de semicondutores separa e agrupa os transportadores de carga e conduz a corrente eléctrica gerada preferencialmente numa direcção, [24]. Os materiais mais usados são o silício (Si), o arsenito de gálio (GaAs), o telureto de cádmio (CdTe), ou o disselenieto de cobre e índio (CIS). A célula de silício é a mais comum e é utilizada actualmente em cerca de 95 % de todas as células solares, [25]. Assim, uma célula solar é simplesmente constituída por um par de materiais semicondutores, cuidadosamente desenhado e construído para absorver e converter com eficiência a luz solar em energia eléctrica, [24]. A corrente eléctrica produzida por uma célula solar é pequena, por isso várias células são ligadas e encapsuladas (normalmente por uma cobertura de vidro) para formarem um módulo. Um painel fotovoltaico é o principal bloco de um sistema fotovoltaico onde diversos módulos podem ser interligados em série ou em paralelo, para obter uma potência desejada, [23].

Mercado fotovoltaico

Durante os últimos anos, a indústria fotovoltaica tem-se desenvolvido com bastante sucesso. Todos os ramos associados à indústria fotovoltaica (produção, distribuição e instalação de sistemas) estão actualmente representados por grandes empresas e a sua participação no mercado global está a aumentar progressivamente. O desenvolvimento tecnológico e investigação estão num nível bastante elevado, colocando assim a indústria fotovoltaica numa excelente posição para salvaguardar os desafios do futuro, [26]. Na Figura 2.9, podemos verificar o crescimento esperado de todas as tecnologias de energias renováveis até 2040. Pode-se aferir que a indústria fotovoltaica é a que apresenta a maior taxa de crescimento anual da presente data até 2040, sendo uma das tecnologias que terá uma forte implementação no mercado a nível mundial.

	1996-2001	2001-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040
Biomassa	2%	2.2%	3.1%	3.3%	2.8%
Hídrica	2%	2%	1%	1%	0%
Mini-Hídrica	6%	8%	10%	8%	6%
Eólica	33%	28%	20%	7%	2%
Fotovoltaica	25%	28%	30%	25%	13%
Solar térmico	10%	16%	16%	14%	7%
Solar térmico - electricidade	2%	16%	22%	18%	15%
Geotérmica	6%	8%	8%	6%	4%
Ondas e Oceanos	-	8%	15%	22%	21%

Figura 2.9. Crescimento das tecnologias de energias renováveis até 2040. [27]

No fim do ano de 2008, a capacidade acumulada a nível mundial era de aproximadamente de 15 GW, sendo a Europa responsável por 65% da capacidade total, como ilustrado na Figura 2.10:

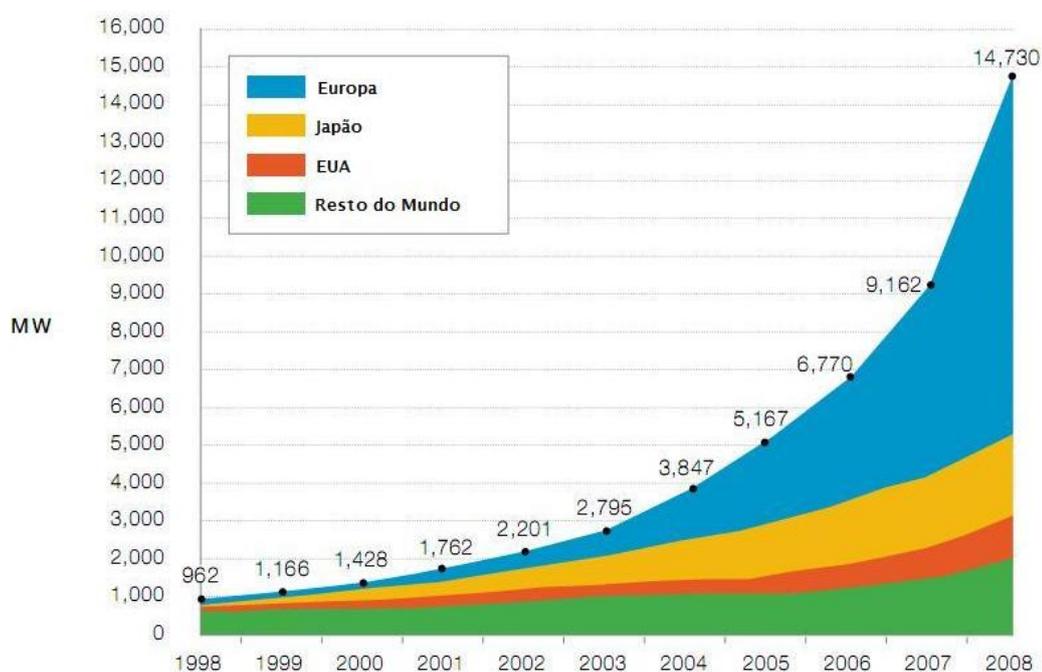


Figura 2.10. Capacidade acumulada a nível mundial até 2008 [27]

Apesar de Portugal possuir boas condições em termos de radiação solar, a indústria fotovoltaica em Portugal só nos últimos anos é que Portugal deu um grande salto em termos de energia fotovoltaica instalada. Na Figura 2.11 podemos verificar a evolução da potência instalada nos últimos anos em Portugal.

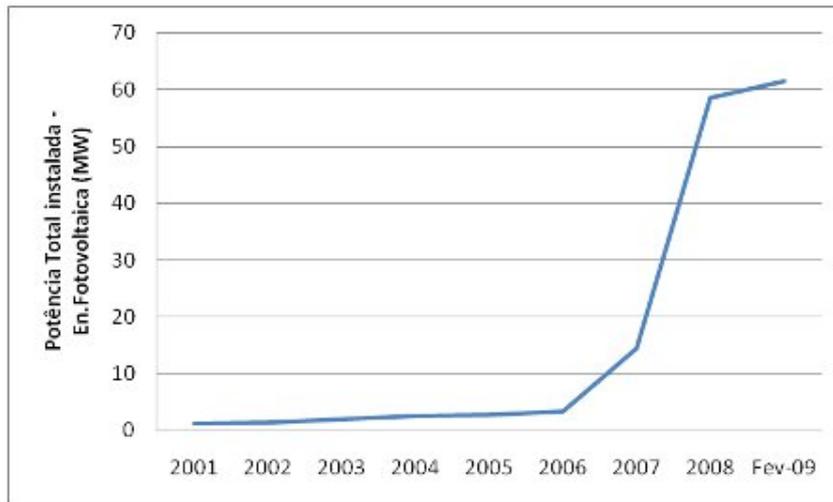


Figura 2.11: Crescimento do mercado fotovoltaico em Portugal [28]

Relativamente ao crescimento anual a nível mundial, a EPIA estima que se consigam atingir valores de potências instaladas na ordem dos 22 GW, como se verifica na Figura 2.12:

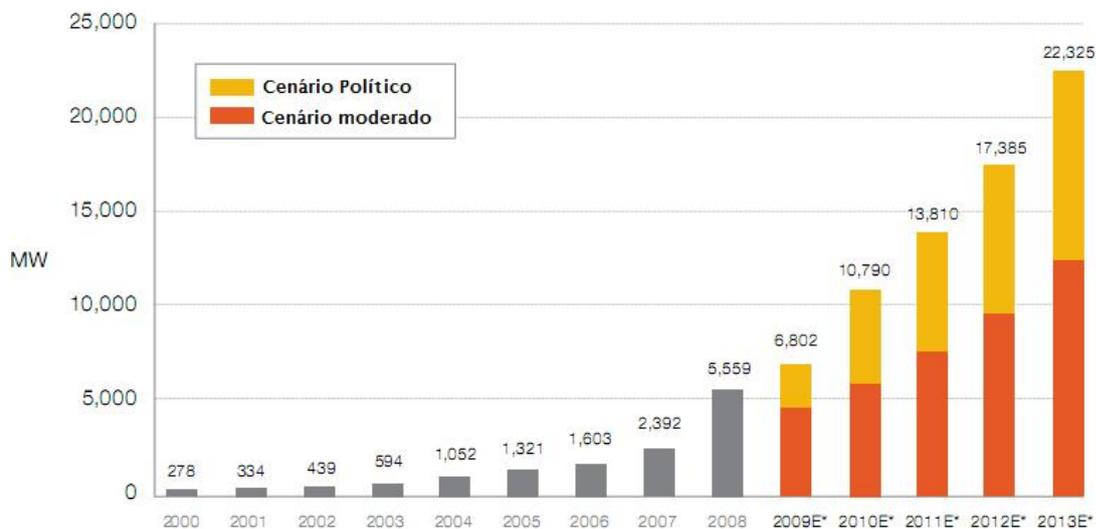


Figura 2.12. Crescimento anual a nível mundial até 2013 [27]

A indústria fotovoltaica, no período de maior expansão entre 2004 e 2008, passou por uma grave falta de matéria-prima - o silício. Durante este período, e devido à escassez do silício, o preço praticado pelos produtores atingiu valores bastante elevados, \$400 por kg, sendo em 2001 cerca de \$40. Neste período algumas empresas, que tinham apostado em desenvolvimento e investigação de novas tecnologias baseadas em silício nomeadamente de película fina, assumiram que esta tecnologia nunca mais iria ter qualquer significado deixando assim o seu desenvolvimento. No entanto, isto não se verificou sendo hoje uma tecnologia com expressão na indústria fotovoltaica, [29].

Posteriormente, começou o interesse por tecnologias de película fina alternativas ao silício. Esta tecnologia têm um potencial de crescimento muito elevada, tendo a sua quota de

mercado crescido nos últimos anos. Esta tecnologia tem a vantagem de ser baseada em materiais como o CdTe e CIGS, não baseados em silício, por isso as hipóteses de sofrer com as flutuações do mercado do silício são negligenciáveis. As significativas perspectivas de crescimento desta tecnologia levaram várias empresas a entrar neste mercado. Com a criação de linhas de produção, espera-se que num futuro próximo a quota de mercado desta tecnologia tenha um crescimento maior que o esperado, [30].

2.2.3. Efeito fotovoltaico

Em semicondutores, quando um material que é dopado tem mais electrões na sua banda de valência do que um semicondutor, então este material dopado é chamado de semicondutor do tipo n. Este semicondutor é electronicamente neutro, mas tem excesso de electrões que estão disponíveis para condução. Isto acontece, por exemplo, quando átomos de silício são substituídos por átomos de arsénio (As) ou antimónio (Sb) fazendo, assim, com que os electrões se possam mover em torno do cristal. Se estes electrões forem removidos, os átomos vão ficar com carga positiva. Por outro lado, se um semicondutor tem poucos electrões na sua banda de valência e é dopado então, este material passará a chamar-se de semicondutor do tipo p. Este material é electronicamente neutro, mas possui demasiadas lacunas que podem ser preenchidas por electrões. Neste caso os materiais dopantes são gálio (Ga) e índio (In). Se electrões conseguirem preencher as lacunas, os átomos das impurezas caberiam uniformemente na estrutura formada pelos átomos do semicondutor mas, neste caso, os átomos ficariam com carga negativa.

Quando estes dois materiais se unem, formam uma junção p-n. Assim, o excesso de electrões presentes no semicondutor do tipo n irá passar para o material do tipo p, e as lacunas do semicondutor do tipo p espalhar-se-ão no material do tipo n, deixando assim o lado do material do tipo n carregado positivamente e o lado do tipo p negativamente, como se pode verificar na Figura 2.13.

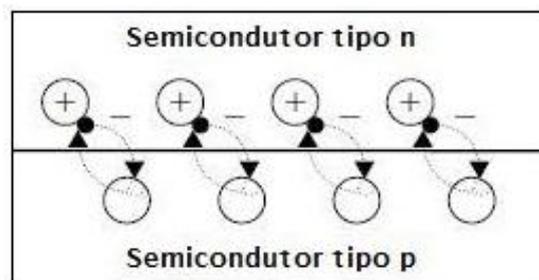


Figura 2.13. Ligação p-n dos materiais semicondutores [23]

O processo descrito anteriormente só acontece quando uma determinada quantidade de energia é fornecida aos electrões. A energia necessária para que haja movimentação de electrões e das lacunas de um material para o outro é fornecida pelos fotões provenientes da radiação solar, fazendo com que este tipo de materiais seja o ideal para a conversão fotovoltaica.

Quando um fotão atinge uma ligação de materiais como a referida anteriormente, este pode ser reflectido, absorvido ou transmitido. Quando este fotão é absorvido por um electrão de valência de um átomo, a energia do electrão é aumentada pela quantidade de energia desse mesmo fotão. Se a energia do fotão é maior do que a “band gap” do semicondutor, o electrão

que possui excesso de energia irá saltar para a banda de condução, onde se poderá mover livremente. Portanto, quando um fóton é absorvido, este provocará a saída de um electrão do átomo. Este electrão pode ser removido por um campo eléctrico através dos materiais semicondutores e das suas respectivas ligações p-n. Na ausência de um campo, o electrão recombina-se com um átomo, considerando que, quando há um campo, ele flui, criando assim uma corrente. Se a energia contida no fóton for mais pequena que a “band gap”, o electrão não terá energia suficiente para saltar para a banda de condução, por isso, esse excesso de energia será convertido em energia cinética dos electrões, provocando, assim um aumento de temperatura. Deve notar-se que, independentemente da intensidade da energia do fóton em relação à energia de “band gap”, apenas um electrão pode ser liberado. Esta é uma das razões pela baixa eficiência das células fotovoltaicas.

O modo de funcionamento de uma célula fotovoltaica é descrito na Figura 2.14. As células solares contêm diversas junções de semicondutores do tipo n e p, isto é, junções p-n. Os electrões e as lacunas difundem-se ao longo da fronteira da junção, criando assim um campo eléctrico através da mesma. Os electrões livres são gerados na camada do semicondutor do tipo n por acção dos fotões. Quando os fotões da luz solar atingem a célula solar e são absorvidos pelo semicondutor, alguns pares de electrões e lacunas são criados. Se estes pares estiverem suficientemente próximos da junção p-n, o seu campo eléctrico causará a carga para os separar, movendo-se assim electrões para o lado n e lacunas para o lado p. Se os dois lados da célula solar estão agora ligados a uma carga, uma corrente eléctrica irá fluir enquanto a célula for atingida pela radiação solar, [23].

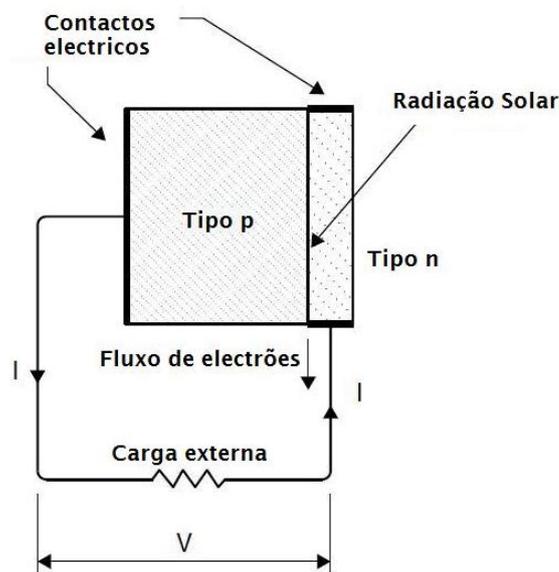


Figura 2.14. Efeito fotovoltaico [23]

2.2.4. Células fotovoltaicas

Actualmente, as células solares fotovoltaicas já são constituídas através de diversos materiais, embora o silício continue a liderar de forma expressiva. Por ser um elemento muito abundante na terra, é o mais usado, embora necessite de diversos processos de transformação que são bastante morosos e dispendiosos. Nos últimos anos, materiais como o disselenieto de cobre e índio (CIS) e o telurieto de cádmio (CdTe), usados nas células de película fina ou

células híbridas, têm aparecido com alternativas viáveis às células de silício cristalino. Serão apresentadas de seguida as principais células usadas actualmente na conversão fotovoltaica.

Células de Silício cristalino

O material mais usado para as células solares é o silício. Não é um elemento puro, mas sim uma ligação química em forma de dióxido de silício. A obtenção de silício com qualidade desejada para produção de células fotovoltaicas exige um vasto conjunto de processos. Assim, a areia sílica é inicialmente aquecida e fundida num cadinho, obtendo-se assim silício metalúrgico com cerca de 98% de pureza. De seguida, o silício em estado bruto é ainda purificado através de um processo químico. Como resultado deste processo, são produzidos os químicos hidrogénio e triclorosilano. Por último, é efectuada uma destilação ao triclorosilano de modo a eliminar algumas das impurezas ainda presentes, [25].

Este é o tipo de tecnologia mais comum e representa cerca de 90% do mercado [27] e pode ser processado e preparado de diversas formas de modo a obter células monocristalinas, figura 2.15, ou policristalinas entre outros. Entre o tipo de células que têm como base o silício cristalino estão as células monocristalinas, policristalinas, POWER (constituídas por pastilhas policristalinas produzidas por fundição de lingotes), policristalinas EFG (alimentação de película com limite de crescimento definido), células de filamentos de silício policristalino, células de rede dendrítica de silício monocristalino e as células policristalinas Apex (são as primeiras aplicações de um procedimento de película fina com silício cristalino, preparadas para produção em série). As suas eficiências variam entre 9,5% (Apex) até 15 e 18% (policristalinas e monocristalinas).

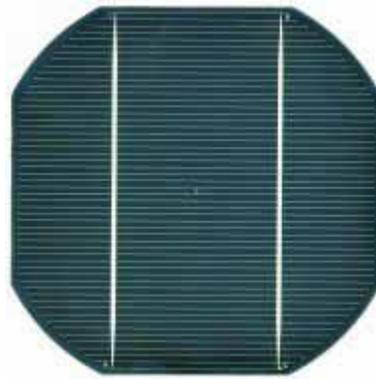


Figura 2.15. Célula de Silício monocristalina [31]

Células de Película fina

Nas células de película fina, os semicondutores fotoactivos são aplicados em finas camadas num substrato (na maioria dos casos vidro). Os métodos utilizados para tal incluem disposição por vaporização, processos de disposição catódica e banhos electrolíticos. O Silício amorfo, o disselenieto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe) são os materiais semicondutores. Estes materiais são mais tolerantes à contaminação de átomos estranhos.

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 (interligação externa), as células de película fina estão interligadas monoliticamente

(interligação interna). As células são separadas electricamente e interligadas em etapas estruturais, que têm lugar entre as fases de fabrico individual das camadas celulares. As principais células que fazem uso da tecnologia de película fina são as células de silício amorfo, células de disselenieto de cobre e índio (CIS) e as células de Telurieto de Cádmio (CdTe). As eficiências variam entre 5 e 8% para as células de silício amorfo e 9,5% para as células CIS.

Células híbridas: células solares HCI

A célula solar HCI resulta da combinação da clássica célula solar cristalina, com uma célula de película fina. HCI, refere-se à estrutura destas células solares híbridas que consiste em silício cristalino e amorfo associado a uma película fina adicional não contaminada (camada fina intrínseca). Uma pastilha monocristalina forma o núcleo da célula HCI e é revestida em ambos os lados por uma camada fina de silício amorfo (a-Si). Como camada intermédia, uma camada ultra fina i (intrínseca) de silício sem impurezas, liga a pastilha cristalina com cada uma das camadas de silício amorfo. Uma camada a-Si dopada com impurezas do tipo p é depositada no lado frontal que forma a junção p-n com a pastilha monocristalina com impurezas do tipo n.

Neste tipo de células, não há degradação da eficiência em resultado do fenómeno de envelhecimento por indução da luz, como é característico das células amorfas de película fina. Comparadas com as células solares cristalinas, a célula HCI distingue-se pela maior produção de energia a elevadas temperaturas. As células híbridas podem apresentar uma eficiência de 17,3%, [25].

Comparação entre os diferentes tipos de células

As células solares de silício monocristalino e policristalino são as mais utilizadas. As células monocristalinas apresentam uma óptima eficiência, enquanto a menor eficiência do silício policristalino é contrabalançada por um preço de produção mais reduzido. Os módulos de silício amorfo têm sido maioritariamente utilizados em aplicações de lazer (pequenas aplicações, campismo, barcos). Recentemente, os resultados de longo prazo conseguidos com testes demonstraram que as reservas referentes à sua estabilidade e ao seu comportamento ao longo do tempo eram infundadas, pelo que os módulos amorfos poderão tornar-se cada vez mais comuns nos grandes sistemas. Em contrapartida, além de terem uma baixa eficiência, esta diminui durante os primeiros 6 a 12 meses de funcionamento, devido à degradação introduzida pela luz, até nivelar num valor estável.

Os módulos de película fina CIS e CdTe alcançaram a fase de produção em série e têm vindo a ser utilizados em vários locais de referência. As células de CIS, ao contrário das de silício amorfo, não são susceptíveis de se degradarem com a indução da luz. Contudo apresentam problemas de estabilidade em ambientes quentes e húmidos, pelo que deve ser garantida uma boa selagem dos módulos. As células de CdTe, tal como as células CIS, têm um potencial considerável para a produção em série reduzindo assim os custos. O CdTe é um composto de elevada estabilidade. No entanto, a toxicidade do Cádmio pode constituir um problema que pode afectar a aceitação dos módulos e assim a sua capacidade de criar um impacto positivo no mercado.

Os módulos híbridos HCI são os que apresentam maiores valores de eficiência entre todos os módulos que estão disponíveis no mercado. A par das células de película fina de CIS, as células de HCI também revelam uma degradação da eficiência em resultado do fenómeno de envelhecimento por indução de luz. Comparadas com as células solares cristalinas, a célula HCI distingue-se pela maior produção de energia a temperaturas elevadas, [25].

Novas tecnologias

Outros tipos de células solares fotovoltaicas que estão actualmente em produção são células à base de polímeros e as orgânicas. A Figura 2.16 mostra a produção de módulos com base nas células orgânicas de película fina fabricada por uma das maiores empresas do mundo nesta nova tecnologia, a Konarka. A grande atracção destas tecnologias é que potencialmente são produzidas de forma mais rápida e barata quando comparadas com as tecnologias de silício cristalino ainda que apresentem eficiências baixas, na ordem dos 4%, e problemas de degradação. Os materiais orgânicos também são atractivos pois perspectivam uma produção de alto rendimento usando por exemplo deposição por spray. Outros recursos atractivos são a produção de películas ultra-finas, dispositivos flexíveis, que poderão ser interessantes para algumas aplicações, para edifícios e para modificação da cor das células através da estrutura química, [32].

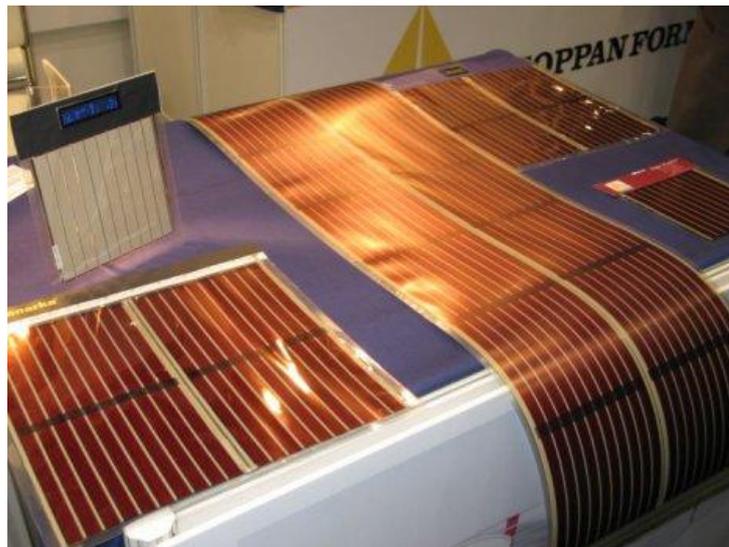


Figura 2.16. Células orgânicas de película fina [33]

Adicionalmente às células já referidas, estão a ser investigadas a chamada nano tecnologia fotovoltaica considerada a terceira geração de células fotovoltaicas depois das células de silício cristalino (primeira geração) e do silício amorfo (segunda geração) de película fina. Em vez dos materiais condutores e substratos de vidro, a nano tecnologia fotovoltaica passara a fazer uso de revestimentos ou misturas de substratos de polímeros com nano materiais com condutividade eléctrica. Este tipo de tecnologia espera-se que possa ser produzida em larga escala pois permitirá reduzir bastante os tradicionalmente elevados custos das células fotovoltaicas, [23].

Existem ainda dois tipos de células e módulos que actualmente já são comercializados que são as células concentradoras e as células flexíveis. As primeiras são usadas em colectores concentradores que fazem uso de uma lente para focar a luz solar nas células. A principal vantagem é a redução do material usado nos módulos, diminuindo assim os custos

associados à produção das células. Este tipo de tecnologia aumenta significativamente a eficácia das células. A célula concentradora apresentada na Figura 2.17, fabricada pela empresa EMCORE tem uma eficiência de 39% quando exposta a iluminação concentrada.



Figura 2.17. Célula concentradora [34]

Relativamente as células flexíveis, estas têm um processo de produção semelhante às células de película fina mas são depositadas em finas camadas de plástico flexível, abrindo assim o campo de aplicações, como representado na figura 2.18. Este tipo de células têm espessuras bastante finas, são flexíveis e transparentes por isso são ideais para aplicação e integração em fachadas de edifícios. A sua eficiência é comparável com as células convencionais. [27]

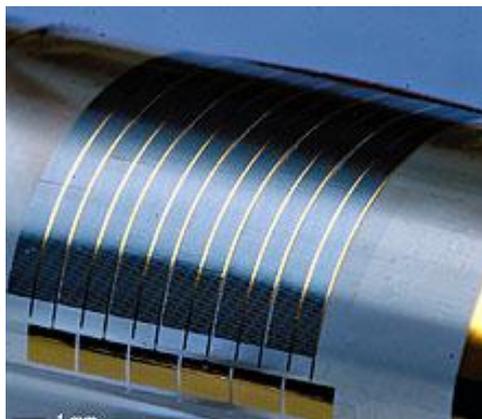


Figura 2.18. Célula flexível [35]

2.2.5. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos têm actualmente um campo de aplicação muito vasto. Assim, podemos dividi-los em dois grandes grupos: sistemas com ligação à rede e sistemas autónomos. No caso de sistemas com ligação à rede, a energia produzida nos painéis é adicionada à rede, funcionando a rede como um acumulador de energia. Podemos ter ainda o caso de sistemas instalados em residências ou edifícios de serviços que produzem energia directamente para rede local, tendo como apoio a rede pública em caso de produção deficitária de energia por parte do sistema. No caso de produção superior às necessidades, a energia excedente será injectada na rede.

Nos sistemas autónomos o aproveitamento da energia solar precisa de ser ajustado à procura energética visto que a energia produzida por norma não corresponde à procura da mesma por parte do consumidor. Nestas situações é obrigatório a implementação de um

sistema de armazenamento, tipicamente através de baterias, e em muitos casos é também necessário o recurso a sistemas de produção de energia auxiliares (sistemas híbridos), [25].

Sistemas com ligação à rede

É o tipo de sistemas fotovoltaicos mais usado nos países desenvolvidos tanto para sistemas domésticos como para grandes centrais fotovoltaicas para produção de energia com ligação à rede.

Nos sistemas fotovoltaicos usados em habitações, edifícios de serviços e indústria a energia produzida é injectada na rede e posteriormente usada para suprir as necessidades energéticas locais. Nestes sistemas a interligação com a rede assume um papel fundamental. Assim, o uso de inversores de corrente, cabos AC-DC e caixa de junção (equipada com dispositivos de protecção e interruptor de corte principal DC) [25] é vital no bom funcionamento de todo o sistema. No caso de produção excessiva de energia, esta é vendida à rede pública obtendo assim algum retorno financeiro. Estes sistemas oferecem assim ao utilizador alguma independência tanto financeira como energética relativamente à rede energética pública, evitando assim o consumo de energia proveniente da rede produzida em sistemas convencionais.

Actualmente, as grandes centrais fotovoltaicas para produção de energia para a rede pública são muito importantes. Com a construção de projectos de grande envergadura, as entidades públicas têm assim em mão capacidade de geração de energia descentralizada, ou seja constroem nos locais de maior conveniência sem ter que recorrer à construção de centrais convencionais que fazem uso de combustíveis fósseis ou centrais nucleares. Diminui assim a dependência dos combustíveis fósseis, são mais fáceis e mais rápidas de construir, têm a possibilidade de expansão se a demanda energética aumentar, não consomem combustíveis e não poluem o ambiente. É acima de tudo uma solução atractiva que permite a redução de custos associados aos combustíveis e melhoraram a qualidade do ambiente em termos locais, [36]. Na figura 2.19, está representada uma das maiores centrais fotovoltaicas do mundo instalada em Portugal (Moura) com capacidade instalada de 62 MW, [37].



Figura 2.19. Central fotovoltaica de Moura [38]

Sistemas autónomos

Os sistemas autónomos constituíram o primeiro campo de operação económica da tecnologia fotovoltaica, [25]. Estes sistemas são essencialmente usados em locais e aplicações que têm uma localização complexa, onde não é economicamente viável a construção de sistemas de produção de energia convencionais ou sistemas de transporte de energia da rede. Em países em vias de desenvolvimento e em locais onde não existe energia eléctrica, estes sistemas têm grande potencial e podem constituir alternativa com uma vertente económica de elevado interesse. As evoluções tecnológicas e a diminuição de custos na produção destes sistemas verificadas nos últimos anos nos países industrializados poderão contribuir para a generalização deste tipo de aplicações.

Relativamente aos sistemas autónomos existem ainda duas possibilidades na sua utilização: com e sem utilização de armazenamento. Os sistemas sem armazenamento de energia são essencialmente vocacionados para aplicações de pequena potência ou que usem electricidade em corrente contínua. Como principais aplicações temos: bombas de água para irrigação, ventiladores para arrefecimento [36], telecomunicações, semáforos, telefones de emergência, sinais nas auto-estradas, bóias de sinalização marítimas, entre outros, [27].

Este tipo de sistema fotovoltaico básico tem muitas vantagens que os tornam adequados para este tipo de aplicações. Em primeiro lugar produzem energia onde é necessário dispensando assim armazenamento, sistemas de cabos complexos e controladores de carga. Depois pelo facto deste tipo de sistemas apresentar baixas potências e peso são fáceis de transportar e instalar.

Os sistemas com armazenamento, recorrendo normalmente a baterias, são ideais para o fornecimento de electricidade quando e onde é necessário. São especialmente adequados para casos onde a rede pública não é desejável ou a extensão das linhas se torna muito caro. A capacidade para armazenar energia eléctrica proveniente do sistema fotovoltaico faz com que este se torne uma fonte fidedigna de energia eléctrica durante o dia ou noite, [36]. Em termos de aplicações são usados principalmente para electrificação rural onde não existe electricidade disponível particularmente em zonas montanhosas e em países em desenvolvimento [27] mas também para iluminação, telefones e sensores. Um exemplo de aplicação deste tipo de sistemas é mostrado na figura abaixo.



Figura 2.20. Sistema fotovoltaico autónomo [39]

Nos sistemas com armazenamento, os módulos fotovoltaicos estão ligados à bateria sendo que esta está ligada à carga. Durante o dia os módulos fotovoltaicos carregam a bateria e de seguida esta fornece a energia necessária às diferentes cargas. Associado à bateria está um controlador de carga de modo a evitar sobrecarga da bateria ou que esta descarregue completamente. Caso existam aparelhos que funcionem com corrente contínua, a energia pode ser fornecida directamente do módulo ou da bateria enquanto na maioria dos casos de aparelhos que funcionem com corrente alternada, estes precisam de um inversor de corrente entre o módulo ou bateria e a carga, [36].

As baterias são uma das peças mais importantes em sistemas com armazenamento de energia. Estas, fazem dos sistemas fotovoltaicos mais úteis nas mais diversas situações mas requerem obrigatoriamente alguma manutenção. São idênticas às baterias usadas nos carros mas são construídas de forma diferente de modo a armazenarem mais energia para o uso diário, [32].

Os sistemas autónomos, em geral, são constituídos pelos módulos fotovoltaicos, bateria, um controlador de carga e inversor.

Sistemas híbridos

Em muitos casos, a energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos pode não ser suficiente para satisfazer as necessidades energéticas de uma habitação ou uma qualquer carga. Se existir o apoio energético da rede, esse défice de produção energética não será problemático mas quando não existe esse apoio poderá tornar-se grave. Nessas situações a utilização de outro sistema de produção de energia complementar poderá ser a solução.

Os sistemas híbridos são a combinação de diferentes sistemas de produção de energia que se complementam. As flutuações de energia produzida e a intermitente disponibilidade de recursos (radiação solar e vento, por exemplo) podem ser evitadas com este tipo de sistemas. O uso de um sistema complementar de energia tem a vantagem de ser capaz de fornecer energia mesmo em momentos em que uma das partes do sistema híbrido não está disponível, [40].

Tendo em conta as diversas fontes renováveis de energia e os ainda sistemas convencionais, podem-se efectuar várias combinações de modo a que esteja sempre garantido o fornecimento de energia. Os sistemas híbridos que incluam sistemas fotovoltaicos e eólica, ou geradores a diesel são bastante usuais.

2.2.6. Equipamento fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos, além dos módulos, necessitam de vários equipamentos para armazenamento, conversão e controlo da energia produzida nos módulos constituintes de cada sistema tanto autónomo como com ligação à rede. Em termos gerais, os equipamentos mais importantes para o bom funcionamento dos sistemas fotovoltaicos são: baterias, inversores de corrente e controladores de carga. De seguida, será feita uma breve descrição sobre os equipamentos acima referidos, começando pelo componente fundamental: o módulo fotovoltaico.

Módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é constituído por um conjunto de células solares fotovoltaicas. A reduzida potência de uma célula leva a que estas sejam ligadas em série e em paralelo para que se atinjam assim potências mais elevadas.

Os módulos estão sujeitos a condições atmosféricas adversas (principalmente no inverno), humidades e tensões mecânicas por isso é usado um material transparente para fazer a cobertura dos mesmos, de modo a proteger as células, tendo ainda a particularidade de assegurar o isolamento eléctrico das mesmas. O material da cobertura dos módulos tem que assegurar uma elevada transmissão luminosa de forma a permitir uma elevada incidência de energia solar nas células. O material mais usado é o vidro com baixo teor de ferro pois possui uma elevada transmissão. Este material pode ainda ser sujeito a processos térmicos de modo a que resista a elevadas cargas térmicas, podendo ainda ter uma camada anti-reflexo fazendo com que a sua transmissão luminosa aumente. Esta camada anti-reflexo aumenta assim a produção do módulo.

Relativamente as células, estas são depositadas em substratos. Os substratos na maioria dos casos são em vidro mas acrílico, metal ou folhas de plástico são também usados. Na Figura 2.21 está representado esquematicamente um módulo no qual é usado vidro para o encapsulamento das células. Quanto ao encapsulamento de células, existem três tipos: EVA Teflon e em resina fundida que fazem uso de diversos materiais para a protecção da células. Assim existem módulos vidro-vidro, vidro-película, metal-película e película-película, módulo de Teflon e módulo vidro-vidro (resina fundida) são o tipo de encapsulamento usado respectivamente pelos três tipos acima mencionados.

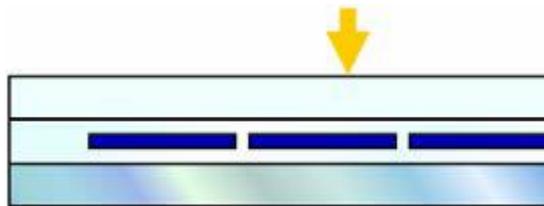


Figura 2.21. Módulo com substrato e cobertura em vidro (EVA) [25]

Os módulos fotovoltaicos podem ser classificados de diversas formas, consoante o tipo de material celular (monocristalinos, policristalinos ou película fina), do material de encapsulamento (EVA, Teflon ou resina fundida), tecnologia de substrato (vidro-vidro, vidro-película, metal-película e película-película) ou sobre funções específicas de construção (normalmente em função do tipo de protecção usado na cobertura, vidro isolante ou vidro de segurança laminado por exemplo), [25].

Características de funcionamento

Como referido os módulos são constituídos por um conjunto de células conectadas em série e paralelo. Os efeitos da ligação entre células em série e paralelo são distintas. Assim se tivermos duas células ligadas em paralelo, a tensão permanece igual mas a corrente duplica, acontecendo o contrário nas ligações em série, como apresentado nas curvas características I-V na Figura 2.22.

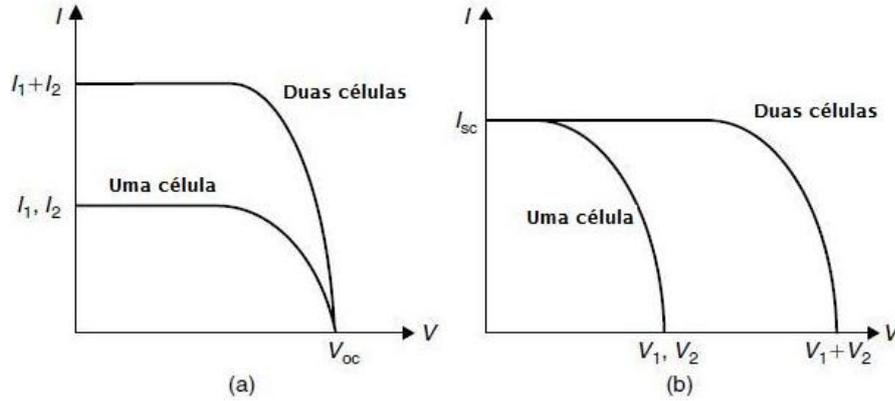


Figura 2.22. Efeito das ligações em paralelo (a) e série (b) entre células. [23]

A corrente e tensão produzidas nos módulos estão fortemente dependentes de vários factores tais como a temperatura das células e níveis de irradiação. Assim, para uma determinada irradiação e temperatura de célula fixa, a curva característica de uma célula I-V pode ser representada como na Figura 2.23. A intensidade de corrente é máxima (I_{sc}) quando se efectua um curto-circuito à célula sendo a tensão na célula nula. Por outro lado quando o circuito da célula está aberto verifica-se a tensão máxima (V_{oc}) sendo a intensidade de corrente zero. O ponto assinalado na figura representa o ponto para o qual a célula funciona na sua potência máxima e é conhecido como ponto MPP. Representa o produto entre a intensidade de corrente MPP e a tensão máxima MPP, [25].

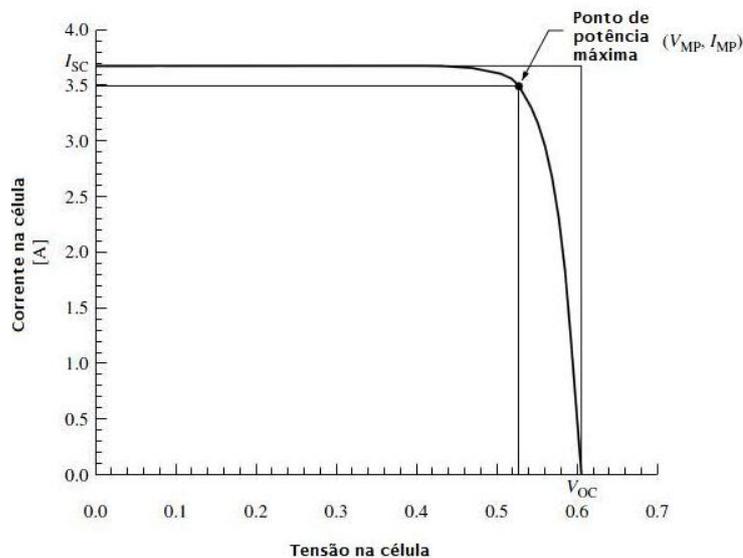


Figura 2.23. Curva característica Intensidade de corrente - Tensão de uma célula solar fotovoltaica [24]

Podemos ainda analisar a influência da variação da temperatura das células e da irradiação na curva característica de uma célula. Na Figura 2.24 (a) podemos verificar que a intensidade de corrente em curto-circuito aumenta linearmente com o aumento da irradiação, enquanto a tensão em circuito aberto aumenta logaritmicamente com o mesmo aumento. Relativamente à temperatura, Figura 2.24 (b), se a temperatura nas células do módulo aumentar, a intensidade de corrente aumenta ligeiramente sendo que a tensão em circuito aberto decresce linearmente. Outro efeito indesejável é a diminuição da eficiência do módulo que diminui com a temperatura.

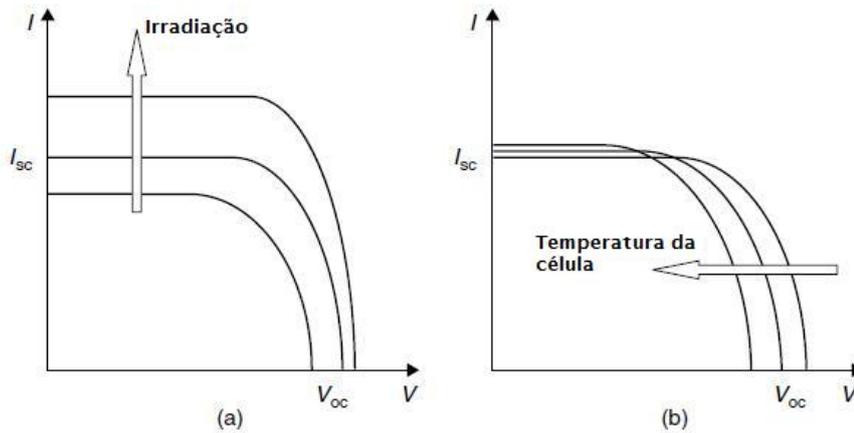


Figura 2.24. Influência do aumento da irradiação (a) e da temperatura (b) no funcionamento das células [23]

Baterias

As baterias são o elemento fundamental em sistemas autónomos. Nestes sistemas, a produção e consumo de energia normalmente nunca coincidem sendo por isso necessário armazenar a energia produzida ao longo do dia para ser utilizada ao fim do dia e/ou noite. Outro factor importante é a indisponibilidade de radiação. Em sistemas autónomos é importante prevenir a ausência de radiação durante alguns dias através do armazenamento de energia em baterias principalmente em dias com bastante radiação. O dimensionamento das baterias tendo em conta este aspecto indispensável, principalmente no inverno onde a radiação apresenta valores menores, é fundamental para um funcionamento eficaz do sistema.

Actualmente, os principais tipos de baterias usados no armazenamento de energia são as baterias de ácido de chumbo, de níquel-cádmio, de hidreto metálico de níquel e de iões de lítio. As baterias de ácido de chumbo são as mais usadas em armazenamentos de curta duração sendo que as de lítio são usadas em pequenos equipamentos, tais como relógios, lanternas e rádios. Um dos parâmetros mais importantes nas baterias é a sua capacidade de carga e descarga, de forma contínua sem que a sua vida útil seja afectada. Normalmente a vida útil de uma bateria é definida a partir do ponto em que, completamente carregada, a bateria tem somente 80% da sua capacidade nominal, [25].

As baterias são usualmente classificadas pela sua capacidade nominal, q_{max} , que é a quantidade de energia que a bateria pode fornecer até ficar completamente descarregada. Podemos ainda definir a eficiência de uma bateria como sendo a razão entre a carga extraída da mesma, em Ah, e a quantidade de carga necessária para repor o estado inicial da bateria, em Ah. Por isso podemos concluir que a eficiência da bateria depende do estado de carga, SOC, e descarga da corrente. O estado de carga é definido como sendo o rácio entre a capacidade actual da bateria e a sua capacidade total, [23]. Podemos então escrever:

$$SOC = \frac{q}{q_{max}} \quad (2.59)$$

Em termos de selecção de baterias, principalmente para sistemas autónomos, deve-se ter em conta vários factores relacionados com a relação entre o seu desempenho e preço, manutenção, período útil de vida, capacidade de armazenamento, eficiência energética, capacidade de carga e descarga e resistência mecânica à vibração (principalmente para transporte), [25].

Inversores

A energia produzida nos módulos fotovoltaicos tem como sinal de saída corrente contínua (DC). Para que esta energia possa ser utilizada por todos os aparelhos, tem que existir uma conversão de corrente AC sendo usado para tal um inversor de corrente. Um inversor de corrente tem como principal função a conversão de corrente contínua em corrente alternada, estabelecendo a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede AC ou a carga AC, ajustando ainda o sinal para a frequência e nível de tensão da rede a que está ligado. São também conhecidos como conversores DC/AC.

Dependendo da aplicação, existem dois tipos principais de inversores: de rede e autónomos. No primeiro caso, o inversor está directamente ligado à rede ou ao sistema eléctrico do local ou edifício, sendo a energia produzida no sistema fotovoltaico directamente injectada na rede ou em caso de acoplamento à rede local, a energia produzida é inicialmente consumida e o excedente direccionado para a rede. Para sistemas com ligação à rede podemos ainda definir dois tipos de inversores: monofásicos ou trifásicos. A sua utilização está dependente da potência instalada sendo que os inversores monofásicos são usados para sistemas até 5 kWp, restando os inversores trifásicos para potências superiores.

Em sistemas autónomos, os inversores são utilizados para possibilitar o uso de aparelhos eléctricos AC de 230 V, 50 Hz a partir da rede DC, visto que o armazenamento nas baterias e fornecimento de energia para consumo neste tipo de sistema é realizado através de sinal contínuo. Existem ainda dois tipos de inversores bastante usados nos sistemas autónomos fotovoltaicos que são os inversores sinusoidais e os trapezoidais. Os primeiros conseguem satisfazer quase todo o tipo de aplicações, principalmente para equipamento electrónico, sendo por isso mais complexos e caros. Quanto aos inversores trapezoidais são mais baratos, suportam cargas elevadas mas não conseguem alimentar equipamento electrónico sensível.

Associado às conversões de energias estão perdas de energia. Assim, podemos definir uma eficiência de conversão, definida como o quociente entre a potência efectiva de saída, AC, e a potência efectiva de entrada, DC, [25].

$$\eta_{conv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (2.60)$$

Controlador de carga

Os controladores de carga têm como principal função regular a potência debitada pelos módulos fotovoltaicos de modo a prevenir sobrecargas nas baterias. Nos sistemas autónomos, a tensão do sistema do gerador fotovoltaico deverá ser compatível com a da tensão da bateria. A tensão nominal do gerador deverá ser superior à tensão de carga das baterias, de tal forma que a tensão MPP (Ponto de Potência Máxima), para maiores temperaturas, seja suficientemente elevada que possibilite a carga das baterias. No caso de temperaturas baixas, a tensão MPP poderá ser muito elevada quando comparada com a da bateria o que pode levar a que a tensão máxima de carga seja ultrapassada. Assim sendo, o controlador de carga mede a tensão da bateria e protege-a contra a possibilidade de sobrecarga.

O caso contrário também pode acontecer, ou seja, se os níveis de radiação forem baixos, o sistema não alcança uma tensão suficiente para carregar as baterias, o que leva a

uma descarga da mesma. Para prevenir tais situações, são utilizados díodos de bloqueio do gerador, normalmente integrados com o controlador de carga.

De modo a garantir um período de vida longo e em bom funcionamento das baterias, os controladores têm que ser bastante flexíveis de modo a ajustar as tensões máximas de carga e mínima de descarga das baterias pois estas dependem do estado de carga. Para aumentar ainda mais o ciclo de vida útil das baterias, deve-se ter em conta as propriedades dos diferentes tipos de baterias, a temperatura e a sua idade sendo que para controlo da temperatura está associado ao controlador um sensor de temperatura.

Optimizar a carga das baterias, a protecção contra sobrecargas e contra descargas profundas, prevenção de descargas indesejáveis e informação sobre o estado da carga das baterias apresentam-se assim como as principais tarefas realizadas por um controlador de carga, [25].

3. Trabalhos experimentais

As cargas térmicas presentes numa caravana, ou noutro tipo de veículo ou espaço são muito importantes quando se pretende dimensionar um sistema ou equipamento tanto para refrigeração como para aquecimento. Tendo em vista o cálculo das mesmas, foi necessário medir experimentalmente as infiltrações. As temperaturas do ar no interior da caravana foram também medidas de modo a conhecer a sua evolução ao longo do dia. As dimensões da caravana tal como os materiais constituintes das paredes também foram avaliados através da análise de várias amostras das paredes da caravana.

3.1. Dimensões e propriedades dos materiais da caravana

As dimensões da caravana usadas para os cálculos estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Dimensões da caravana

Dimensões [m]		Altura [m]	Largura [m]	Comprimento [m]
		2	2,1	4,4
Volume [m ³]		Volume exterior	% Volume ar	Volume interior
		17,2	70	12
Superfície	Paredes		Janelas	
	Espessura [m]	Área [m ²]	Espessura [m]	Área [m ²]
Frente	0,024	3,44	0,03	0,78
Direita	0,024	7,50	0,03	0,60
Esquerda	0,024	7,75	0,03	0,35
Traseira	0,024	3,98	0,03	0,25
Tecto	0,030	7,81	-	-
Chão	0,043	9,28	-	-

As espessuras das paredes, do chão e do tecto da caravana foram obtidas através da medição de três amostras disponibilizadas pela Campinanda. A espessura das janelas foi obtida medindo directamente na caravana. O volume interior da caravana foi calculado a partir da estimativa da ocupação de volume de ar interior multiplicado pelo volume exterior da caravana.

Através das amostras das diversas superfícies da caravana foi possível verificar que as paredes, chão e tecto são constituídos por vários materiais. Houve ainda a necessidade de separar as propriedades do chão e do tecto pois além dos diferentes materiais que possuem, têm ainda algumas camadas com reforço em madeira. Considerou-se que a percentagem de madeira presente no chão seria de 20% e no tecto de 15%. De referir ainda que considerou-se as propriedades da madeira idênticas às do contraplacado. Os materiais constituintes de cada superfície estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Materiais constituintes da caravana

Superfície	Material		
Paredes	Alumínio	Poliestireno expandido	Contraplacado
Espessura [m]	0,001	0,020	0,003
Chão	Contraplacado	Poliestireno expandido	Contraplacado
Chão com travessas	Contraplacado	Madeira	Contraplacado
Espessura [m]	0,003	0,030	0,010
Tecto	Poliéster	Poliestireno expandido	Contraplacado
Tecto com travessas	Poliéster	Madeira	Contraplacado
Espessura [m]	0,002	0,025	0,003

Na Tabela 3.3 são apresentadas as propriedades dos materiais constituintes da caravana, [41], [42], [43].

Tabela 3.3. Propriedades dos materiais constituintes da caravana

Propriedade		Material				
		Poliestireno expandido	Contraplacado	Poliéster	Alumínio	Acrílico
Condutibilidade Térmica	λ [W/m.K]	0,042	0,17	0,275	230	0,2
Massa específica	ρ [kg/m ³]	20	700	1350	2700	1185
Calor específico	C_p [J/kg.K]	1300	2310	1275	871	1460

3.2. Medição das infiltrações

Um dos elementos influentes nas cargas térmicas de uma caravana, de um veículo ou espaço semelhante são as infiltrações. Para quantificar as massas de ar envolvidas nas trocas de calor entre o exterior e interior da caravana recorreu-se à técnica dos gases traçadores.

Para realizar estas medições, foi utilizado um equipamento de análise multi-gás, modelo 1312, fabricado pela INNOVA, que usa o gás Hexafluoreto de Enxofre (SF₆) como gás traçador. O gás foi introduzido na caravana até atingir uma concentração previamente estipulada, 1000 ppm, valor este que se considerou uniforme na interior da caravana algum tempo depois. Posto isto, procedeu-se à medição da variação da concentração do gás ao longo de vários intervalos de tempo. Os valores das medições são apresentados no Anexo A.

Para o cálculo das infiltrações na caravana recorreu-se à seguinte expressão:

$$\bar{I} = \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad (3.1)$$

A partir da formulação apresentada, [44], foram calculados os valores das infiltrações em cada instante presentes na caravana. A representação dos valores das concentrações em função do tempo num gráfico $\ln(c)$ versus tempo é apresentada de seguida, Figura 3.1.

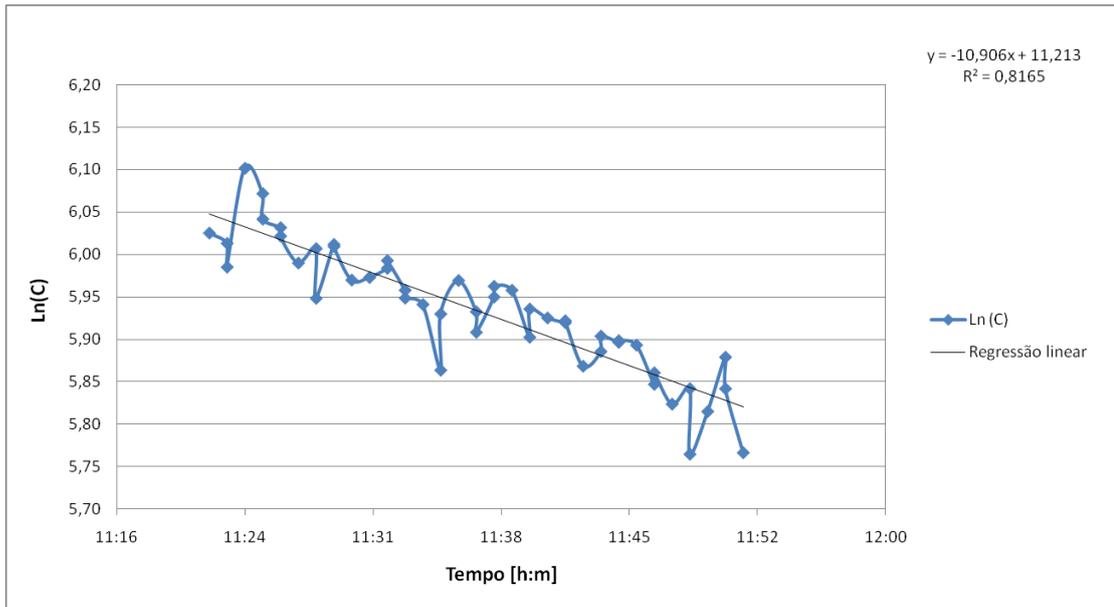


Figura 3.1. Representação dos valores da concentração de gás traçador durante o período de teste sem isolamento

O declive da recta de melhor ajuste aos dados experimentais, apresentada na Figura 3.1, é em valor absoluto igual ao número de infiltrações por hora na caravana. Os valores apresentados foram limitados a uma zona de pontos de medição estável visto que os valores iniciais das medições sofrem grandes variações pois a concentração de gás no interior da caravana ainda não é uniforme, o que iria influir de forma negativa no resultado final do cálculo. Assim, o número de renovações de ar por hora é de aproximadamente 11.

Verificou-se posteriormente que o chão da caravana possuiu vários orifícios nos quais passam alguns cabos e tubos, assim como no tecto existem alguns respiros, Figura 3.2.



Figura 3.2. Orifícios presentes no interior da caravana

Optou-se por realizar um novo teste mas desta vez com esses mesmos orifícios isolados para deste modo termos um modelo de comparação com os testes previamente realizados. Os resultados obtidos foram e estão apresentados na Figura 3.3:

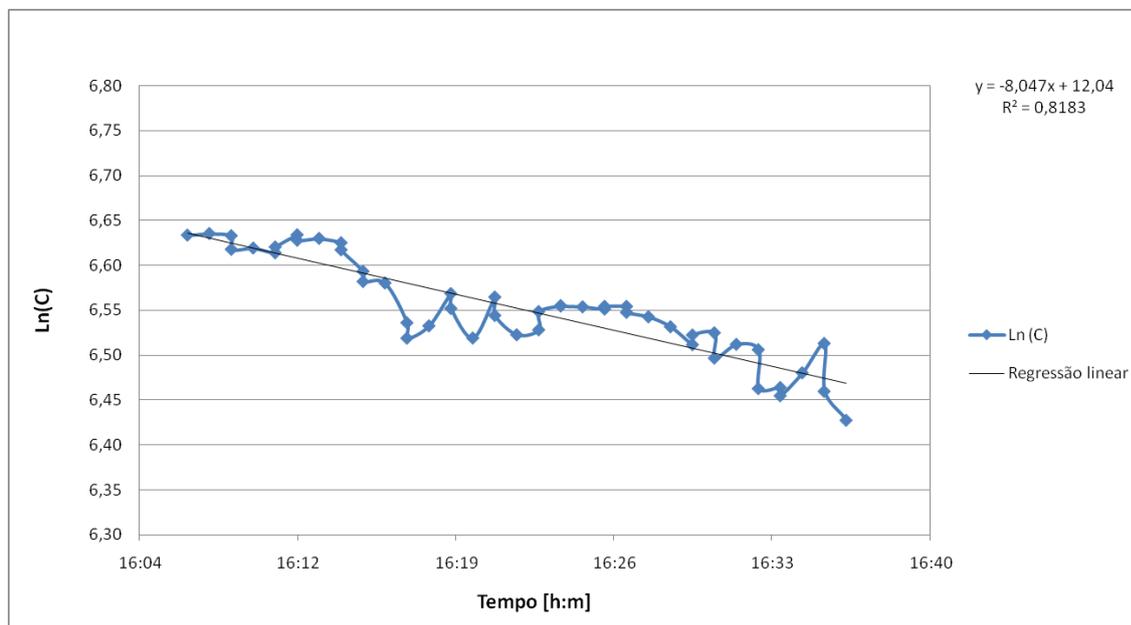


Figura 3.3. Representação dos valores da concentração de gás traçador durante o período de teste com isolamento

Como seria de esperar, o número de renovações de ar diminuiu sendo o valor obtido consideravelmente mais baixo, 8.

Comparando os dois gráficos apresentados para os dois casos, sem e com isolamento dos orifícios, podemos verificar que os valores das renovações de ar diferem bastante sendo o segundo caso bem mais favorável que o primeiro. Ainda de assinalar que na medição sem isolamento, os valores de concentração sofrem flutuações elevadas quando comparadas as medições com isolamento. Para efeitos de cálculo e dimensionamento toma-se o valor do pior caso como o de referência ou seja, 11 renovações de ar por hora.

3.3. Medição de temperaturas

As medições de temperatura na caravana tiveram como objectivo conhecer a evolução das temperaturas do ar no interior da caravana ao longo de um dia ou sucessão de vários dias. Estas temperaturas serão importantes para as simulações, tal como será apresentado mais à frente.

Para realizar tais medições, foi usado um “datalogger” de medição de humidade e temperatura da Testo, modelo 175-H1, que foi colocado no interior da caravana. As medições foram realizadas durante os meses de Setembro e Outubro no Porto de 2009. Para este período de medições, seleccionaram-se os dias mais quentes para posteriormente se efectuarem simulações. As temperaturas máximas medidas são apresentadas na Figura 3.4 e correspondem aos dias 23 de Setembro e 12 e 14 de Outubro de 2009.

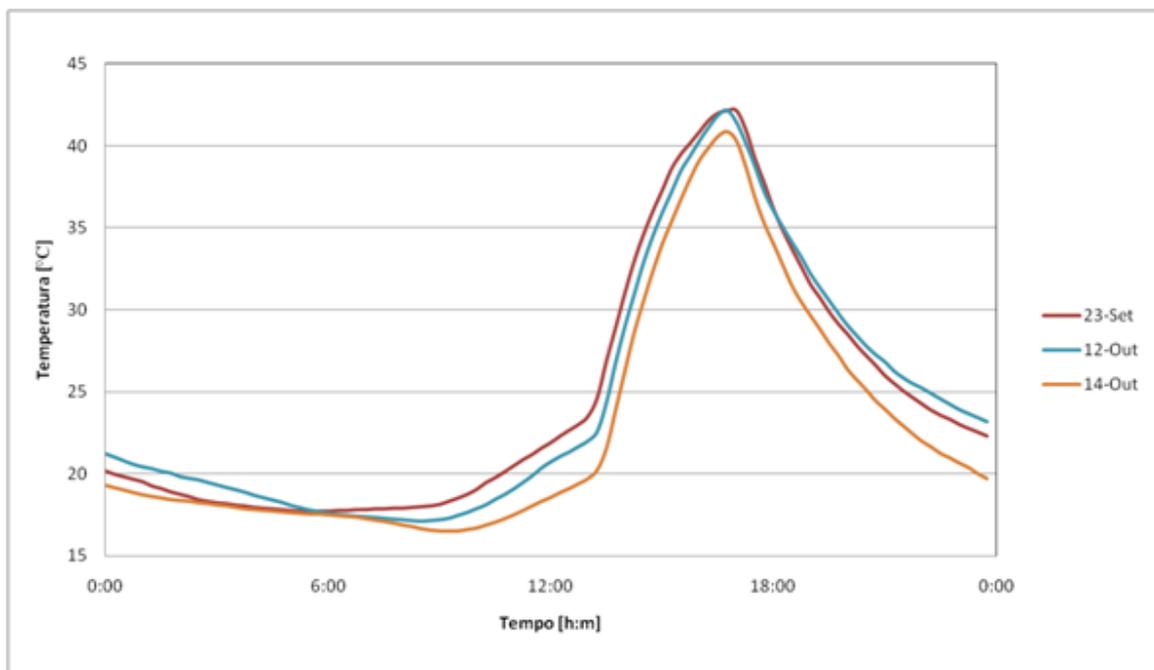


Figura 3.4. Evolução das temperaturas do interior da caravana no dia 14 de Outubro de 2009

Como se pode constatar através da figura, no interior da caravana atingem-se valores de temperatura muito elevados, 42°C. Os valores obtidos nas medições são apresentados no Anexo B.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

4. Cargas térmicas

Para projectar um sistema de refrigeração para uma caravana ou outro espaço ou veículo, é necessário calcular a potência calorífica que este terá que retirar do interior desses mesmos espaços. Assim, serão apresentadas de seguida as cargas térmicas relativas à caravana usada para este estudo, para as condições de projecto relativas à região mais desfavorável em Portugal, Moura.

4.1. Cálculo das cargas térmicas de arrefecimento

A carga térmica de arrefecimento, é a potência térmica que é necessário retirar a um espaço, de modo a que a temperatura no seu interior seja igual à temperatura de projecto, definida para o interior desse mesmo espaço.

A carga térmica, corresponderá à sobreposição dos vários efeitos que provocam o aquecimento da caravana, sendo os mais importantes os seguintes, [45]:

- Ganhos pela envolvente opaca - $\dot{Q}_{Envolvente}$;
- Ganhos pelos envidraçados - $\dot{Q}_{Envidraçados}$;
- Ganhos associados às Infiltrações - $\dot{Q}_{Infiltrações}$;
- Ganhos Internos - $\dot{Q}_{Internos}$.

4.1.1. Ganhos pela envolvente opaca

Os ganhos pela envolvente opaca representam as trocas de calor entre o exterior e o interior por condução, convecção e radiação devido à temperatura ambiente e à radiação solar. O cálculo faz-se a partir das seguintes expressões:

$$\dot{Q}_{Envolvente} = U_i \cdot A_i \cdot (T_{ar-sol} - T_{int}) \quad (4.1)$$

$$T_{ar-sol} = T_{ext} + \frac{\alpha \cdot I_i}{\alpha_{Conv}} \quad (4.2)$$

4.1.2. Ganhos pelos envidraçados

Ganhos associados às trocas de calor entre o exterior e interior devido à temperatura ambiente e a radiação solar incidente em cada janela. Na radiação incidente nos envidraçados, temos de ter em conta duas componentes, uma relativa à potência absorvida e outra relativa à potência transmitida para o interior.

A equação que define os ganhos solares pelos envidraçados é:

$$\dot{Q}_{Envidraçados} = A_i \cdot [\tau_i \cdot I_i + U_i \cdot (T_{ar-sol} - T_{int})] \quad (4.3)$$

4.1.3. Ganhos associados às infiltrações

A potência calorífica devido às infiltrações é dada por, [44]:

$$\dot{Q}_{Infiltra\ ç\ ões} = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (4.4)$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = V \cdot \bar{I} \cdot \rho \quad (4.5)$$

4.1.4. Ganhos internos

Este tipo de ganhos tem a sua origem em duas fontes possíveis, as pessoas e os aparelhos eléctricos presentes no interior da caravana. Neste caso, considerou-se que os ganhos provenientes das pessoas teriam um peso mais significativo no balanço final. Assim, considerou-se que os ganhos associados aos aparelhos eléctricos são por isso desprezáveis face aos ganhos provocados pela presença de pessoas.

4.2. Coeficientes de transmissão térmica

De forma a proceder-se ao cálculo das cargas térmicas associadas às transferências de calor pela envolvente opaca e envidraçados, tem que se definir os coeficientes de transmissão térmica, U, de cada parede e janela. Para tal, é necessário calcular as respectivas resistências térmicas associadas a cada superfície.

4.2.1. Resistências térmicas

Depois de conhecidas as propriedades dos materiais usados na caravana, Tabela 3.3, podem-se agora calcular as resistências térmicas associadas a todas as superfícies da caravana. Estas foram determinadas fazendo uso das resistências térmicas tanto em série como em paralelo. As equações que as definem são, [46]:

$$R_{Equivalente, série} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{R_{Equivalente, paralelo}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (4.7)$$

As resistências de condução foram calculadas pela soma das resistências térmicas de cada material presente nas paredes, chão e tecto da caravana. No entanto no chão e tecto, visto terem mais uma camada de material de composição diferente, a resistência equivalente será dada pela soma das resistências em paralelo das duas camadas constituintes. A resistência por condução em cada parede é dada por:

$$R_{Condu\ ç\ ão, equivalente} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (4.8)$$

Relativamente a resistência térmica por convecção, esta é definida a partir da seguinte expressão:

$$R_{Convecção} = \frac{1}{\alpha_{conv}} \quad (4.9)$$

No entanto, as resistências térmicas associadas à convecção tanto interior como exterior podem ser obtidas a partir de valores de coeficientes de convecção geralmente usados para o cálculo de cargas térmicas de projecto para o verão. As resistências interiores têm em consideração o sentido dos fluxos de calor tendo em conta uma determinada velocidade do ar enquanto as exteriores são para uma velocidade do vento de projecto, [10].

Os valores usados para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica das paredes, chão e tecto estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resistências térmicas associadas à convecção interior e exterior [10]

Superfície	$R_{Convecção,interior}$ [m ² .K.W ⁻¹]	$R_{Convecção,exterior}$ [m ² .K.W ⁻¹]	$\alpha_{Convecção,interior}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	$\alpha_{Convecção,exterior}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Chão	0,1	0,04	10	25
Paredes	0,13	0,04	7,7	25
Tecto	0,17	0,04	5,9	25

4.2.2. Coeficientes de transmissão térmica da caravana

Depois de definidas as resistências térmicas, o coeficiente de transmissão térmica de uma parede, [W.m⁻².K⁻¹], é determinado da seguinte forma, [10]:

$$U = \frac{1}{R_{Conv,ext} + R_{Condução\ equivalente} + R_{Conv,int}} \quad (4.10)$$

Os resultados dos coeficientes de transmissão térmica para cada parede, tecto e chão estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resultados das resistências térmicas e coeficientes de transmissão térmicas para todas as paredes

Lado	Coeficientes de transmissão térmica das paredes					
	Espessura [m]	Área [m ²]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Req [m ² .K.W ⁻¹]	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	A.U [W/K]
Frente	0,024	3,44	0,0486	0,664	1,506	5,18
Direita	0,024	7,50	0,0486	0,664	1,506	11,30
Esquerda	0,024	7,75	0,0486	0,664	1,506	11,67
Traseira	0,024	3,98	0,0486	0,664	1,506	5,99
Tecto	0,030	7,81	0,0605	0,706	1,415	11,05
Chão	0,043	9,28	0,0728	0,731	1,368	12,70

Em relação aos envidraçados, as equações continuam a ser válidas. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 4.3. Resultados das resistências térmicas e coeficientes de transmissão térmica para todas as janelas

Lado	Coeficientes de transmissão térmica das Janelas					
	Espessura [m]	Área [m ²]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Req [m ² .K.W ⁻¹]	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	A.U [W/K]
Frente	0,003	0,78	0,200	0,185	5,405	4,22
Direita	0,003	0,60	0,200	0,185	5,405	3,24
Esquerda	0,003	0,35	0,200	0,185	5,405	1,89
Traseira	0,003	0,25	0,200	0,185	5,405	1,35

4.3. Cargas térmicas totais

As cargas térmicas totais são o somatório de todos os ganhos acima enunciados.

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Envolvente} + \dot{Q}_{Envidraçados} + \dot{Q}_{Infiltrações} + \dot{Q}_{Internos} \quad (4.11)$$

Para o dimensionamento do sistema termoelétrico, as cargas térmicas serão calculadas para determinadas condições de projecto. Visto que uma caravana não tem uma localização exacta, as cargas térmicas têm que ser calculadas para o local que apresenta as condições mais desfavoráveis em termos de temperatura e radiação solar.

Segundo o RCCTE, o local com condições mais desfavoráveis para o cálculo das necessidades energéticas de arrefecimento é Moura, sendo a temperatura exterior de projecto típica para desta região é de 37°C. A temperatura interior de projecto para o cálculo das cargas térmicas de arrefecimento é de 25°C. [45]

Para o cálculo da componente de radiação dos ganhos pela envolvente opaca e envidraçados foi determinada a radiação crítica tendo como base o ano referência típico (TRY) de Moura. Foi então realizado um cálculo dos ganhos solares por radiação em cada superfície, sendo a frente a referência, de modo a determinar qual seria a orientação da caravana mais desfavorável. Verificou-se que a pior situação seria ter a caravana com a frente virada a sul. Os respectivos valores de radiação global incidente em cada superfície para o pior caso estão na Tabela 4.4. [47]

Tabela 4.4. Valores de radiação global incidente em cada superfície

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

Os resultados das cargas térmicas calculadas para a região de Moura serão de seguida apresentados.

Ganhos pela envolvente opaca

Os ganhos pela envolvente opaca foram calculados a partir da equação 4.1. A equação 4.2, traduz a componente relativa à radiação solar incidente em cada superfície da caravana contabilizada através da temperatura fictícia ar-sol, T_{ar-sol} . Esta temperatura foi definida por Mackey e Wright [48] como sendo a temperatura do ar que, na ausência de trocas de calor por radiação, produz exclusivamente por convecção, na superfície exterior, o mesmo fluxo de calor que existe nas condições reais devido a trocas de calor por absorção da radiação solar, emissão de energia de grande comprimento de onda e convecção para o ar exterior. Foi considerado um coeficiente de absorção das paredes de 0,4.

A potência calorífica associada à envolvente opaca da caravana assim como os dados usados para os respectivos cálculos estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Ganhos pela envolvente opaca

Ganhos pela envolvente opaca					
Lado	Área [m ²]	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	A.U [W/K]	I _i [W/m ²]	$\dot{Q}_{Envolvente}$ [W]
Frente	3,44	1,506	5,18	268	84,37
Direita	7,50	1,506	11,30	669	160,01
Esquerda	7,75	1,506	11,67	135	264,96
Traseira	3,98	1,506	5,99	135	84,82
Tecto	7,81	1,415	11,05	835	280,23
Chão	9,28	1,368	12,70	-	152,40

$$\dot{Q}_{Envolvente, Total} = 1027 W$$

Ganhos pelos envidraçados

A equação 4.3 é a base de cálculo dos ganhos pelos envidraçados presentes na caravana. Os termos relativos à radiação foram determinados de forma análoga aos ganhos pela envolvente opaca, considerando a temperatura fictícia ar-sol. O coeficiente de transmissão do vidro usado nas janelas da caravana é de 0,61 enquanto o coeficiente de absorção do vidro foi considerado 0,04, [49]. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Ganhos pelos envidraçados

Ganhos pelos envidraçados					
Lado	Área [m ²]	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	A.U [W/K]	I _i [W/m ²]	$\dot{Q}_{Envidraçados}$ [W]
Frente	0,78	5,405	4,22	268	179,91
Direita	0,60	5,405	3,24	669	89,03
Esquerda	0,35	5,405	1,89	135	37,09
Traseira	0,25	5,405	1,35	135	167,56

$$\dot{Q}_{Envidraçados, Total} = 474 W$$

Ganhos associados às infiltrações

Depois de calculado o número de renovações de ar por hora, Capítulo 3, e baseados na equação 4.4 o valor dos ganhos associados às infiltrações é o apresentado na seguinte Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Ganhos associados às infiltrações

Ganhos associados as infiltrações				
V [m ³]	I [s ⁻¹]	ρ_{ar} [kg/m ³]	Cp [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	$\dot{Q}_{Infiltrações}$ [W]
12	3,1*10 ⁻³	1,146	1005	508

$$\dot{Q}_{Infiltrações} = 508 W$$

Ganhos internos

Como referido em 4.1.4, só serão contabilizados os ganhos internos associados à presença de pessoas no interior da caravana. A caravana tem capacidade para acolher 4 pessoas e considerando que libertam em média 120 W por pessoa, [50], o valor total de ganhos internos é o apresentado.

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

Após o cálculo de todos os componentes das cargas térmicas da caravana para a região de Moura, o valor total que será usado para efeitos de dimensionamento será dado pela equação 4.11. Assim o valor é o seguinte:

$$\dot{Q}_{Total} = 2488 W$$

Posto isto, de seguida será apresentado o dimensionamento do sistema de refrigeração termoelétrico para uma carga de aproximadamente 2500 W.

5. Selecção de equipamento

Quando se pretende escolher um sistema de aquecimento ou arrefecimento deve-se ter em consideração alguns aspectos importantes. A selecção de sistemas com potências, tanto abaixo como acima do necessário poderão provocar aos utilizadores prejuízo tanto ao nível de conforto, no primeiro caso, como investimentos desmedidos no segundo. No caso de um sistema de refrigeração termoelétrico, é muito importante conhecer as potências caloríficas assim como o valor das temperaturas pretendidas, pois desta forma poder-se-á seleccionar um sistema que melhor se adapte às necessidades. Relativamente ao sistema fotovoltaico, a variação da disponibilidade da fonte de energia, Sol, é a maior preocupação aquando da sua escolha, tal como o local, orientação e inclinação do painel e valor da carga a alimentar.

5.1. Selecção do sistema termoelétrico

A escolha de um arrefecedor termoelétrico está essencialmente dependente do valor da potência calorífica a retirar e das temperaturas de projecto, tanto interior como exterior. Para escolher o arrefecedor foram calculadas as cargas térmicas associadas às temperaturas de projecto definidas previamente. Os cálculos estão apresentados no capítulo anterior.

Assim, foi definida uma temperatura interior de projecto de 25°C e uma temperatura ambiente exterior de 37°C, sendo a quantidade de calor a remover do interior da caravana dada pelo valor total das cargas térmicas calculadas. O sistema termoelétrico de refrigeração terá então que ter capacidade para retirar 2500W de potência calorífica do interior da caravana.

Após consulta de vários fabricantes, EIC Solutions, Melcor, INB Thermoelectric, TECA (ThermoElectric Cooling America Corporation), verificou-se que não existem actualmente no mercado módulos termoelétricos com tanta capacidade, por isso a escolha recaiu no módulo com a maior potência disponível no mercado.

A escolha incidiu no modelo Ar-Ar AAC-151-4XT-HC, da empresa EIC Solutions, [51]. Esta empresa, com sede nos EUA, é especializada na concepção e produção de invólucros electrónicos e sistemas de refrigeração termoelétricos. Na Figura 5.1 está apresentada esquematicamente o funcionamento do modelo escolhido.

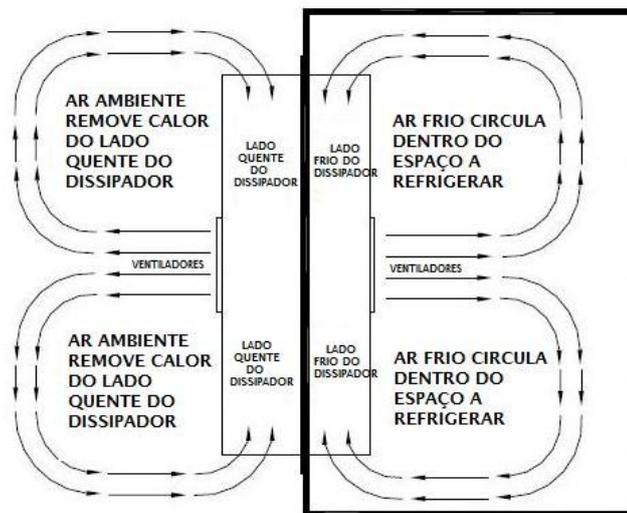


Figura 5.1. Representação esquemática do funcionamento do módulo AAC-151-4XT-HC

O módulo escolhido tem uma potência de refrigeração de 735 W, tendo um COP de 0,4. Este módulo tem a possibilidade de funcionar também como aquecedor, sendo a gama de temperaturas de funcionamento de -30 a 60°C. O controlo de temperatura deste sistema é feito através de um termóstato ajustável já integrado, dispensando assim a compra de um. Funcionando em modo de aquecimento, o termóstato é programado para funcionar entre 8 e 13°C enquanto no modo de refrigeração este é programado para que a temperatura nunca desça abaixo dos 18-20°C.

Os módulos termoeléctricos deste sistema de refrigeração possuem em ambos os lados dissipadores de calor de alta performance em alumínio, ventiladores centrífugos de alta velocidade e uma concepção electrónica patenteada capaz de bombear o calor do interior do espaço a refrigerar para o exterior, sem expor a sua electrónica a agentes contaminantes do ar exterior. A Figura 5.2 apresenta o módulo escolhido e nela podemos ver os ventiladores citados anteriormente.



Figura 5.2. Módulo Ar-Ar AAC-151-4XT-HC da EIC Solutions

De seguida enumeram-se as características mais importantes do módulo AAC-151-4XT-HC:

- Capacidade: 735 W de potência de aquecimento/arrefecimento;
- COP: 0,4;
- Gama de temperaturas de funcionamento: -30 a 60 °C;
- Controlo de temperatura: termóstato ajustável;
- Power: 120 VAC 9,5 Amps o 240 VAC a 4,6 Amps;
- Frequência: 50/60 Hz;
- Tipo de montagem: vertical ou horizontal;
- Peso: 35 kg;
- Dimensões: 600x500x210 (mm)

No Anexo C é apresentado o desenho técnico do sistema termoeléctrico.

O tipo de montagem a efectuar é muito importante para um bom funcionamento e performance do sistema. Este sistema é passível de se instalar tanto na vertical, nas paredes, como na horizontal, no tecto. É fundamental garantir que na proximidade dos dissipadores de calor e dos ventiladores não existam obstáculos que impeçam um bom escoamento do ar, pois

dessa forma o sistema terá uma performance otimizada evitando também problemas de funcionamento. Na Figura 5.3 está representado o esquema de montagem na vertical.

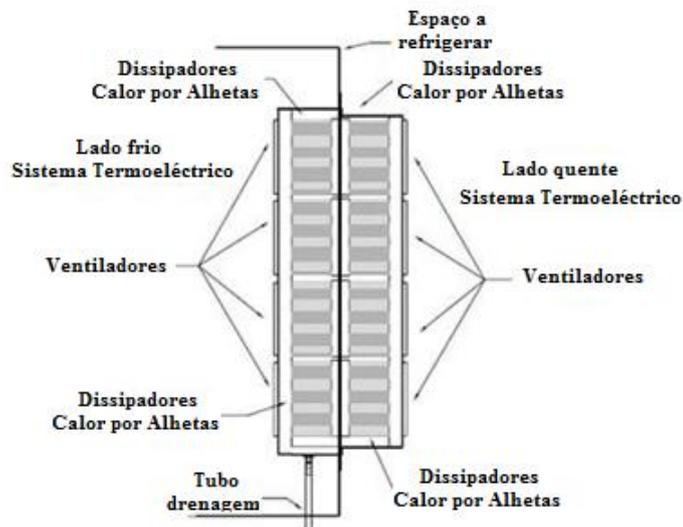


Figura 5.3. Posição de montagem na vertical

Na montagem do módulo na vertical, os dissipadores de calor ficam sempre orientados para a esquerda ou direita e nunca para cima ou baixo, como acontece na montagem na horizontal. Estes módulos possuem um tubo de drenagem que, no caso da montagem na vertical, é fixado na parte inferior do lado frio sendo de seguida conduzido para o exterior. Quanto à montagem na horizontal, o tubo de drenagem está instalado na parte inferior do lado frio, como demonstra esquematicamente a Figura 5.4

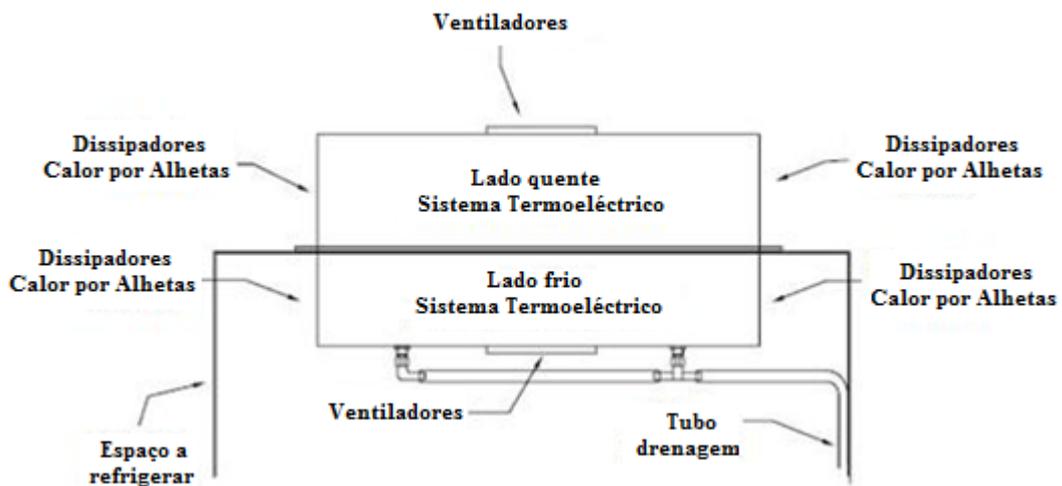


Figura 5.4. Montagem na horizontal

No caso de uma caravana, a montagem poderá ser realizada tanto na vertical como na horizontal. No entanto, uma solução poderia passar pela instalação no tecto da caravana, pois desta forma poder-se-ia usar um pleno, tecto falso, para promover a distribuição uniforme de

ar por toda a caravana. Neste pleno poderiam ser usados vários orifícios de saída de ar para as diversas divisões da caravana, realizando a distribuição de ar onde fosse necessário.

Como visto anteriormente, a potência do módulo termoelétrico escolhido é bastante inferior à carga térmica total calculada para a caravana. Assim, para que se consiga perfazer a carga térmica total seria necessário usar 4 módulos. Contudo, o sistema estaria sobredimensionado, o que levaria a um incremento substancial em termos económicos, por isso consideraram-se apenas 3 módulos, fazendo com que a potência total seja de aproximadamente 2200 W.

Na realidade, o sistema de refrigeração está subdimensionado mas tendo em consideração as condições de projecto, temperaturas e radiação, verifica-se que estas se apresentam poucas vezes durante os períodos mais quentes de um ano, não representando assim um grande desconforto térmico ao utilizador.

O calor dissipado pelo sistema de refrigeração poderá eventualmente ainda ser utilizado. Assim a sua energia térmica poderia ser aproveitada para um pré-aquecimento de águas sanitárias através de um sistema de recuperação de calor.

5.2. Selecção dos painéis fotovoltaicos

A selecção dos painéis fotovoltaicos tem como base a necessidade energética do arrefecedor termoelétrico. Além da energia eléctrica a fornecer, as restrições físicas da caravana são o factor mais importante.

A caravana tem uma área disponível no tecto de aproximadamente 7,8 m² mas no entanto esta área não está totalmente disponível para instalação de painéis. A presença de respiros e clarabóia e a possibilidade de instalação do sistema de refrigeração no tecto da caravana limitarão de forma considerável a área disponível. Outro factor importante a ter em conta é o de os painéis não poderem estar inclinados devido a questões de aerodinâmica quando a caravana está em movimento. Assim, considerou-se que estariam disponíveis aproximadamente 5 m² de área disponível para os painéis.

5.2.1. Cálculo do sistema fotovoltaico

A necessidade energética do sistema de refrigeração ao longo da estação de arrefecimento não é constante, estando directamente dependente das condições climáticas tal como a produção eléctrica dos módulos fotovoltaicos. Para avaliar a variabilidade da produção e consumo de energia foi realizado um balanço energético. Este balanço contempla a produção de energia eléctrica e o consumo de energia do arrefecedor entre Maio e Setembro dos anos típicos do Porto e Moura.

Para conhecer a potência eléctrica necessária para o sistema de refrigeração recorreu-se à definição de COP de um sistema termoelétrico dada por, [10]:

$$COP_{TEC} = \frac{\dot{Q}_{TEC}}{P_{\text{Eléctrica}}} \quad (5.1)$$

Considerado o COP de 0,4 e a potência do sistema de refrigeração de 2200W, o valor máximo de potência eléctrica a fornecer é de 5500W.

A energia produzida num sistema fotovoltaico foi calculada, recorrendo à expressão geral do cálculo do rendimento médio de um painel fotovoltaico. A potência eléctrica produzida pelo sistema fotovoltaico é dada pela seguinte formulação:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{elétrica}}{\dot{Q}_{incidente}} \quad (5.2)$$

O rendimento é dado por [52],

$$\eta \cong \eta_{ref} [1 - \beta \cdot (T_{ext} - T_{ref}) - \beta \cdot \frac{\dot{I} \cdot \tau \alpha}{K} \cdot (1 - \eta_{ref})] \quad (5.3)$$

Deste modo foram calculados os valores horários da carga térmica total que a caravana estaria sujeita, a energia necessária para alimentar o sistema de refrigeração e a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos. No Anexo D apresentam-se os valores máximos de carga térmica e produção de energia calculados para os dias mais desfavoráveis em Moura e no Porto. Para tal usaram-se como valores de referência, dados relativos a células de silício monocristalino. Os valores de referência estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Valores usados no cálculo do balanço energético [52]

Valores de referência usados						
η_{ref}	$T_{Ref} [^{\circ}C]$	$\beta [K^{-1}]$	$\tau \alpha$	$K [W/m^2 \cdot K^{-1}]$	$A_{pv} [m^2]$	COP
0,15	0	0,004	0,7	25	5	0,4

Os resultados obtidos estão apresentados nas seguintes figuras:

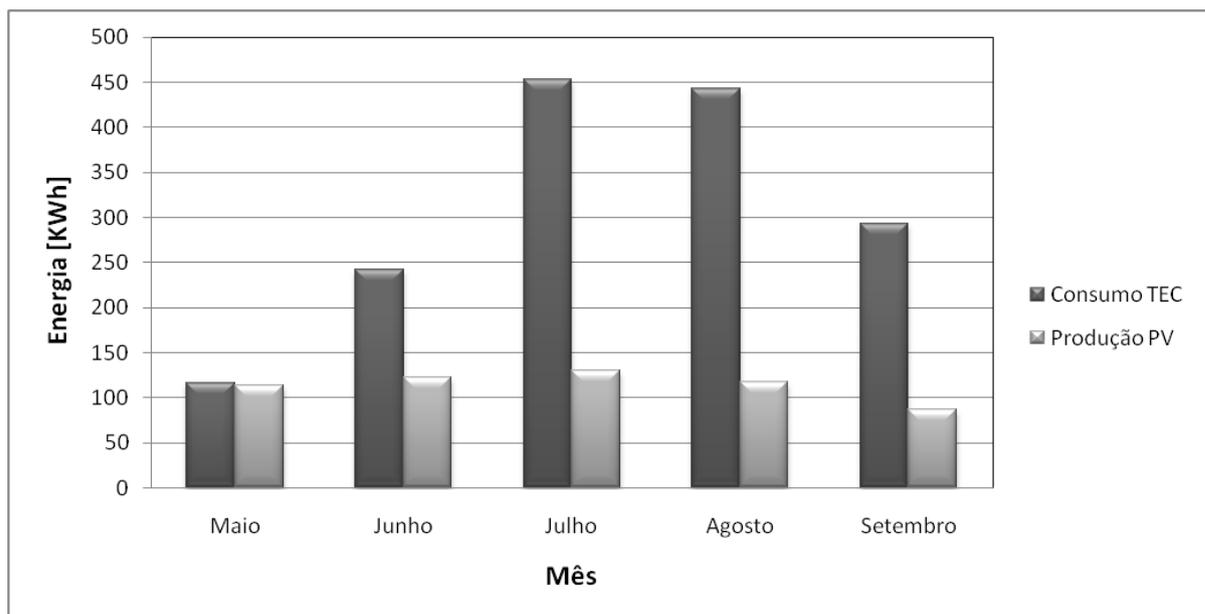


Figura 5.5. Consumo e produção acumulada no Porto

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os valores do consumo e produção de energia acumulada por mês na região do Porto e Moura. A diferença entre consumo e produção de energia em ambos casos é bem visível para os meses mais quentes e deve-se sobretudo ao COP do sistema de refrigeração que é baixo e também à área disponível para instalação de módulos fotovoltaicos.

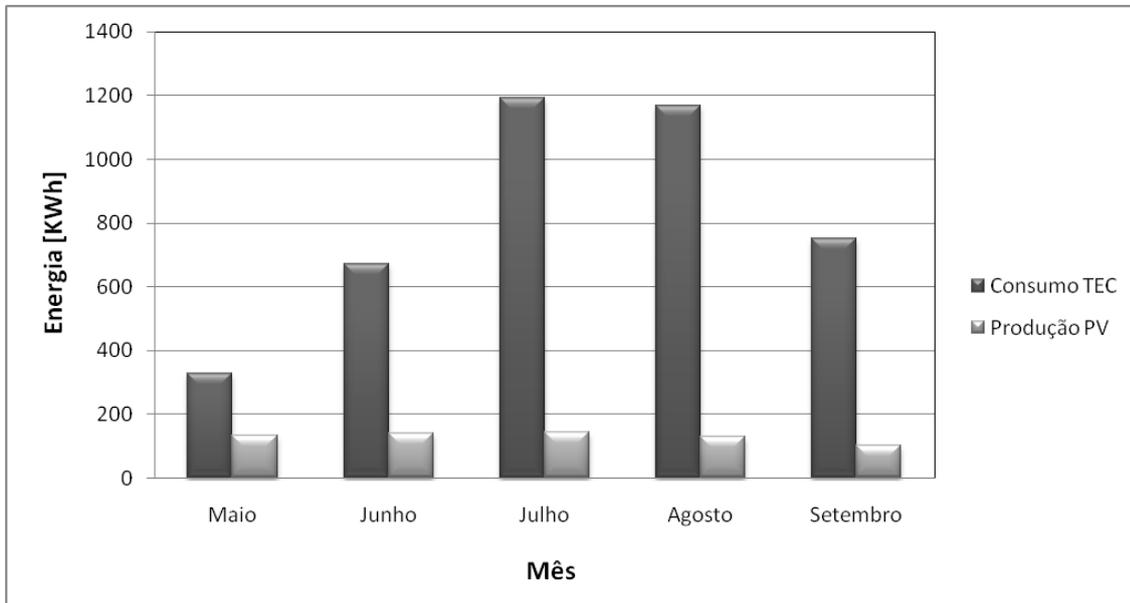


Figura 5.6. Consumo e produção acumulada na região de Moura

O efeito da localização da caravana também é muito importante. No Porto, as condições climáticas não são tão adversas como em Moura, onde se registam elevados valores de temperatura e radiação, por isso em termos de consumo de energia existe uma diferença muito grande entre ambos. No que se refere à produção de energia a diferença é muito pequena devendo-se principalmente ao rendimento dos painéis fotovoltaicos que é bastante penalizado quando a temperatura das suas células aumenta e ainda a inclinação do painel.

Relativamente à inclinação do painel, esta encontra-se limitada. O painel, por motivos de aerodinâmica da caravana, tem que estar na horizontal quando a caravana se encontra em movimento. Os cálculos efectuados têm isso em consideração. No entanto, poderá ser criado um mecanismo de auxílio para inclinar o painel, quando a caravana está parada, aumentando assim a energia produzida.

Apesar das diferenças evidenciadas nas figuras acima apresentadas, o sistema fotovoltaico consegue ainda fornecer uma determinada quantidade de energia ao sistema de refrigeração. Essa energia ainda que não seja suficiente para suprir a necessidade total de refrigeração, servirá ainda para produzir algum efeito frigorífico. No caso ideal, para que a produção total de energia fosse suficiente para alimentar o sistema de refrigeração, ter-se-ia que ter uma área de painéis bastante superior. A Figura 5.7 apresenta o caso ideal para o Porto e Moura para uma área de 19 e 45 m² respectivamente.

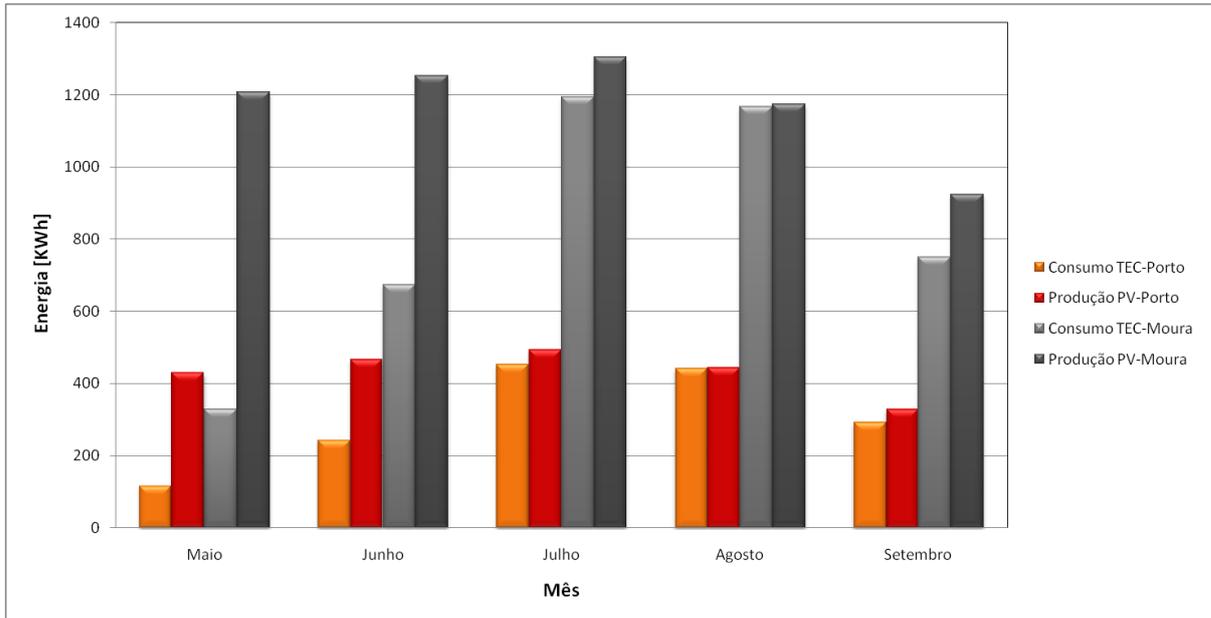


Figura 5.7. Produção de energia para o caso ideal para Porto e Moura

5.2.2. Escolha dos painéis

Depois de analisado o balanço energético apresentado anteriormente, conclui-se que a área disponível no tecto da caravana é escassa quando comparada com a requerida para a produção de energia para suprir as necessidades de refrigeração. Assim, foi realizada uma pesquisa aos módulos disponíveis de alguns fabricantes, de modo a escolher o que melhor se adequa à caravana, tendo em conta parâmetros como eficiência, dimensões e potência.

Da procura realizada foram escolhidos três modelos de marcas diferentes para uma comparação em termos de energia produzida tendo como base os parâmetros referidos anteriormente. A Tabela 5.2 apresenta as principais características dos módulos seleccionados.

Tabela 5.2. Características dos módulos usados para comparação [53]

Marca	Modelo	Tipo Célula	Dimensões [mm]	Eficiência [%]	Potência [W]
Solon	Blue 230/07 (225)	Policristalino	1640*1000*42	13,7	225
Sharp	NU-E235	Monocristalino	1652*994*46	14,3	235
Sanyo	HIP 240 HDE5	HCI	1610*861*35	17,3	240

Foi então calculada a produção de energia horária entre Maio e Setembro com os dados técnicos fornecidos pelos catálogos de cada marca. Para o cálculo do rendimento do módulo fotovoltaico, tendo em conta os dados dos fabricantes, recorreu-se à seguinte expressão, [25]:

$$\eta \cong \eta_{\text{ref}} \left[1 + \beta \cdot (T_{\text{ext}} + i \cdot \frac{\text{NOCT} - 20}{800} - 25) \right] \quad (5.4)$$

Os dados relativos a cada fabricante, usados no cálculo, são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Dados obtidos em cada fabricante

Marca	$\eta_{ref}[\%]$	$\beta [\%/K]$	NOCT [$^{\circ}C$]
Solon	13,7	-0,44	45
Sharp	14,3	-0,485	47,5
Sanyo	17,3	-0,3	45

A produção de energia mensal acumulada associada a cada módulo está representada na Figura 5.8 para os referidos meses. De referir, que o cálculo foi efectuado para a região de Moura e foram considerados 3 módulos, fazendo com que as áreas colectoras variem entre 4,2 para o caso do Sanyo e 4,9 m² no caso do Solon.

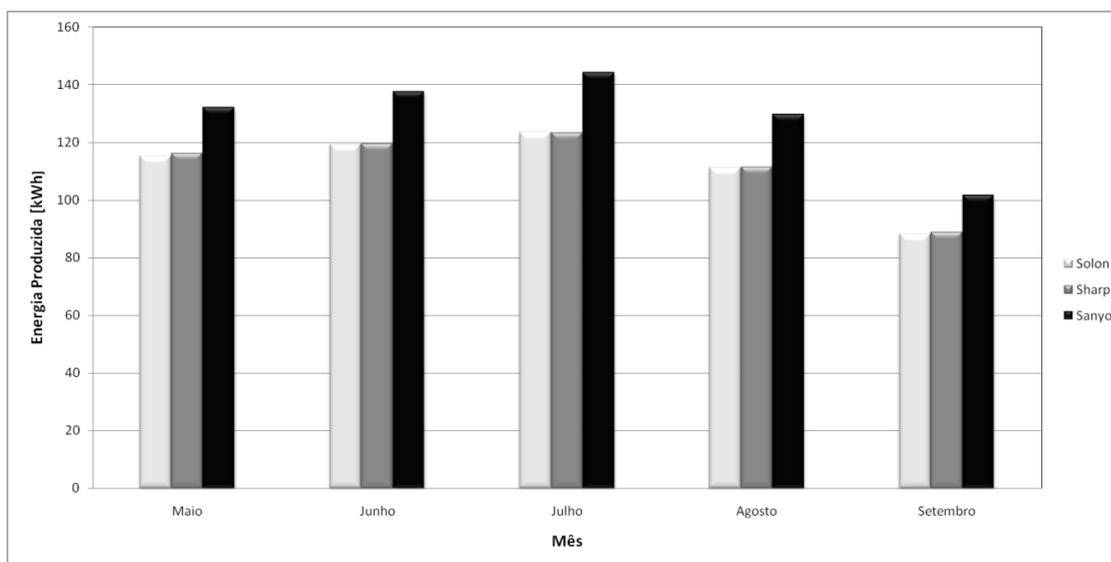


Figura 5.8. Energia produzida pelos módulos de cada fabricante

Analisados os resultados, podemos aferir que o modelo que apresenta maior produção de energia è o da Sanyo, pois além de apresentar uma eficiência superior, consegue aliar uma elevada potência a uma área mais pequena. No Anexo E è apresentada uma tabela com as características de vários módulos encontrados e usados para análise e escolha.

O módulo escolhido foi o HIT-240HDE5 da Sanyo. Este apresenta uma potência nominal de 240W para as condições de teste standard e uma eficiência de módulo de 17,3%, [54]. O módulo escolhido è apresentado na Figura 5.9.

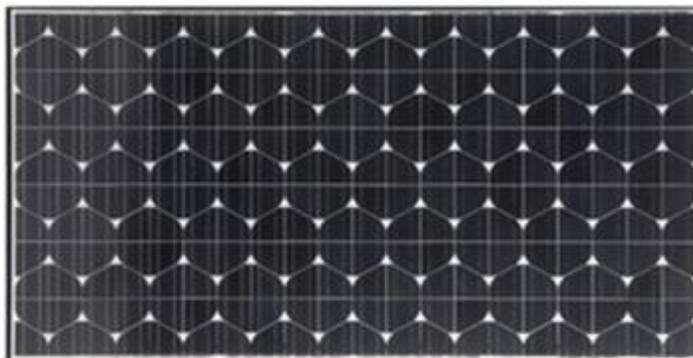


Figura 5.9. Módulo HIT-240HDE5 da Sanyo

O módulo é constituído por células HCI (Heterojunção com uma Camada fina Intrínseca), sendo que estas são constituídas por películas finas de silício monocristalino, envolvidas por películas ultra-finas de silício amorfo. Na Figura 5.10 é apresentada esquematicamente a constituição da célula.

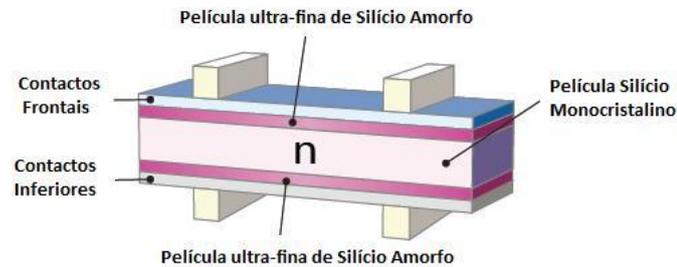


Figura 5.10. Estrutura das células do módulo HIT-240HDE5 da Sanyo

As células HCI apresentam eficiências elevadas quando comparadas com as tradicionais células de silício cristalino, sendo que para este módulo, estas apresentam uma eficiência de 20%. A altas temperaturas, estas células conseguem ainda uma melhor performance do que as convencionais, proporcionando assim um acréscimo de potência produzida na ordem dos 10% como mostra Figura 5.11.

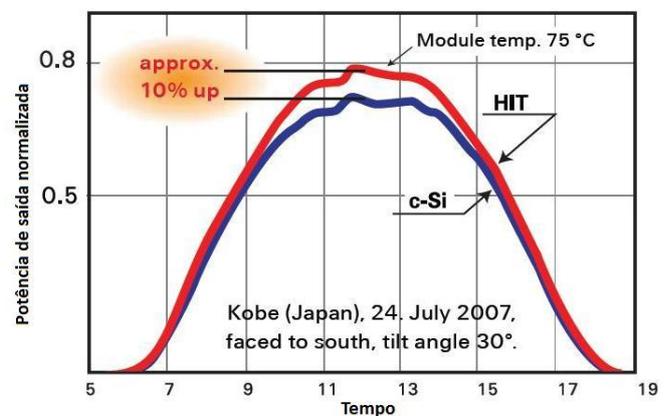


Figura 5.11. Variação da potência produzida ao longo do dia

As células deste módulo apresentam ainda uma particularidade em relação ao seu formato. Estas têm um formato hexagonal, criado a partir de 4 parte de célula fazendo com que uma maior quantidade de material seja depositada no módulo aproveitando assim ao máximo a área disponível do módulo.

De seguida são apresentados na Tabela 5.4 os dados técnicos do módulo HIT-240HDE5 da Sanyo, testado nas condições standard (irradiação de 1000 W/m^2 e temperatura da célula de 25°C).

Tabela 5.4. Dados técnicos do módulo HIT-240HDE5

Dados Técnicos do Módulo	
Potencia Máxima (P_{MAX}) [W]	240
Tensão Máxima (V_{PM}) [V]	35,5
Corrente Máxima (I_{PM}) [A]	6,77
Tensão em circuito aberto (V_{OC}) [V]	43,6
Corrente em curto-circuito (I_{SC}) [A]	7,37
Potencia Mínima garantida (P_{MIN}) [W]	228
Tensão máxima do sistema [V_{DC}]	1000
Coefficiente de temperatura para P_{MAX} [%/ $^\circ\text{C}$]	-0,3
Coefficiente de temperatura para V_{OC} [V/ $^\circ\text{C}$]	-0,109
Coefficiente de temperatura para I_{SC} [mA/ $^\circ\text{C}$]	2,21

No Anexo F, são apresentados mais dados relativos ao módulo nomeadamente, o desenho técnico do mesmo e figuras relativas as curvas características.

Depois descrito o módulo escolhido, e tendo em consideração a sua área e a do tecto da caravana, verifica-se que poderão ser instalados 3 painéis correspondendo a uma área colectora de 4,2 m².

Foram realizados novamente os cálculos apresentados anteriormente de modo a ver qual a produção alcançada com este módulo para o Porto e Moura, assim como a área óptima para ambos.

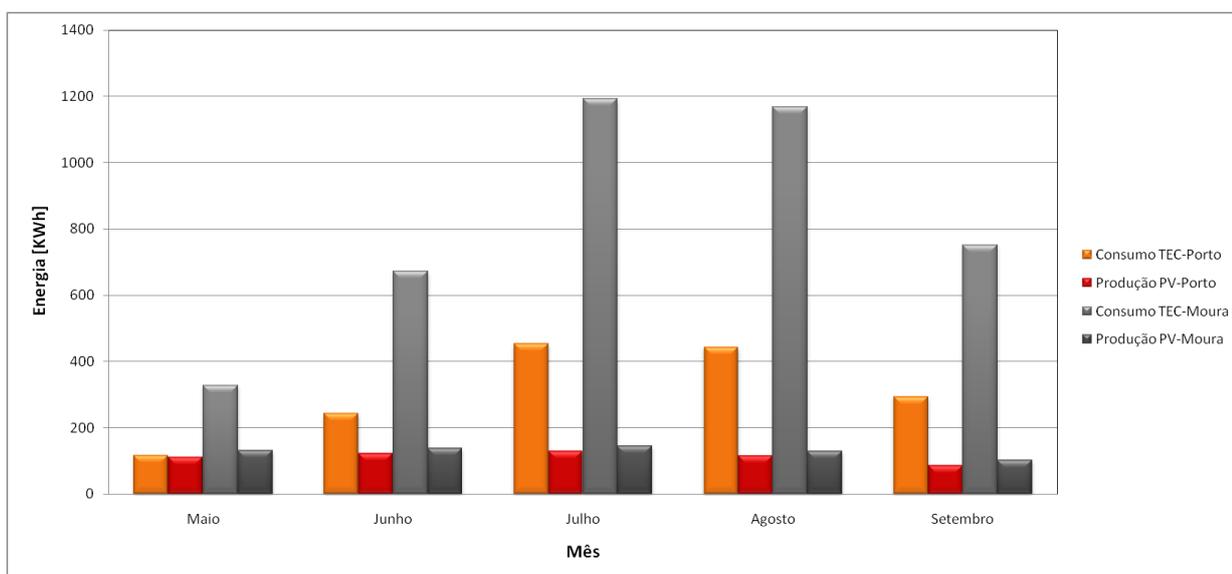


Figura 5.12. Produção e consumo no Porto e Moura com 3 módulos da Sanyo.

Para o caso ideal, com estes painéis, seriam necessários 16 m² para o Porto correspondentes a 12 painéis e para o caso de Moura 38 m² correspondentes a 23 painéis, representando assim uma redução significativa em relação ao calculado anteriormente, 19 e 45 m² respectivamente.

5.3. Considerações finais sobre os sistemas

A escolha do sistema termoelétrico e fotovoltaico foi bastante limitada devido às condições acima apresentadas para a escolha dos mesmos. Os sistemas têm vantagens inegáveis, como apresentado no Capítulo 2, por isso a sua utilização em sistemas móveis como uma caravana impõe-se, apesar dos elevados custos associados. Cada sistema termoelétrico de refrigeração tem um custo de 3600€ (EIC Solutions) e cada sistema fotovoltaico de 975€ (Solarshop-europe.net).

Embora os custos sejam elevados, o conforto térmico dos ocupantes de uma caravana é mais importante, tornando assim imprescindível a utilização de um sistema de refrigeração numa caravana.

6. Simulações

Depois de calculadas as cargas térmicas e realizada a selecção dos sistemas termoelétrico e fotovoltaico para a caravana, foram realizadas várias simulações de modelos aproximados à caravana para que se possam verificar qual o campo de temperaturas presente no seu interior em condições climatéricas adversas, assim como avaliar o comportamento do sistema de refrigeração.

Os modelos utilizados nas simulações foram construídos no software de desenho e criação de malhas Gambit e as simulações no software Fluent 6.3.26, ambos pertencentes à empresa Ansys.

As simulações foram efectuadas para vários casos e para duas localizações específicas, Porto e Moura. As simulações realizadas no Porto, local onde se encontra a caravana e onde foram medidas experimentalmente as temperaturas no seu interior, têm como objectivo a validação do modelo para as condições observadas enquanto as simulações em Moura pretendem verificar o comportamento térmico da caravana quando esta experimenta condições climáticas extremas.

Serão então realizadas simulações dos referidos modelos da caravana para os seguintes casos: simulação dos modelos sem sistema de refrigeração e simulação com o sistema de refrigeração termoelétrico. Desta forma poder-se-á realizar uma comparação entre os resultados das várias simulações e os valores medidos experimentalmente e aferir a evolução das temperaturas no interior da caravana.

6.1. Processo de simulação

Para realizar as simulações foi utilizado o software Fluent 6.3.26. O Fluent é um software CFD usado nas mais diversas simulações em engenharia, especialmente no estudo de escoamentos, aerodinâmica, turbulência, combustão e transferência de calor por isso usado para simular a evolução do campo de temperaturas no interior da caravana, [55]. O recurso a CFD para a realização das simulações permite-nos a criação de um modelo computacional que represente um sistema ou dispositivo que se pretenda estudar ou analisar. A partir deste podem-se aplicar as propriedades físicas de materiais e fluidos assim como as condições de fronteira que este estará sujeito, sendo que depois através dos resultados serão dadas as previsões do comportamento físico e dos fenómenos físicos relacionados, [56].

O processo de simulação CFD é constituído por várias etapas. A primeira etapa é designada por pré-processamento, na qual é analisado o caso de estudo e todos os fenómenos físicos envolvidos, procedendo de seguida à construção de um modelo, criação da respectiva malha e definição das respectivas condições de fronteira. A etapa seguinte é a definição de todos os parâmetros, dados iniciais e condições de fronteira necessários para a realização da simulação. Posteriormente, são recolhidos os resultados através de imagens, gráficos ou animações e é realizada uma análise de modo a verificar a sua qualidade e validade, numa etapa designada por pós-processamento. Caso os resultados sejam satisfatórios, o modelo é dado como válido para as condições inseridas nas simulações senão, ter-se-á que analisar qual a natureza associada aos erros cometidos e se necessário, reformular o modelo e repetir novamente o processo até se atingir os resultados ideais para as condições em que está a ser simulado, ou seja conforme medições experimentais ou cálculos teóricos. A Figura 6.1 apresenta esquematicamente o processo de simulação descrito.

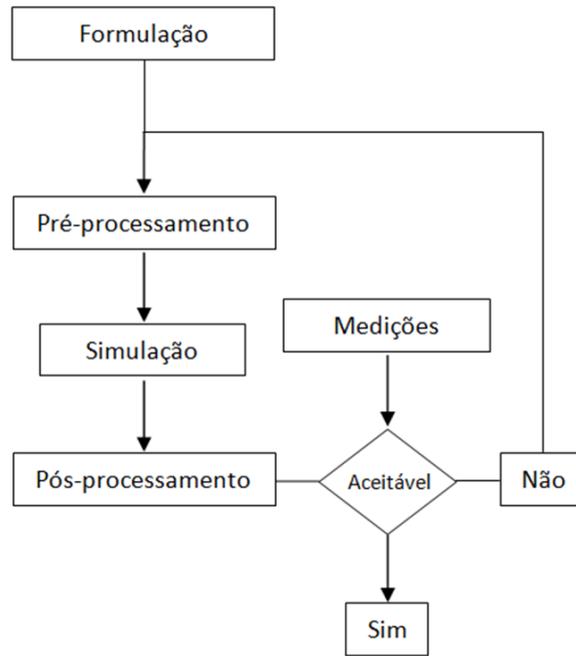


Figura 6.1. Processo usado para a realização de simulações em CFD.

6.2. Definição do tipo de malha

A criação da malha de um modelo assume um papel muito importante nas simulações em métodos computacionais em engenharia. A escolha da malha irá influenciar a precisão, convergência e velocidade dos resultados obtidos ou seja a qualidade dos mesmos.

Para a criação dos modelos e respectivas malhas foi usado o software de desenho e criação de malhas GAMBIT, que é o pré-processador do FLUENT, permitindo assim a construção de modelos simples e de uma conversão de geometria de alta qualidade.

O FLUENT, para simulações em 3D, permite a utilização de células tetraédricas, hexaédricas, poliédricas, piramidais e em cunha ou a combinação de várias. A escolha do tipo de malha para uma determinada aplicação tem influência no tempo de modelação, no tempo de simulação e na qualidade dos resultados. Quando estamos na presença de modelos com geometrias complexas, a utilização de malhas estruturadas, com elementos quadriláteros ou hexaédricas, pode tornar o processo de modelação muito moroso senão impossível, sendo aconselhável para estes casos o uso de malhas não estruturadas tais como triangulares ou tetraédricas. No caso de geometrias mais simples, o uso de malhas estruturadas ou não estruturadas è indiferente em termos de tempo de modelação. Em termos de tempo de simulação, os modelos com malhas estruturadas são mais rápidos pois têm menos células, têm uma estrutura simétrica acelerando assim a convergência e melhorando a precisão e qualidade dos resultados ao contrário das células não estruturadas, [57]. Visto que a caravana tem uma geometria simples, aproximada a um paralelepípedo, será usada malha estruturada hexaédrica nos modelos a simular.

6.3. Definição das propriedades dos materiais para simulação

Para a realização das simulações é necessário definir um conjunto de parâmetros que serão determinantes na solução final das simulações. Assim, nesta secção serão apresentados os cálculos relativos às propriedades dos materiais a inserir no FLUENT, sendo posteriormente apresentados os restantes parâmetros aquando da apresentação das simulações.

As paredes, chão e tecto da caravana são constituídas por diversos materiais por isso para facilitar a inserção das propriedades dos mesmos, foram calculadas as propriedades equivalentes para cada superfície. O modelo da caravana foi aproximado a um paralelepípedo com as seguintes dimensões: 4m comprimento, 2m de altura e 2m da largura, com espessura de 2,5cm nas paredes. Por existirem diferenças entre as dimensões do modelo e as dimensões reais da caravana, calcularam-se as propriedades equivalentes para o modelo. As dimensões da caravana real e do modelo são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Dimensões do modelo e da caravana

	Caravana				Modelo			
	Paredes		Janelas		Paredes		Janelas	
	e [m]	A [m ²]	e [m]	A [m ²]	e [m]	A [m ²]	e [m]	A [m ²]
Frente		3,44		0,78		4		
Direita	0,024	7,5	0,003	0,6	0,025	8	0,025	0,84
Esquerda		7,75		0,35		8		
Traseira		3,98		0,25		4		
Tecto	0,03	7,81	-	-	0,025	8	-	-
Chão	0,043	9,28	-	-	0,025	8	-	-

As propriedades necessárias para a correcta definição dos materiais no Fluent são: a massa específica, calor específico e condutibilidade térmica. Para realizar o seu cálculo as expressões utilizadas foram as seguintes:

- **Massa específica equivalente, ρ_{eq}**

$$\rho_{eq} = \left(\frac{e_1 \cdot \rho_1 + e_2 \cdot \rho_2 + e_3 \cdot \rho_3}{e_1 + e_2 + e_3} \right) \quad (6.1)$$

Para o caso do chão e do tecto, estas superfícies têm ainda pontes térmicas que são constituídas por materiais diferentes da restante superfície por isso a massa específica equivalente para estes casos será dado por:

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_{p1} A_1 + \rho_{p2} A_2}{A_1 + A_2} \quad (6.2)$$

A massa específica equivalente no modelo será dada por:

$$\rho_{eq, modelo} = \rho_{eq} \cdot \frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_{modelo}} \cdot \frac{A_{real}}{A_{modelo}} \quad (6.3)$$

- **Calor específico equivalente, C_{peq}**

$$C_{peq} = \frac{e_1 \cdot C_{p1} \cdot \rho_1 + e_2 \cdot C_{p2} \cdot \rho_2 + e_3 \cdot C_{p3} \cdot \rho_3}{e_1 \cdot \rho_1 + e_2 \cdot \rho_2 + e_3 \cdot \rho_3} \quad (6.4)$$

No caso do chão e tecto, como já foi referido, com constituição diferente, o calor específico será dado por:

$$C_{p\text{ eq}} = \frac{C_{p1}\rho_{p1}A_1 + C_{p2}\rho_{p2}A_2}{\rho_{p1}A_1 + \rho_{p2}A_2} \quad (6.5)$$

O calor específico do modelo será então dado por,

$$C_{p\text{ modelo}} = C_{p\text{ eq}} \quad (6.6)$$

- **Condutibilidade térmica equivalente, λ_{eq}**

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{1}{R_{\text{eq}}} \quad (6.7)$$

A condutibilidade térmica do modelo será obtida a partir da seguinte expressão:

$$\lambda_{\text{eq,modelo}} = \lambda_{\text{eq}} \cdot \frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_{\text{modelo}}} \cdot \frac{A_{\text{real}}}{A_{\text{modelo}}} \quad (6.8)$$

Os valores obtidos através das expressões apresentadas anteriormente estão presentes na Tabela 6.2 para as paredes e na Tabela 6.3 para as janelas.

Tabela 6.2. Propriedades equivalentes dos materiais da caravana e do modelo

Superfície	ρ_{eq} [kg/m ³]	ρ_{modelo} [kg/m ³]	$C_{p\text{eq}}$ [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ_{eq} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	λ_{modelo} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Paredes	133	109	1485	2,024	1,671
Chão	320	639	2274	1,692	3,376
Tecto	262	307	1899	2,016	2,362

Tabela 6.3. Propriedades equivalentes dos materiais das janelas da caravana e do modelo

Janelas	ρ_{eq} [kg/m ³]	ρ_{modelo} [kg/m ³]	$C_{p\text{eq}}$ [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ_{eq} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	λ_{modelo} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Frente		132			0,022
Direita	1185	102	1460	0,2	0,017
Esquerda		59			0,010
Traseira		42			0,007

6.4. Desenvolvimento do modelo da Caravana

Desenvolver um modelo para uma simulação é um processo sujeito a várias etapas ou evoluções, conforme mencionado em 6.1. O modelo inicialmente idealizado para simular pode não ser o que apresente, mediante as condições do problema, os melhores resultados sendo necessário modifica-lo ou evolui-lo para outro diferente. De seguida, serão apresentados os vários modelos da caravana que foram testados até à obtenção do modelo final usado para a validação.

6.4.1. Modelo 1 - Modelo simples

Inicialmente, aquando da procura do melhor modelo que definisse a caravana a usar nas simulações, foi construído um modelo simples - um paralelepípedo. Este paralelepípedo tinha as seguintes dimensões: 4 m de comprimento, 2 m de altura e 2 m de largura. A malha usada neste modelo foi hexaédrica estruturada e era composta por 16000 elementos. O modelo foi construído sem janelas e paredes, sendo que a definição de materiais e espessura das paredes realizada nas condições de fronteira do Fluent. A Figura 6.2 apresenta o modelo e respectiva malha.

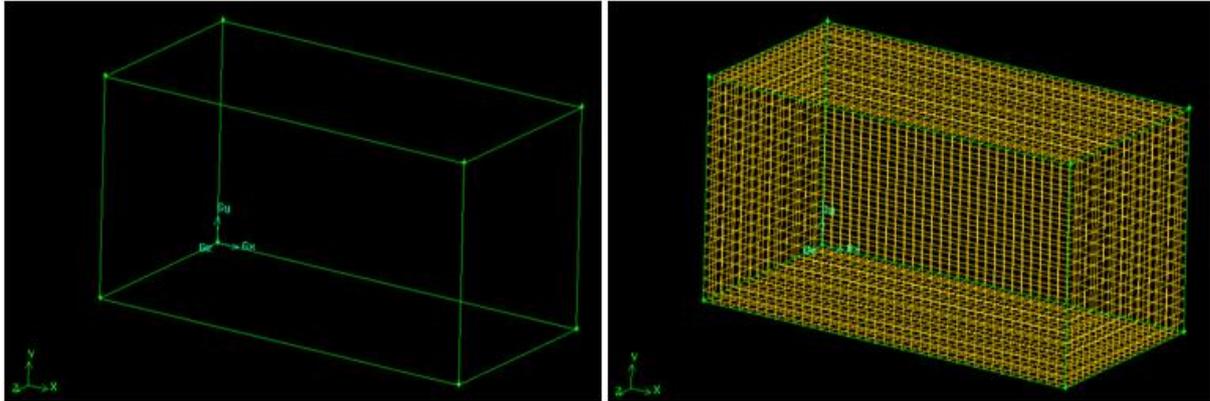


Figura 6.2. Modelo simples e respectiva malha

A simulação do modelo decorreu para o modo estacionário. Pretendia-se com este modelo avaliar o comportamento deste modelo quando sujeito à radiação solar. Para tal recorreu-se ao modelo de radiação do FLUENT, DO e do calculador solar SRT. O modelo DO foi escolhido pois permite obtenção de soluções para a radiação em superfícies semi-transparentes. [57] As condições de fronteira definidas para este modelo foram de temperatura e radiação. Os dados relativos à radiação solar foram introduzidos através do modelo de radiação do FLUENT acima citado com os dados geográficos relativos ao Porto para o dia 1 de Junho as 8h. As temperaturas assumidas para todas as paredes foram de 300K.

Por simplificação, o material atribuído a todas as superfícies foi Alumínio. As paredes foram definidas como opacas com um coeficiente de absorção, α de 0,8.

Os resultados obtidos não foram satisfatórios pois os fluxos de calor incidentes nas paredes do modelo eram nulos.

De modo a perceber a razão pela qual não existiam fluxos nas paredes, alteraram-se as propriedades das mesmas, passando-as de opacas para semi-transparentes, sendo que desta forma já se obtinham fluxos de calor solares. Assim, nas condições de fronteira do modelo definiram-se as paredes como sendo semi-transparentes mas com uma transmissibilidade, τ_j , nula e um α de 0,4, criando assim as condições de um material opaco.

No entanto, verificou-se que não seria uma boa solução pois os fluxos de calor solares incidiam no volume de ar interior e não nas paredes do modelo como definido nas condições de fronteira. A Figura 6.3 demonstra este facto.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

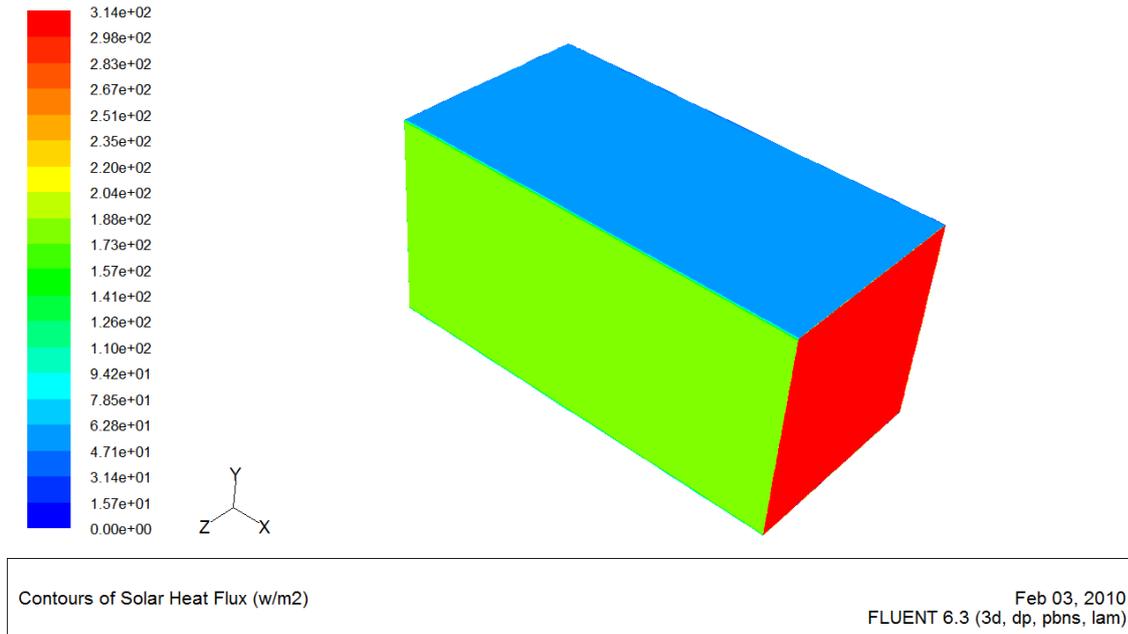


Figura 6.3. Fluxos de calor solar incidentes no interior da caravana às 8h

6.4.2. Modelo 2 - Modelo com ar envolvente

Posteriormente, foi criado um modelo da caravana mas desta vez com paredes e uma camada de ar envolvente, de modo a tentar eliminar o problema associado as propriedades das paredes no modelo anterior quando exposto à radiação. As dimensões relativas à caravana são as usadas no modelo anterior.

O modelo foi construído a partir de um volume com as dimensões da caravana. Para dimensionar o volume interior e as paredes, foi construído um volume idêntico ao primeiro mas com dimensões mais pequenas, de modo que as paredes ficassem com 2,5 centímetros de espessura. De seguida esses dois volumes foram separados ficando assim o volume interior correspondente ao ar e outro relativo às paredes da caravana. De forma a construir as paredes, os vértices dos dois volumes foram unidos através de linhas. A Figura 6.4 apresenta a ligação entre volumes.

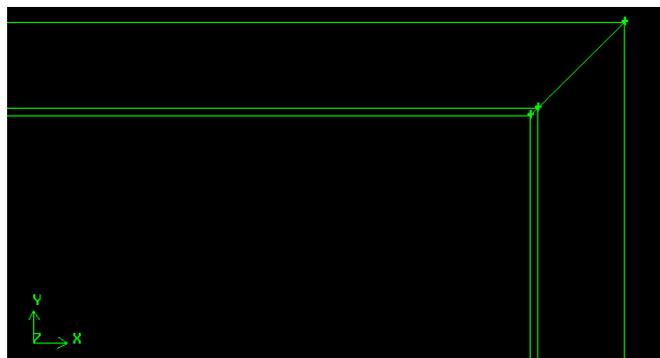


Figura 6.4. Ligação entre volumes do modelo

Posteriormente através dessas mesmas linhas e das superfícies do volume interior e exterior, foram construídos os volumes correspondentes às diversas paredes, chão e tecto. Esses volumes têm a forma de prismas trapezoidais. De forma análoga foi construído o

volume de ar exterior, ficando as paredes com 30 centímetros de espessura. A Figura 6.5 apresenta o modelo criado.

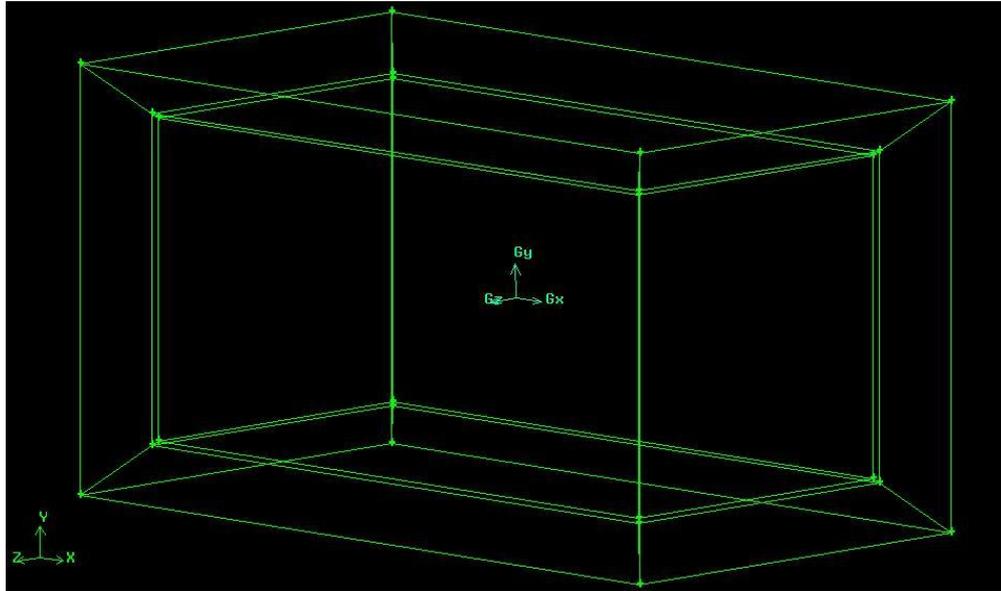


Figura 6.5. Modelo da caravana com ar envolvente

Para a construção da malha do modelo foi usada malha estruturada hexaédrica, recorrendo às ferramentas HEX e SUBMAP do GAMBIT. Desta forma a caravana ficou com um total de 108000 elementos, Figura 6.6.

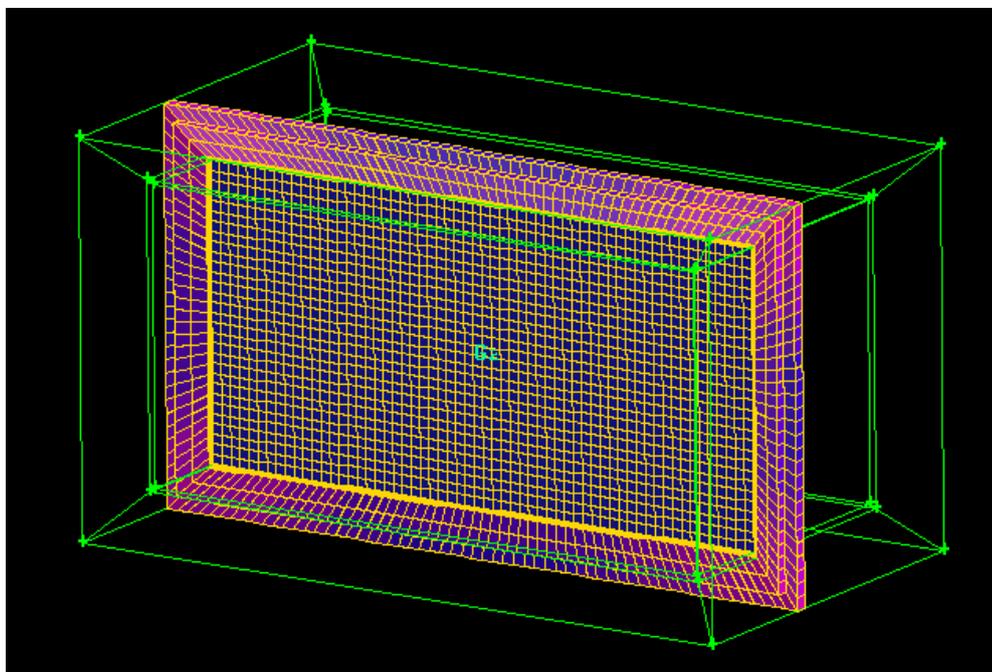


Figura 6.6. Malha do modelo com ar envolvente à caravana

O modelo desta vez tinha como fronteira as paredes do ar envolvente. As propriedades do ar exterior foram modificadas de modo a tornar o comportamento do ar aproximado ao de um sólido. Assim, foi atribuído um valor elevado da viscosidade do ar de forma a aproximar-

se a um sólido e uma condutibilidade térmica definida de modo a criar uma resistência equivalente a um coeficiente de convecção de 25.

Como condições de fronteira, as paredes do ar exterior estavam sujeitas a temperatura e de radiação e foram considerados um α de 0 e um τ_j de 1 para as mesmas. O ar no interior da caravana foi definido como gás ideal de modo a simularem-se condições de convecção natural. As paredes, tecto e chão foram definidas todas como opacas sendo atribuído um α de 0,8.

Foi então realizada uma simulação em regime transiente, usando o modelo de radiação do Fluent, DO – SRT, para testar a validade do modelo num dia escolhido aleatoriamente. O dia escolhido foi o dia 1 de Junho. Assim, foi definido o modelo de radiação para este dia tal como o perfil de temperaturas que foi inserido nas condições de fronteira. O perfil de temperatura contempla a temperatura ambiente obtida através do Solterm entre as 8h e 20h. No Anexo G são apresentados os dados inseridos no FLUENT assim como alguns resultados para esta simulação.

Consideraram-se todas as superfícies, à excepção do chão e a traseira, a participar no SRT. A simulação foi realizada para o período compreendido entre as 8h e 20h. A Figura 6.7 representa o perfil de temperaturas às 15h obtido através da simulação acima descrita, sendo visível o aquecimento provocado pela radiação nas paredes da caravana, principalmente no tecto.

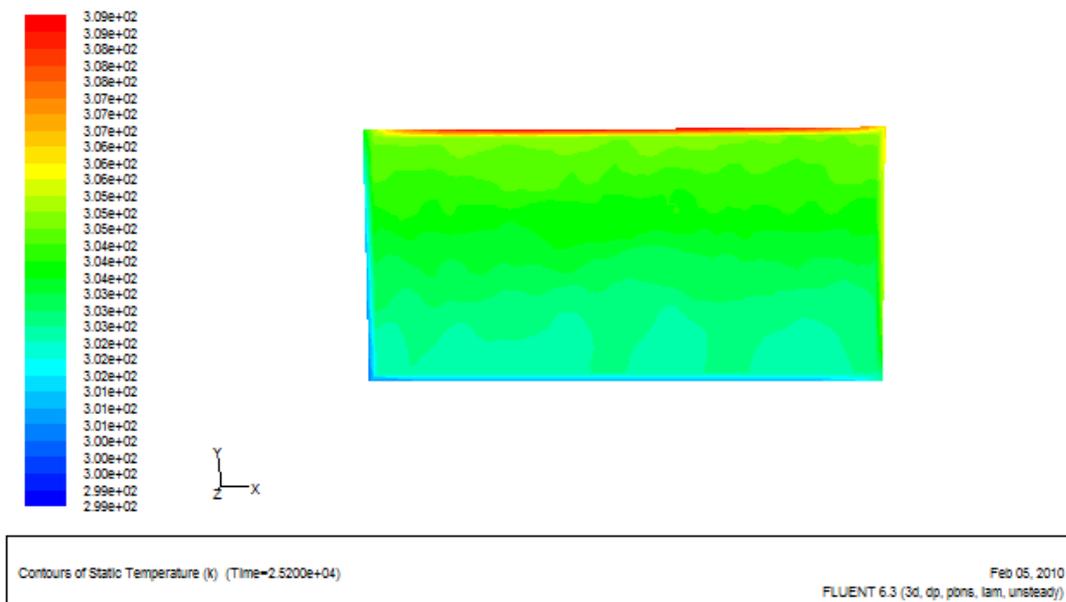


Figura 6.7. Perfil de temperatura no interior da caravana às 15h

Na Figura 6.8 são apresentados os fluxos de calor por radiação incidentes nas paredes e tecto da caravana às 15h. Desta forma conseguiu-se eliminar o problema do modelo anterior associado aos fluxos de calor por radiação. Posto isto, evoluiu-se para um modelo mais próximo da realidade.

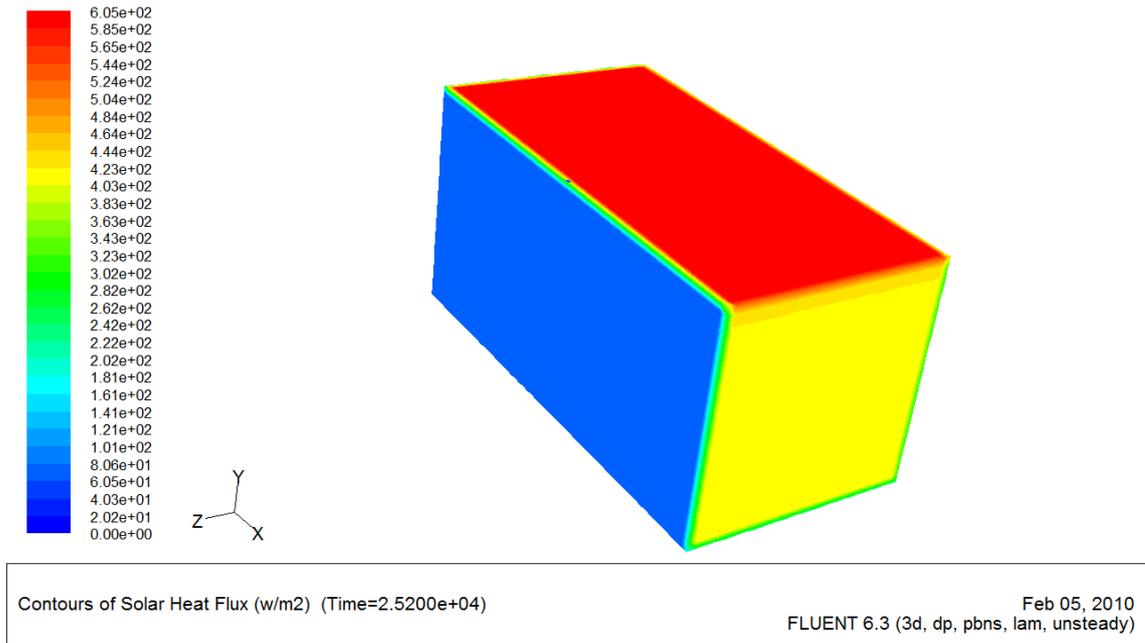


Figura 6.8. Fluxos de calor solares incidentes nas paredes da caravana 15h

6.4.3. Modelo 3 - Modelo com janelas e ar envolvente

Depois de verificada a funcionalidade do SRT no modelo anterior, onde se verificaram fluxos de calor incidentes nas paredes da caravana, foi construído um novo modelo mais próximo da realidade ou seja com janelas.

As janelas do modelo, por questões de simplificação, foram desenhadas a partir dos volumes das paredes, ficando estas com uma espessura de 2,5 centímetros. De forma a facilitar a construção de uma malha hexaédrica estruturada, o volume correspondente às paredes foi dividido em vários, ficando o volume central a corresponder às janelas tendo estas as seguintes dimensões: 1,2 metros de comprimento por 0,5 metros de largura. A Figura 6.9 representa uma janela do modelo.

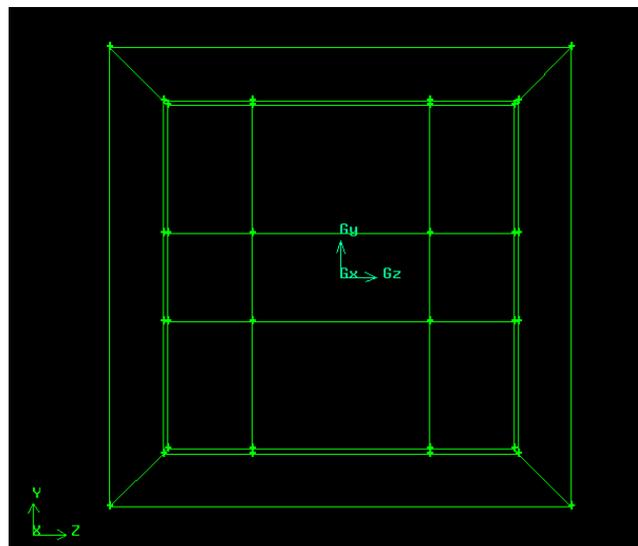


Figura 6.9. Janela da traseira do modelo

Este modelo a par dos restantes já descritos tem uma malha estruturada hexaédrica, ficando no final com 116736 elementos. Na Figura 6.10 é apresentado o modelo com janelas e ar envolvente e respectiva malha.

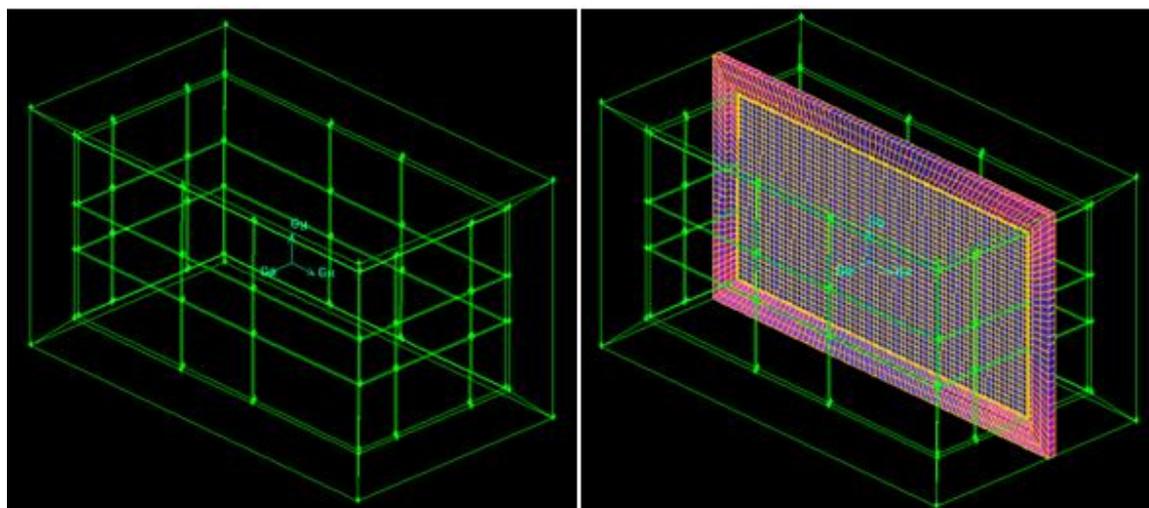


Figura 6.10. Modelo com as janelas e ar envolvente e vista lateral da malha

Desta vez o modelo foi simulado para o dia 23 de Setembro de 2009, dia correspondente a um dos dias mais quentes aquando das medições de temperatura apresentadas no Capítulo 3, para que fosse possível, posteriormente, comparar os resultados obtidos com os valores medidos experimentalmente.

A simulação decorreu em regime transiente e tinha como condições de fronteira um perfil de temperaturas relativo ao dia 23 de Setembro e o modelo de radiação do FLUENT DO-SRT. Os valores de temperatura ambiente foram obtidos a partir do Instituto de Meteorologia para o Porto (Pedras Rubras). Relativamente às propriedades das diversas superfícies, foi considerada um valor de τ_j de 0,8 e um α de 0 para as janelas, e às paredes, chão e tecto um valor de α de 0,4. As paredes, chão e tecto foram definidas todas com o mesmo material pois estas superfícies estavam todas agregadas, não podendo desta forma definir as propriedades relativas a cada uma delas. No anexo G são apresentados os dados inseridos e resultados obtidos para a realização da simulação.

A Figura 6.11 representa as temperaturas no plano central da caravana, onde é possível verificar o efeito da radiação no chão da caravana, assim como nas paredes da caravana. Nas janelas, como era esperado, a temperatura é inferior às verificadas no resto da caravana.

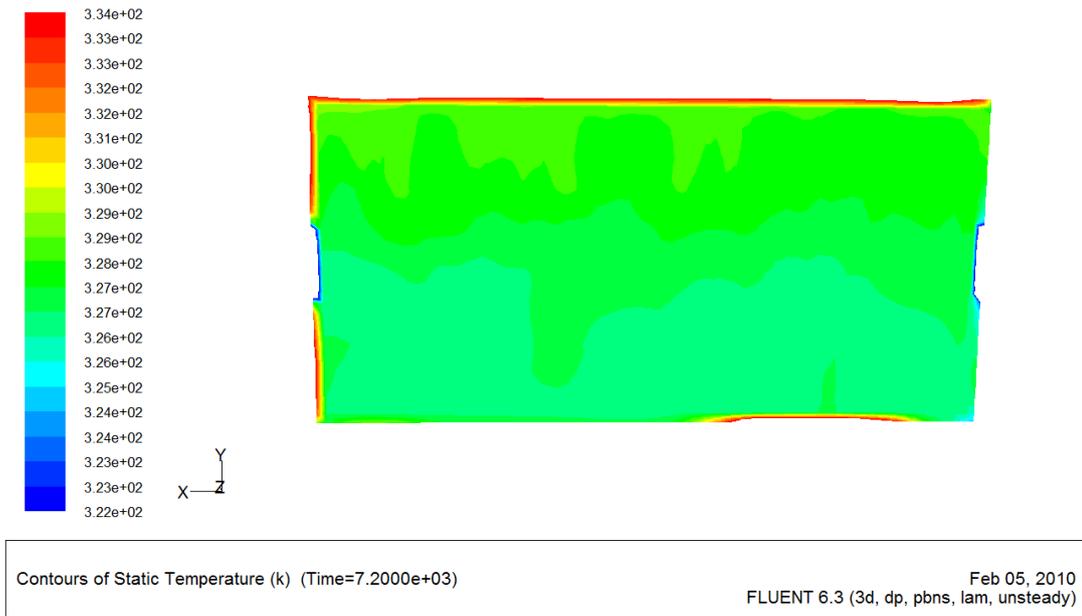


Figura 6.11. Temperaturas no interior da caravana às 15h

Neste modelo foi também possível verificar, tal como no anterior, os fluxos de calor por radiação incidentes nas paredes da caravana. Além disso, verificaram-se ainda fluxos de calor no interior da caravana através das janelas, provocando assim um aumento de temperatura no interior da caravana. Na Figura 6.12 é possível observar os fluxos de calor solar incidentes tanto nas paredes da caravana como no seu interior.

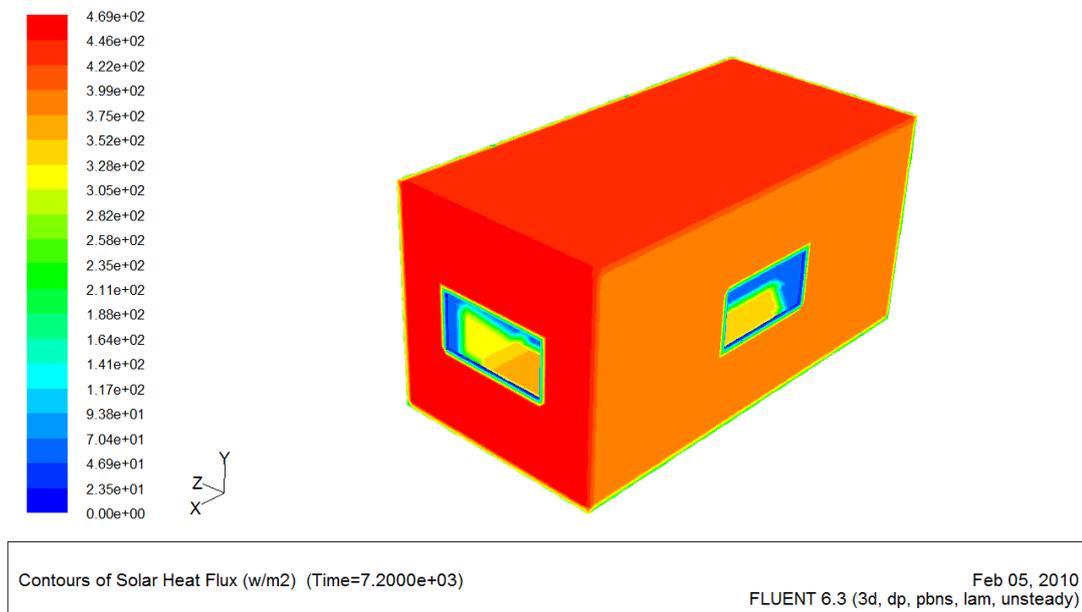


Figura 6.12. Fluxos de calor solar nas paredes e no interior da caravana às 15h

Posteriormente, de forma a definir-se correctamente os materiais das paredes, chão e tecto, as paredes da caravana foram separadas no GAMBIT. Assim, já foi possível definir as propriedades correctas dos materiais relativos a cada superfície, para que fosse possível efectuar uma simulação mais próxima da realidade. As condições de fronteira e dados

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

inseridos foram os mesmos que a simulação previamente apresentada. No entanto, os resultados não foram os esperados verificando-se que o valor da temperatura nas paredes descia, Figura 6.13.

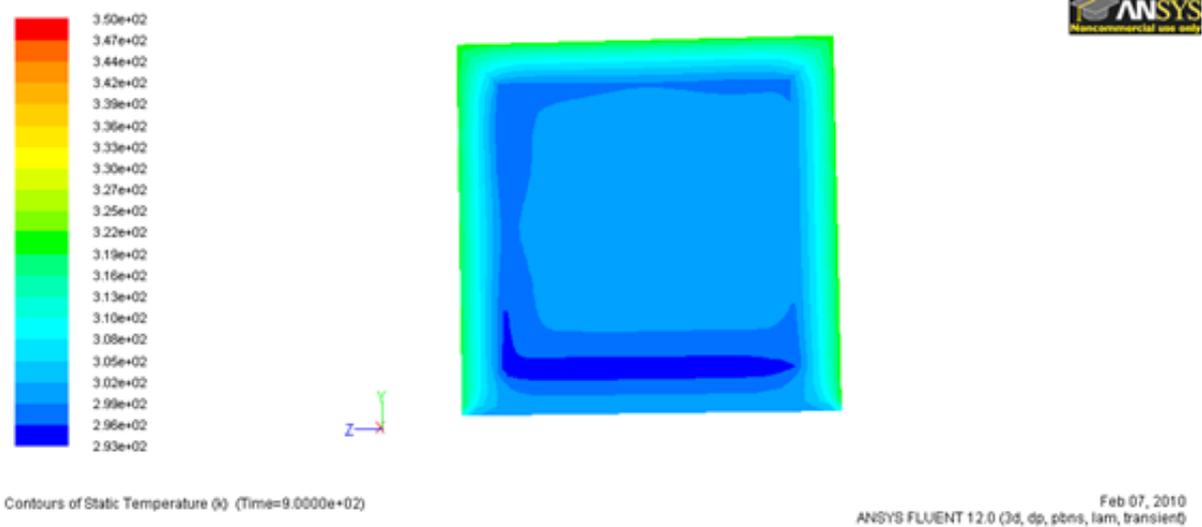


Figura 6.13. Temperaturas no interior e nas paredes da caravana

6.4.4. Modelo 4 – Modelo final

Depois de simulados os modelos anteriores com o modelo de radiação do FLUENT, DO-SRT, verificou-se que não apresentavam os melhores resultados, optando-se assim pela criação de um modelo aproximado ao da caravana, sem nenhuma camada de ar envolvente. Pretendeu-se com este modelo realizar simulações recorrendo ao conceito de temperatura ar-sol apresentado no capítulo 4, para a radiação. Assim este modelo foi simulado com condições de fronteira de convecção, ou seja com um coeficiente de convecção e vários perfis de temperatura.

O método usado para a construção do modelo é idêntico ao utilizado nos modelos anteriores. Com efeito, as paredes foram construídas tal como o Modelo 2 e as janelas como o modelo 3. Para simplificação do modelo e criação de malha, as janelas foram construídas todas com o mesmo tamanho ou seja, 1,2 metros de comprimento por 0,5 metros de largura. A apresentação final do modelo é a representada na Figura 6.14.

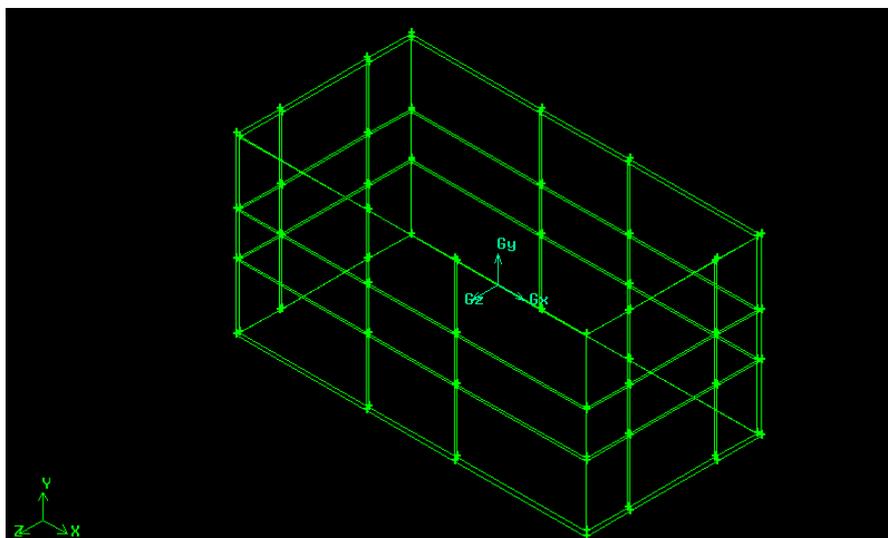


Figura 6.14. Modelo final da caravana

Após a construção do modelo, foi então criada a malha. Como já foi referido anteriormente a malha mais adequada para o modelo da caravana é a hexaédrica estruturada, ficando o modelo final com um total de 106496 elementos. Na Figura 6.15 estão apresentados os pormenores da parede e da malha construída no modelo.

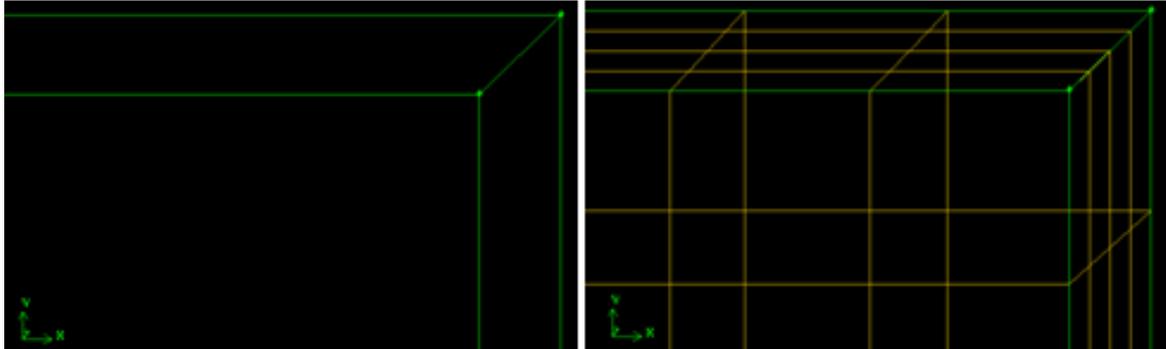


Figura 6.15. Pormenor da parede e da malha do modelo

Posto isto, o modelo final com a malha tem a configuração apresentada em várias vistas na Figura 6.16 apresentada de seguida.

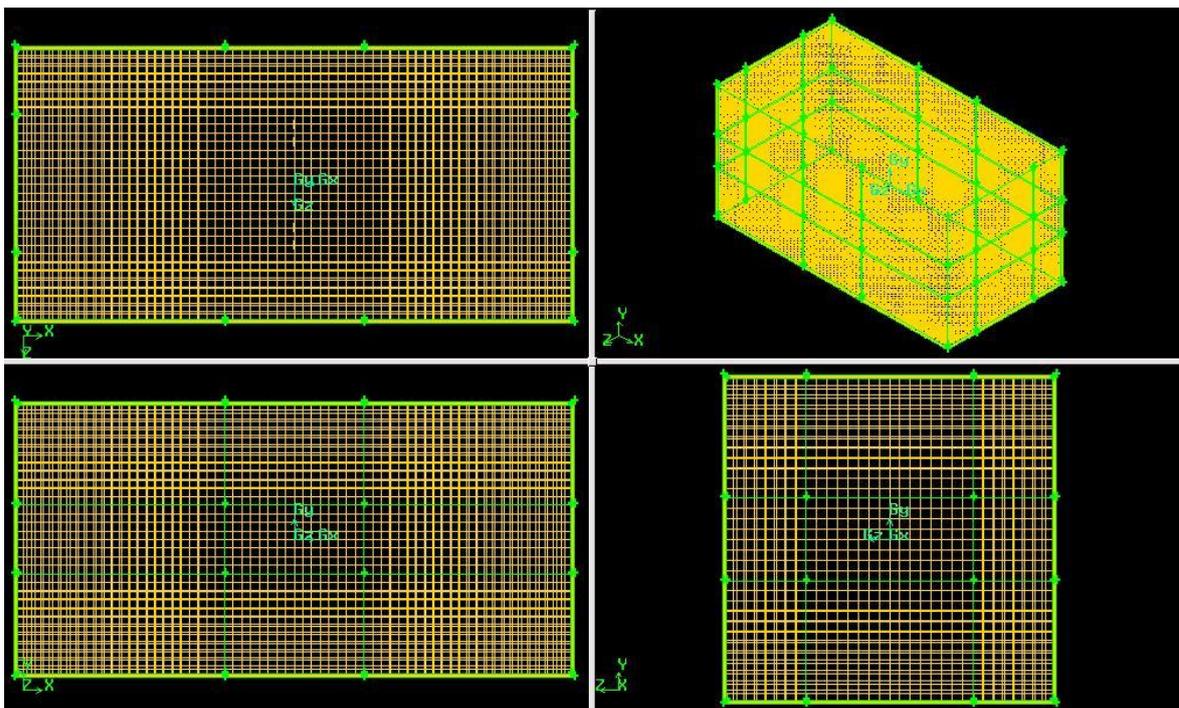


Figura 6.16. Vista geral da malha do modelo

Como já foi referido, este modelo foi simulado com condições de fronteira de convecção. Para tal, foi atribuído um valor para o coeficiente de convecção e definidos perfis de temperatura para o modelo. De forma à radiação ser contabilizada nas simulações, os perfis de temperatura foram criados tendo em conta a temperatura ambiente e os valores de radiação incidentes em cada superfície, recorrendo-se para tal ao conceito de temperatura ar-sol, já apresentado no capítulo 4.

Para a construção dos perfis de temperatura, foram utilizados valores relativos à temperatura ambiente obtidos no Instituto de Meteorologia para o Porto (Pedras Rubras) enquanto os valores de radiação foram obtidos através do ano típico meteorológico do Porto,

no Solterm. Foi também considerado um valor de α de 0,4 para todas as paredes do modelo e um coeficiente de convecção de 6 e 12 W/m².K.

Foram então realizadas duas simulações para o Porto, para os referidos coeficientes de convecção, e para tal foi escolhido um dos dias mais quentes, medido experimentalmente e apresentado no capítulo 3 - o dia 23 de Setembro de 2009. As simulações foram compostas por duas fases: uma entre as 8h e as 14h e outra entre as 14h e as 24h. Isto deve-se ao facto da caravana estar localizado perto de um edifício que lhe provoca sombreamento durante a manhã, estando somente exposta à radiação solar durante a tarde.

A Figura 6.17 apresenta a evolução das temperaturas observadas no período compreendido entre as 8h e as 24h para o interior da caravana, ambiente e ainda os valores obtidos nas simulações no ponto onde se considerou estar o “datalogger”.

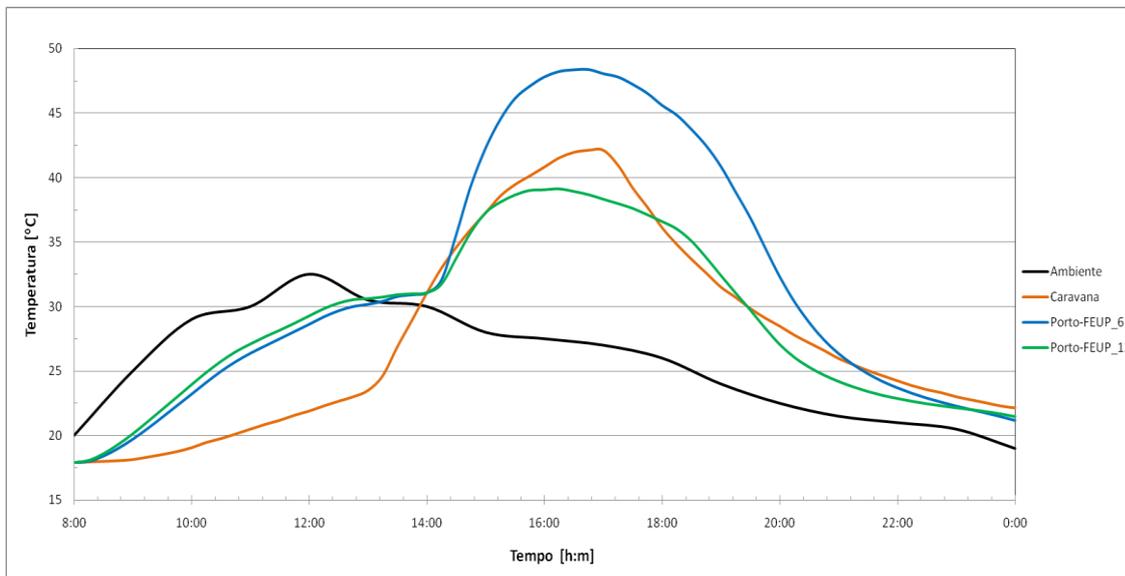


Figura 6.17. Temperaturas obtidas nas simulações e medidas experimentalmente para o dia 23 de Setembro

Analisando a figura, são bem visíveis as duas fases das simulações podendo ser retiradas algumas conclusões.

Na primeira fase é visível o desfasamento entre as curvas relativas às temperaturas obtidas nas simulações e a temperatura obtida experimentalmente, principalmente devido à localização da caravana e das temperaturas usadas para o ambiente que são de Pedras Rubras e não as da FEUP. Verifica-se também que é muito complexo simular a zona de transição, entre o período em que a caravana está à sombra e o período em que está ao sol, entre as 12h e 14h, pois ao longo desse período a caravana vai ficando gradualmente exposta à radiação solar, observando-se assim uma divergência muito grande nos resultados obtidos nesse período. Na segunda fase da simulação, as curvas relativas às simulações e no interior da caravana, apesar de apresentarem um desfasamento em amplitude, são, semelhantes ao longo do tempo. De seguida apresentam algumas figuras relativas aos perfis de temperatura no interior da caravana obtidos nas simulações. No Anexo G apresentam-se dados inseridos e resultados.

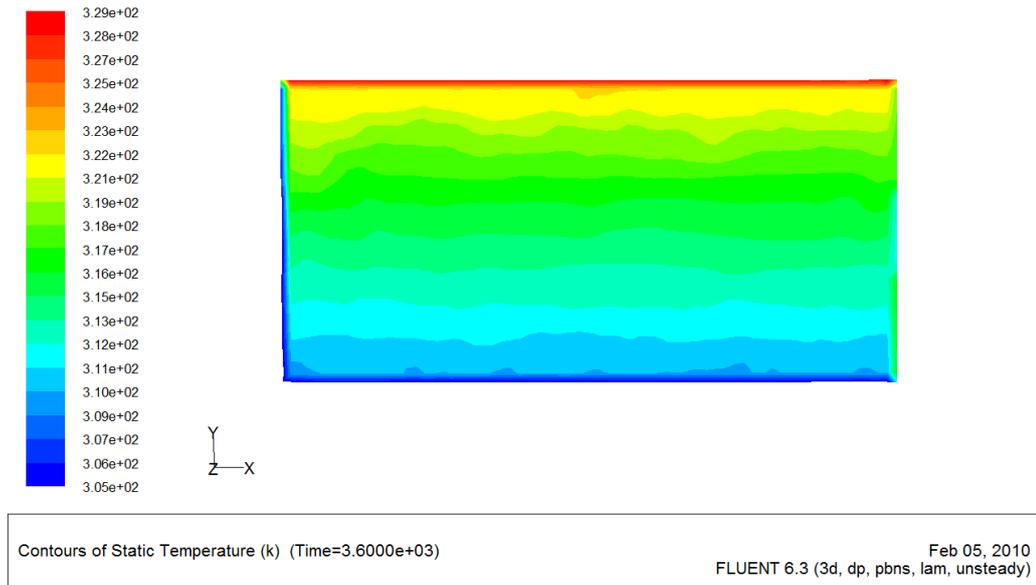


Figura 6.18. Perfil de temperaturas às 15h para $\alpha_{\text{conv}} = 6 \text{ W/m}^2.\text{K}$

A Figura 6.18 apresenta o perfil de temperaturas para as 15h na simulação com o α_{conv} de $6 \text{ W/m}^2.\text{K}$. Nela pode-se verificar a elevada estratificação presente no interior da caravana. O efeito da radiação também é bem visível, verificando temperaturas muito elevadas no tecto da caravana.

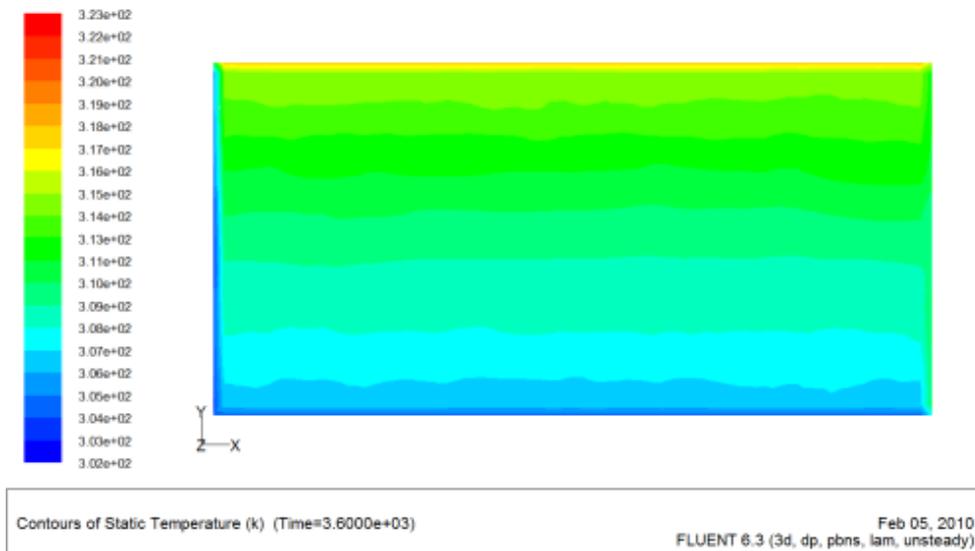


Figura 6.19. Perfil de temperaturas às 15h para $\alpha_{\text{conv}} = 12 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Analisando a Figura 6.19, que apresenta ao perfil de temperaturas às 15h para a simulação com $\alpha_{\text{conv}} = 12 \text{ W/m}^2.\text{K}$, pode-se verificar que a estratificação não é tão elevada, podendo-se concluir que o valor de temperaturas no interior é tanto maior quanto menor o coeficiente de convecção exterior.

Após a realização destas simulações e respectiva análise, conclui-se que a qualidade dos resultados obtidos fora afectada por diversos parâmetros. Os valores da temperatura ambiente usada para este dia, de Pedras Rubras, apresentam um desvio em relação aos valores de temperatura ambiente na FEUP, afectando assim os valores obtidos nas simulações tal

como os perfis de temperatura inseridos nas condições de fronteira. Estes perfis continham simplesmente a radiação incidente nas paredes da caravana, não considerando as janelas.

Posteriormente, descobriu-se existirem valores de temperatura ambiente medidos numa estação meteorológica instalada na FEUP. Verificados esses valores, constatou-se que somente existiam dados a partir do dia 9 de Outubro de 2009, sendo então necessário recorrer a outro dia para realizar a validação do modelo. As simulações são apresentadas de seguida.

6.5. Validação do modelo

A validação em CFD é definida como sendo: “ O processo de determinar o grau em que um modelo é uma representação exacta do mundo real a partir da perspectiva das utilizações do modelo”, [58]. A validação examina se os modelos computacionais implementados no código CFD, e resolvidos nas simulações computacionais estão de acordo com as observações na prática. A precisão exigida na validação depende da aplicação, portanto, a validação deve ser flexível para permitir diferentes níveis de precisão, [59].

Para o modelo da caravana, a validação terá como base as temperaturas medidas no interior da caravana. Para tal escolheu-se um dia no qual se verificaram temperaturas elevadas no interior da caravana, e para o qual existiam dados relativos à temperatura ambiente medidos na estação meteorológica da FEUP. O dia escolhido foi o de 14 de Outubro de 2009. Os valores da temperatura ambiente e no interior da caravana observados nesse dia estão apresentados na Figura 6.20.

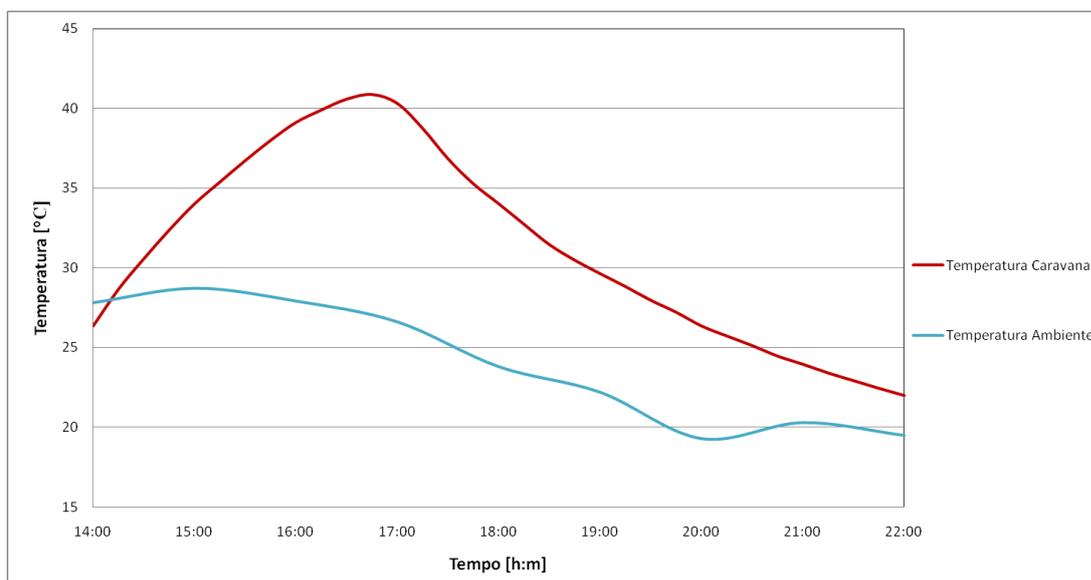


Figura 6.20. Temperatura ambiente e no interior da caravana registada no dia 14 de outubro de 2009

A Figura 6.20 apresenta os valores de temperatura entre as 14h e as 22h do dia 14 de Outubro de 2009. Só foram apresentados estes valores pois as simulações só serão realizadas a partir das 14h devido a problemas com a radiação incidente na caravana, como já foi mencionado em 6.4.4.

Para criar os perfis de temperatura, além da temperatura ambiente já apresentada, foram também recolhidos os valores de radiação. Como não existiam valores reais de radiação

disponíveis, recorreu-se ao ano típico meteorológico para a região do Porto. Na Figura 6.21 é apresentada a evolução da radiação global horizontal para esse dia.

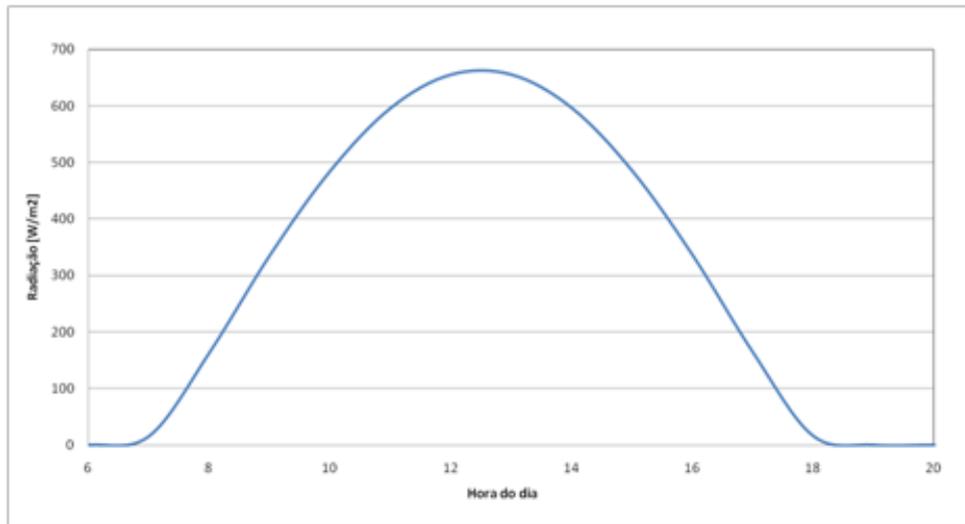


Figura 6.21. Radiação solar global horizontal no dia 14 de Outubro

Os perfis de temperatura foram criados, tal como no Modelo 4, a partir do conceito de temperatura ar-sol para as paredes. No entanto para os perfis das janelas foi utilizada a seguinte expressão:

$$T_{\text{janelas}} = T_{\text{ext}} + \frac{\alpha_j \cdot I_i}{\alpha_{\text{Conv}}} + \frac{\tau \cdot I_i}{U} \quad (6.9)$$

Esta equação representa a temperatura equivalente nas janelas devido à temperatura exterior, radiação solar incidente que é absorvida e ainda a componente de fluxo de calor que é transmitido para o interior da caravana.

As simulações realizadas tiveram como condições de fronteira, nas paredes, chão e tecto da caravana, os valores de temperaturas dos perfis e diversos valores de coeficiente de convecção. Como são desconhecidos os valores de velocidade do vento na zona onde está instalada a caravana, foram considerados 3 valores para o coeficiente de convecção, sejam eles 6, 10 e 25 W/m².K. Deste modo as simulações realizadas iriam fornecer valores associados para o caso de convecção natural e para o caso da convecção forçada. No Anexo H é apresentada uma tabela com os valores de diversos dados meteorológicos para o dia 14. As simulações decorreram no regime transiente no período compreendido entre as 14 horas e as 22 horas. A Figura 6.22 apresenta os valores da temperatura das simulações medidas no ponto correspondente ao local do “datalogger”. Apresentam-se no Anexo G dados referentes às simulações efectuadas.

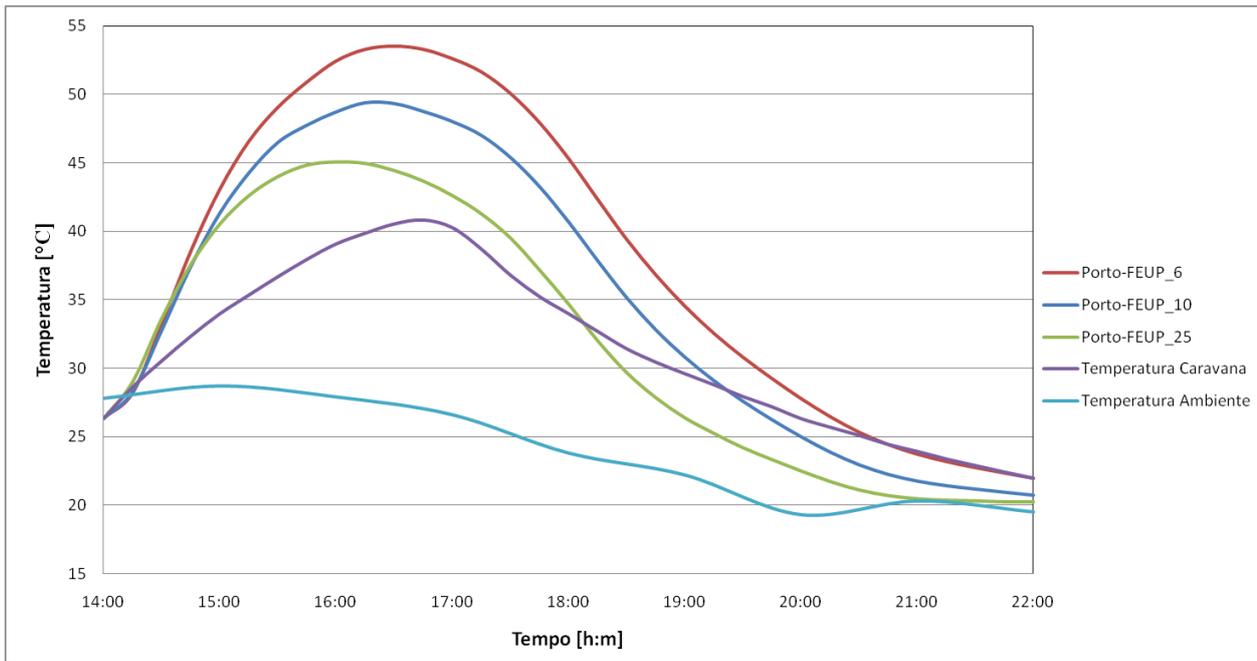


Figura 6.22. Valores de temperatura obtidos nas simulações e a temperatura medidas no interior e exterior da caravana.

Observando os resultados obtidos, expressos nas curvas acima apresentadas, podemos aferir que todas as curvas têm um desfasamento relativamente à curva de temperaturas medidas experimentalmente. Assim, isto pode dever-se a diversos factores.

As simulações apresentadas para o modelo descrito, não contêm nenhuma componente relativa às infiltrações pois além da dificuldade na modelação, é desconhecido o seu valor para cada superfície. Tendo em conta este facto, os resultados obtidos para a curva correspondente a um coeficiente de convecção de $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ eram os esperados, ou seja quando a caravana já não está exposta à radiação, a temperatura no seu interior desce abaixo da medida experimentalmente, o que indica que a velocidade do vento no local seria menor do que a considerada para a simulação.

As curvas para $\alpha_{conv}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $\alpha_{conv}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ apresentam valores de temperatura bastante superiores relativamente aos medidos pois para além de não serem consideradas infiltrações, os valores de velocidade do vento considerados são baixos, sendo que para $\alpha_{conv}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a velocidade aproxima-se de zero, fazendo com que o calor transferido para o interior seja maior. Daqui podemos verificar que quanto menor a velocidade do vento maior será a temperatura no interior da caravana.

Para a curva relativa a $\alpha_{conv}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, os valores de temperatura obtidos, sem infiltrações, deveriam ser sempre superiores aos obtidos experimentalmente com infiltrações mas tal não acontece, verificando-se na figura que esta passa ligeiramente a baixo. Posto isto, constata-se que a curva que melhor se aproximaria da medida experimentalmente, seria uma para um α_{conv} entre 6 e $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, pois na realidade seria impossível ter uma velocidade do vento nula ou mesmo próxima de zero durante um dia inteiro.

De seguida são apresentadas três figuras respeitantes a um perfil de temperaturas escolhido aleatoriamente, no interior da caravana à mesma hora, para as três simulações efectuadas.

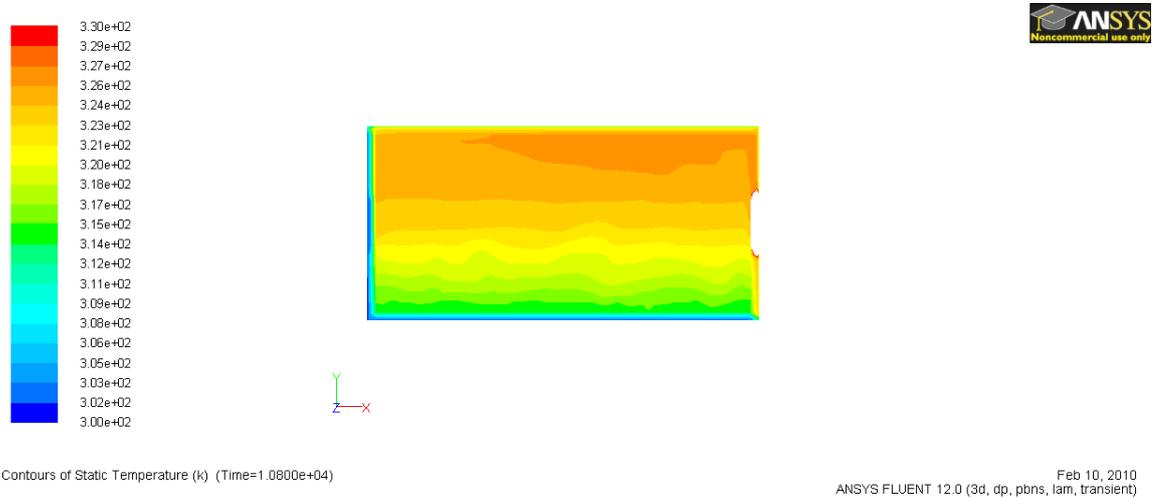


Figura 6.23. Perfil de temperaturas às 17h para $\alpha_{conv}=6 \text{ W/m}^2.\text{K}$

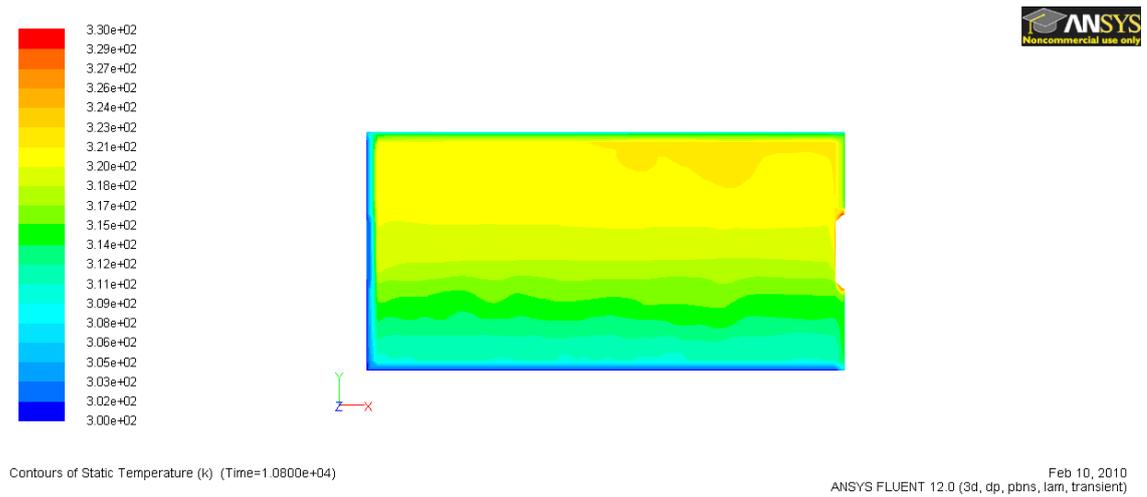


Figura 6.24. Perfil temperaturas às 17h para $\alpha_{conv}=10 \text{ W/m}^2.\text{K}$

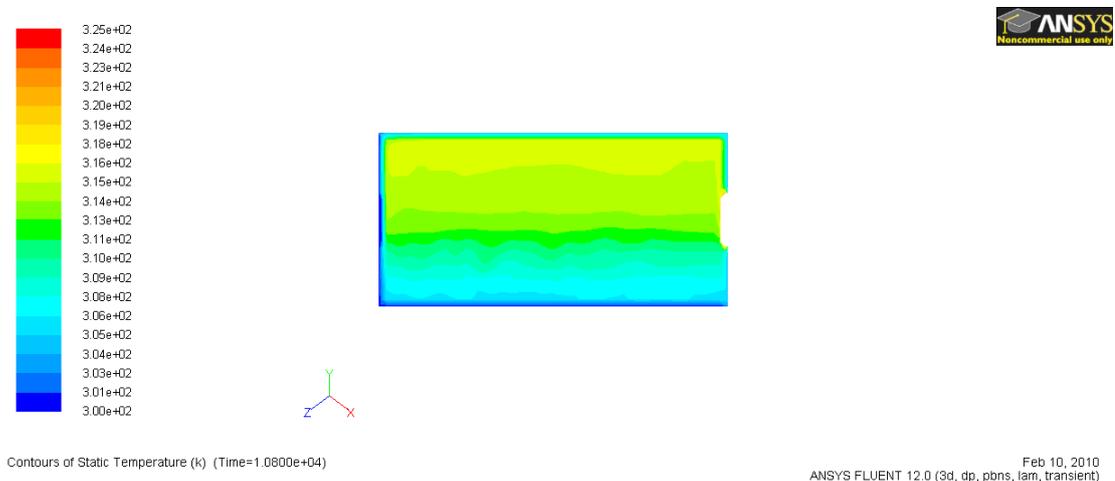


Figura 6.25. Perfil temperaturas às 17h para $\alpha_{Conv}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Analisando as Figuras 6.23, 6.24 e 6.25, verifica-se um diferencial de temperatura elevado entre ambas, devendo-se sobretudo ao valor do coeficiente de convecção inserido em cada simulação. É também visível em cada figura a elevada estratificação, sendo que em todas elas existe uma diferença superior a 10°C. Isto deve-se principalmente à radiação que foi inserida nos perfis de temperatura, pois dessa forma provocando assim um maior aquecimento nas paredes, não contemplando o interior da caravana, afectando deste modo os perfis de temperatura apresentados.

Mediante os resultados obtidos em todas as simulações, estes foram os melhores perante as condições inseridas. Como tal considera-se que este modelo, é o que melhor aproxima as simulações da realidade.

6.6. Simulação para Moura

Após a validação do modelo da caravana para as condições apresentadas, podem-se agora simular o modelo para a região mais desfavorável. Assim foram realizadas duas simulações para a região de Moura com coeficientes de convecção de 10 e 25 W/m².K, para o dia que apresenta o maior valor de carga térmica. Este dia foi obtido a partir de um cálculo mensal das cargas térmicas num período compreendido entre Maio e Setembro do ano típico meteorológico. No Anexo D são apresentadas as cargas térmicas calculadas para o dia mais quente em Moura.

Foram apenas realizadas duas simulações pois além do esforço computacional exigido pelo Fluent, o processo de cálculo é bastante moroso por isso considerou-se que estas duas simulações seriam suficientes para analisar os valores de temperatura.

Como condições de fronteira das simulações, além dos coeficientes de convecção já referidos, foram criados perfis de temperatura equivalentes ao dia em questão tal como realizado aquando da validação do modelo. Na Figura 6.26 é apresentado o perfil da radiação solar global horizontal para o dia 26 de Julho em Moura. Os dados referentes a este dia estão apresentados no Anexo H e foram obtidos pelo Solterm.

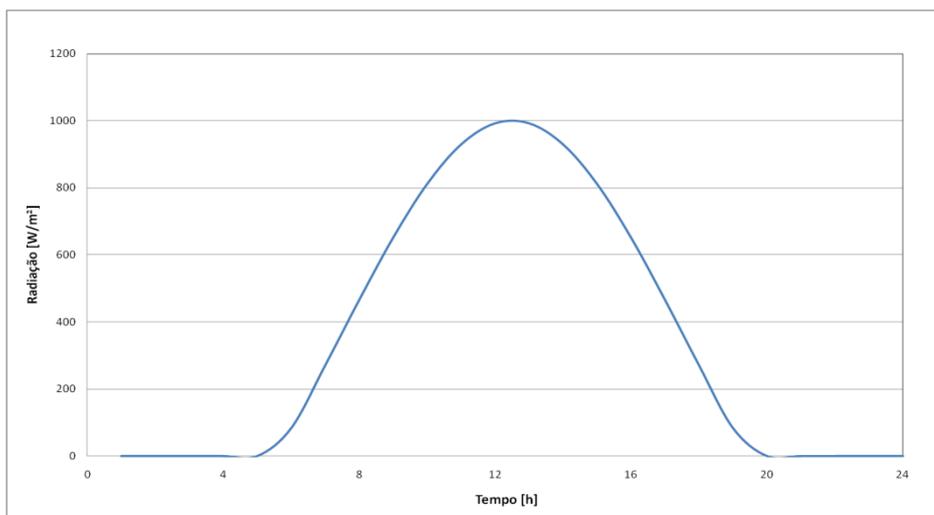


Figura 6.26. Radiação solar global horizontal em Moura no dia mais desfavorável

Nestas simulações, ao contrário do modelo de validação, considerou-se que a caravana estaria permanentemente num local sem elementos envolventes que provocassem sombreamento. Assim os perfis de temperatura introduzidos contabilizam as 24 horas do dia.

Como resultado das simulações foram obtidas as seguintes temperatura médias no interior do modelo.

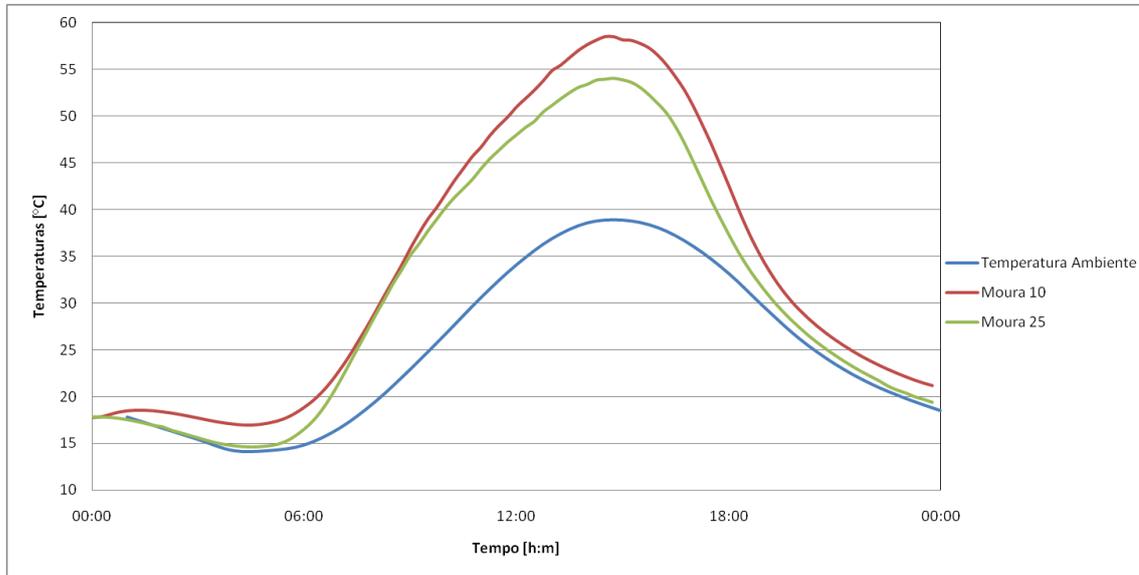


Figura 6.27. Temperaturas médias obtidas nas simulações para o dia mais desfavorável em Moura

Como se pode verificar na Figura 6.27, as temperaturas atingidas no interior da caravana nas simulações realizadas são muito elevadas, rondando os 58°C. Estas simulações, a par das anteriores, não consideram as infiltrações na caravana obtendo assim as temperaturas elevadas durante os períodos de radiação.

Como seria de esperar, as curvas representativas das simulações com um $\alpha_{conv}=10$ e $25\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ são bastante superiores à da temperatura ambiente, sendo que quanto mais baixo é o coeficiente de convecção maior é o calor transferido para o interior. Poder-se-á afirmar que perante estes resultados, as temperaturas no interior de uma caravana situada na região de Moura, estariam entre a curva para $\alpha_{conv}=10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e a curva da temperatura ambiente, dependendo acima de tudo da velocidade do vento no local.

Tal como nos perfis de temperatura apresentados na validação do modelo, os perfis de em Moura também apresentam diferenças bastante visíveis, consoante o coeficiente de convecção introduzido na simulação. As Figuras 6.28 e 6.29 demonstram as diferenças existentes entre as duas simulações efectuadas para as 15h do dia considerado.

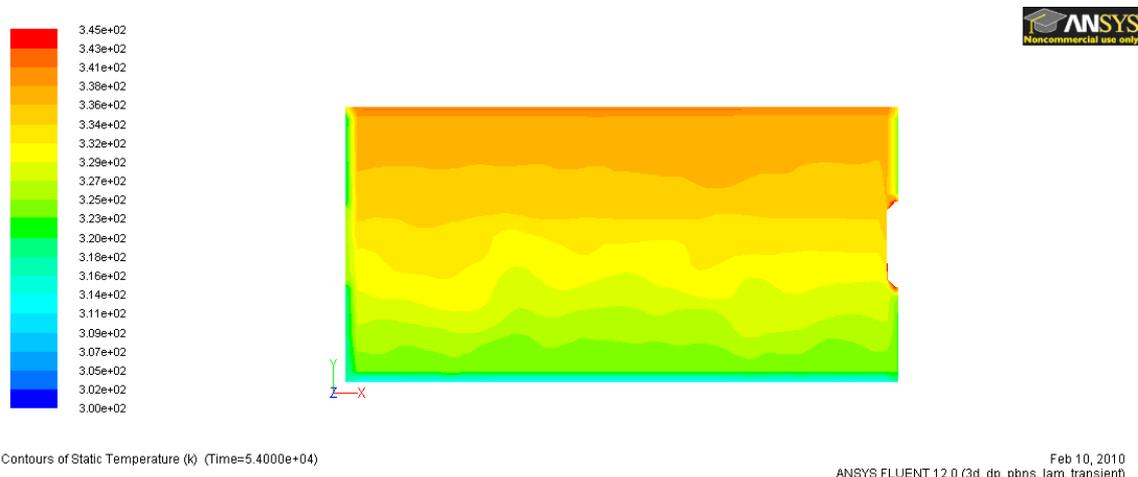


Figura 6.28. Perfil temperaturas às 15h para $\alpha_{conv}=10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

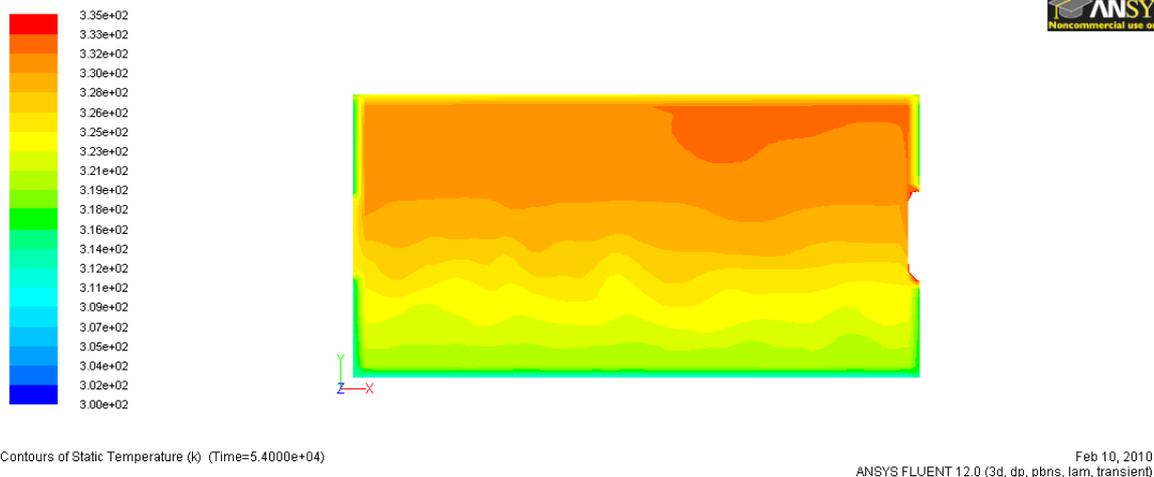


Figura 6.29. Perfil temperaturas às 15h para $\alpha_{Conv}=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

Outras figuras dos perfis verificados para outras horas apresentam-se no Anexo G.

6.7. Simulação com Sistema de Refrigeração

Pretendeu-se com esta simulação avaliar o comportamento do ar no interior da caravana com o sistema de refrigeração. Para tal foi inserido um volume correspondente a uma junção fria de um sistema de refrigeração num dos lados da caravana. Na Figura 6.30 é apresentado o modelo.

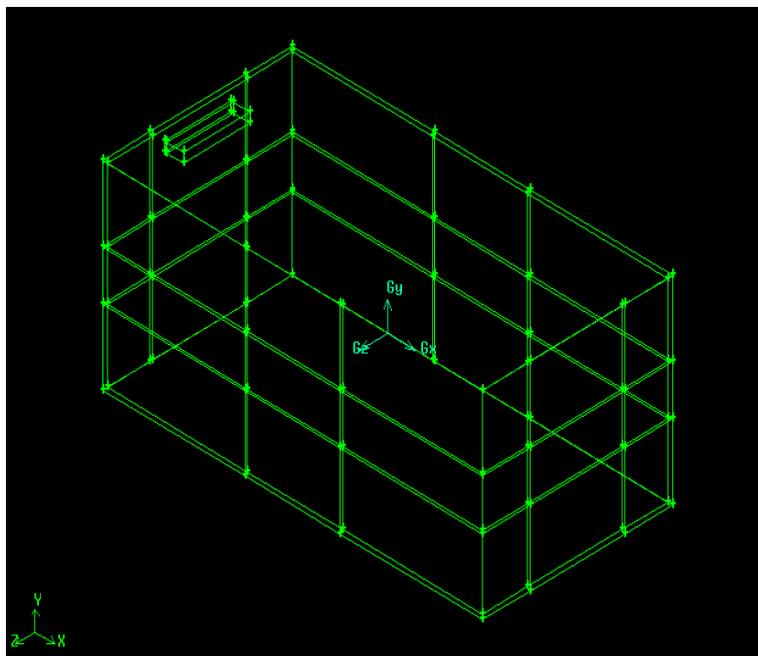


Figura 6.30. Modelo com Junção fria do sistema termoelétrico na traseira.

O modelo foi então simulado em regime transiente, sendo as suas condições de fronteira definidas a partir das temperaturas e radiações usadas no cálculo das cargas térmicas, capítulo 4. Para introduzir a radiação na simulação, recorreu-se novamente ao conceito de temperatura ar-sol.

Como em todos os modelos nunca foram consideradas as infiltrações e os ganhos internos das cargas térmicas, a potência calorífica a retirar do interior da caravana assumiu um valor de aproximadamente 1500W. Para simular o sistema de refrigeração foi necessário definir as condições de fronteira de forma a simular um escoamento de ar à temperatura pretendida no interior, para o caso 25°C. Para tal foi atribuída a uma superfície da junção fria a condição de fronteira de “Pressure Outlet” e a duas superfícies laterais “Pressure Inlet”, para que desta forma existisse conservação de massa no interior da caravana.

Para determinar o valor das pressões relativas a introduzir nas condições de fronteira destas superfícies, usaram-se as seguintes expressões.

Caudal mássico,

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6.10)$$

Velocidade,

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \quad (6.11)$$

Pressão,

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (6.12)$$

Para realizar os cálculos, foram usadas as propriedades do ar a 25°C, a potência calorífica, 1500W e a área da superfície correspondente à junção fria. Os resultados obtidos foram os seguintes:

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

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

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

Na simulação realizada, considerou-se o sistema de refrigeração na parte de trás da caravana. A evolução dos resultados obtidos está apresentada nas seguintes Figuras. No Anexo G apresentam-se outros resultados verificados.

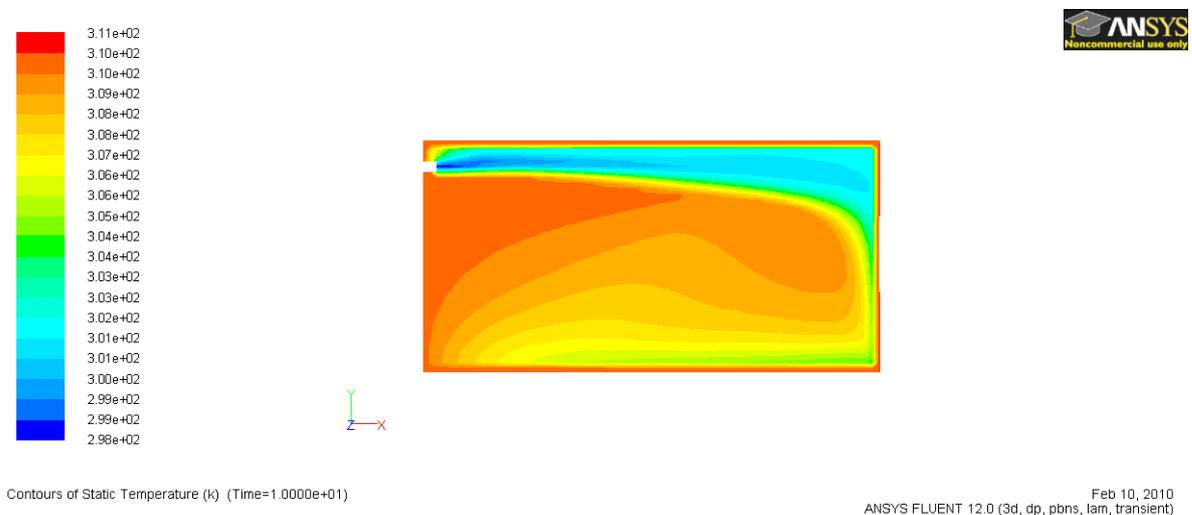


Figura 6.31. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 10 segundos

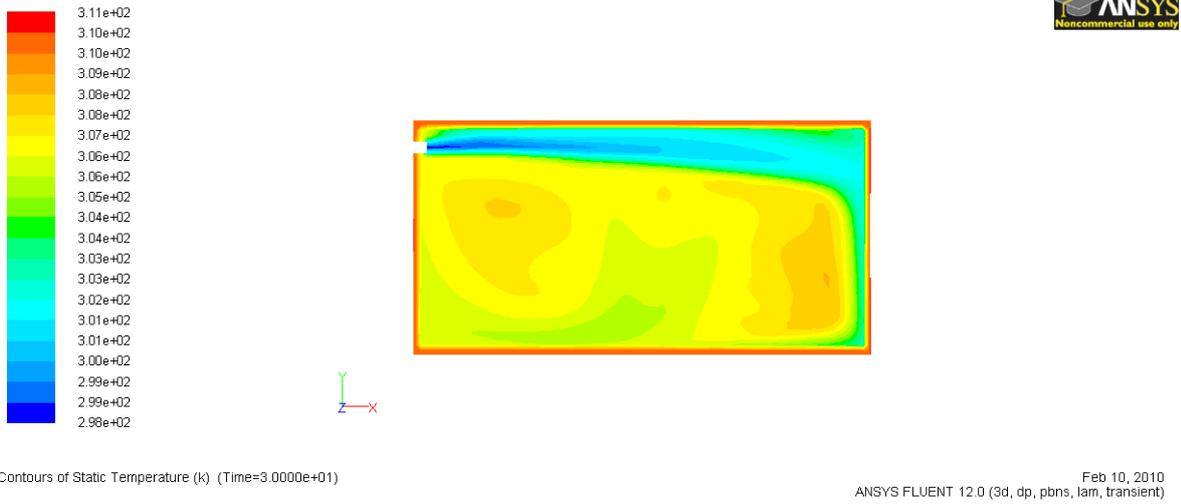


Figura 6.32. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 30 segundos

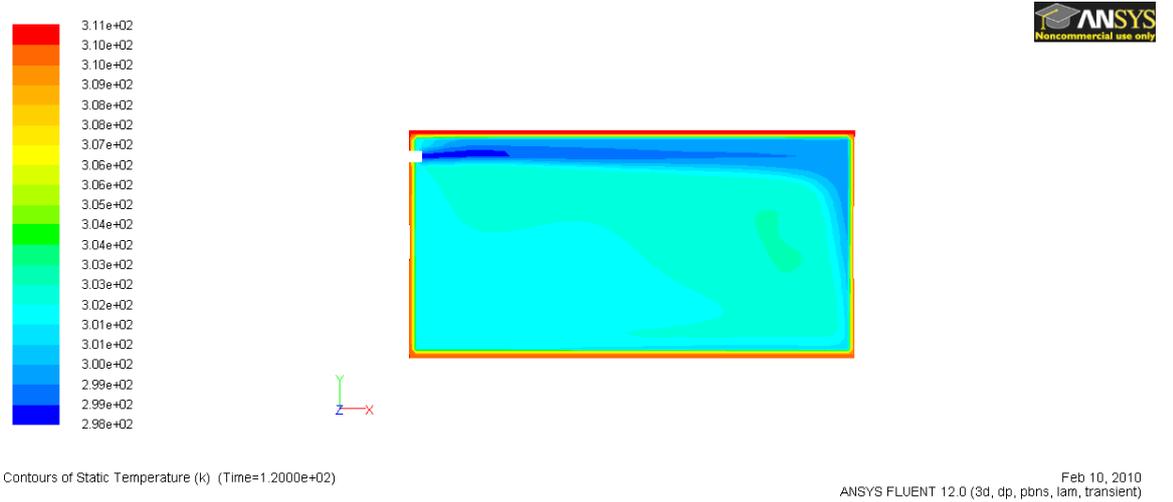


Figura 6.33. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 120 segundos

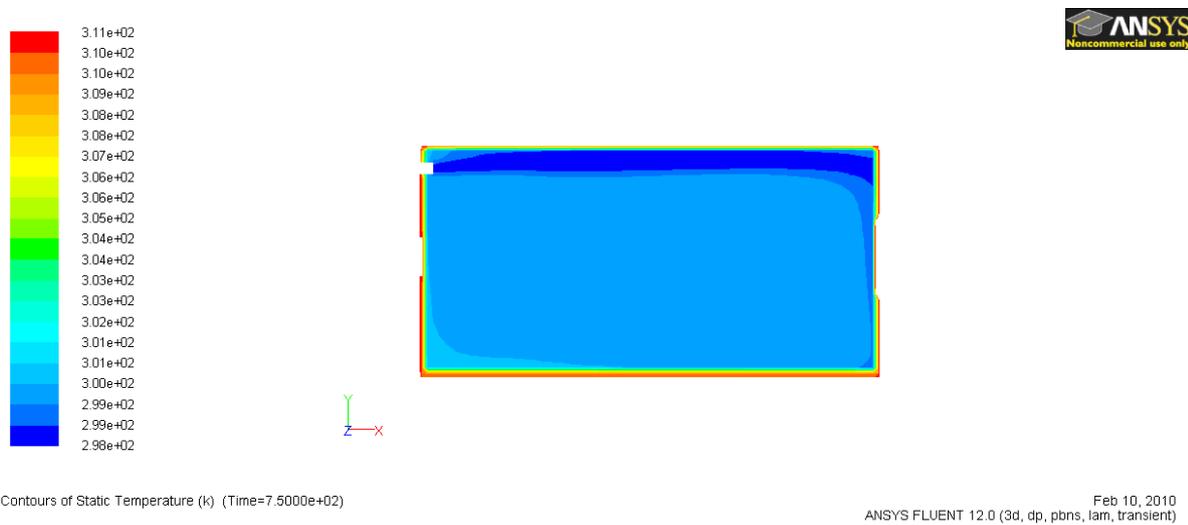


Figura 6.34. Perfil de temperaturas no interior ao fim de 750 segundos

Verifica-se que com a utilização do sistema de refrigeração são necessários apenas alguns minutos até que o perfil de temperaturas no interior da caravana fique uniforme. Com efeito verifica-se que após 30 segundos a temperatura no interior já desceu consideravelmente, bastando aproximadamente 750 segundos para que a temperatura no seu interior estabilize.

6.8. Análise das simulações

O processo de simulação e validação de um modelo exige um conjunto de parâmetros fundamentais para que se possa provar computacionalmente a realidade.

Para a validação do modelo da caravana, foram realizadas algumas medições experimentais que comprovaram ser escassas mediante as exigências do modelo e dos fenómenos físicos envolvidos. A medição de temperaturas na caravana deveria ter sido realizada de forma mais específica, ou seja, com mais pontos de medição com localização exacta para posteriormente ser efectuada uma comparação ponto a ponto. Também a radiação deveria ter sido obtida para o dia correspondente à medição das temperaturas, e a velocidade do vento medida no local para desta forma serem definidos os mecanismos de transferência de calor.

Para estas simulações a radiação provou ser um factor preponderante nos resultados finais obtidos. Com efeito, a radiação introduzida nos perfis de temperatura através do conceito de temperatura ar-sol influenciou os perfis obtidos no interior da caravana, provocando elevada estratificação. A melhor solução seria o uso do modelo de radiação disponibilizado pelo FLUENT mas este provou ser de difícil manuseamento.

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

7. Conclusões e perspectivas futuras

O presente relatório abordou o estudo sobre um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistido por painéis fotovoltaicos.

A implementação de um sistema de refrigeração para uma caravana provou ser indispensável, dados os valores de temperatura do ar verificados no interior da caravana, aquando da análise realizada às medições efectuadas no Porto. Com efeito, foram atingidos valores elevados no interior da caravana, acima dos 40°C, no período de medição entre Setembro e Outubro de 2009, provocando assim desconforto aos seus ocupantes.

As cargas térmicas da caravana para as condições de projecto consideradas, 25°C para a temperatura interior e de 37°C para a temperatura exterior, apresentaram um valor bastante elevado rondando os 2500W de potência calorífica. No cálculo constatou-se que os componentes mais influentes são a carga térmica pela envolvente opaca e as infiltrações. As infiltrações foram medidas experimentalmente e verificou-se um número elevado de renovações de ar por hora, para o pior caso 11. Este valor traduz assim, mediante as condições de projecto, uma parcela considerável no balanço final das cargas térmicas, cerca de 20%.

Perante o valor das cargas térmicas, 2500W, foi escolhido um sistema de refrigeração termoelétrico capaz de retirar essa potência calorífica do interior da caravana. Verificou-se, aquando da procura, que não existiam módulos com uma capacidade de refrigeração tão elevada, recaindo a escolha no modelo que apresenta o maior valor de potência, o modelo Ar-Ar AAC-151-4XT-HC, da empresa EIC Solutions, com capacidade de refrigeração de 735W. Para se atingir a potência de 2500W de capacidade de refrigeração, seriam necessários 4 módulos mas, no entanto, só foram escolhidos 3, perfazendo um total de 2200W de capacidade. Isto deve-se acima de tudo a questões relacionadas com o sobredimensionamento do sistema, o que levaria a um incremento económico desnecessário. Tendo em conta as condições de projecto, verifica-se que o valor máximo das cargas térmicas se apresenta poucas vezes durante os períodos mais quentes do ano, não representando assim um grande desconforto térmico aos seus utilizadores.

O sistema fotovoltaico foi também ele escolhido mediante algumas restrições. A área disponível, inclinação dos painéis e a energia eléctrica requerida pelo sistema de refrigeração, limitaram a sua escolha. Tendo em conta o COP do sistema de refrigeração e a potência do mesmo, o valor de potência eléctrica necessária foi de 5500W, assumindo-se como a principal limitação. Foi realizada uma simulação dinâmica recorrendo ao método f-chart, onde se verificou a elevada diferença entre os valores do consumo e produção de energia dos sistemas. Apesar de não conseguir suprir a totalidade da energia eléctrica, os módulos conseguem ainda fornecer uma quantidade de energia ao sistema de refrigeração. Tendo estes factores em conta, foi escolhido um módulo da Sanyo de células HCI com elevada eficiência, 17,3%, potência nominal de 240W e uma área de 1,4 m². Perante a área disponível foram escolhidos 3 módulos, ficando com uma potência nominal de 720W.

Posteriormente, foram realizadas simulações de modelos representativos da caravana. Para tal foi usado o FLUENT. Foram realizadas simulações para o dia 14 de Outubro, dia onde se registaram valores elevados de temperatura do ar no interior da caravana, para a validação do modelo. Cumpriram-se 3 simulações, verificando-se que quanto maior o coeficiente de convecção do ar exterior, menor é o valor de temperatura atingido no interior da caravana. Conclui-se também que a curva que mais se aproximava da realidade era a de $\alpha_{Conv} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

De seguida foram realizadas simulações para a região de Moura, a mais desfavorável em Portugal, com o modelo validado, verificando-se temperaturas bastante elevadas no seu interior, próximas dos 60°C. Nestas simulações é bem visível a estratificação nos perfis de temperatura obtidos, sendo causado pela radiação introduzida nas simulações através do conceito de temperatura ar-sol. Verificou-se ainda, nas simulações com o sistema de refrigeração com as condições de projecto, que o perfil de temperaturas do ar no interior rapidamente se aproxima da temperatura de projecto.

Em suma, conclui-se que é indispensável o uso de um sistema de refrigeração nas caravanas.

Como trabalhos futuros, sugerem-se que, em termos de medições de temperaturas, sejam efectuadas mais medições, no maior número de pontos possíveis, permitindo desta forma a obtenção de mais dados para comparação com as simulações. As medições das mesmas devem ainda ser realizadas com a caravana completamente exposta ao sol para evitar sombreamento.

Relativamente as simulações deve-se procurar uma melhor solução para a radiação a introduzir. O tempo dispendido na procura de uma solução para o modelo de radiação do FLUENT DO-SRT limitou sobremaneira o tempo disponível para as restantes simulações. Com efeito, foram usados “Time Step” elevados nas simulações, levando assim a resultados menos precisos. As simulações com o sistema de refrigeração foram também elas afectadas pela falta de tempo. Apesar de não ter sido usado com todo o sucesso, o modelo de radiação do FLUENT afigura-se como uma boa alternativa pois permitirá obter distribuições de temperatura do ar mais uniformes no da caravana.

8. Referências e Bibliografia

- [1] Instituto Português da Qualidade - www.ipq.pt
- [2] Camping-cars-caravans.de
- [3] International Energy Agency. Web- omrpublic.iea.org
- [4] Direcção Geral de Energia e Geologia. www.dgge.pt
- [5] Agência de Energia do Porto. www.adeporto.eu
- [6] Stephenschneider.stanford.edu
- [7] Agência Europeia Energia. www.eea.europa.eu/pt
- [8] Web - www.theoil drum.com
- [9] Ministério Obras Publicas Transportes e Comunicações. www.moptc.pt
- [10]. Afonso, Clito F. A. *Refrigeração*. Porto: FEUP-SFC, 2007.
- [11]. Rowe, D.M., [ed.]. *CRC Handbook of Thermoelectrics*. London: CRC Press LLC, 1995.
- [12] Riffat, S.B., Ma, X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, vol.23, n°8, 913-935, 2003.
- [13] Goldsmid, H. J., *Applications of Thermoelectricity*, Methuen Monograph, Worsnop, B. L., Ed., 1960.
- [14] Blankenship, W. P., Rose, C. M., and Zemanick, P. P., Applications of Thermoelectric Technology to Naval Submarine Cooling, *Proc. VIIIth Int. Conf: Thermoelectric Energy Conversion*, Scherrer, S. and Schemer, H., Eds., July 10-13, 1989, Nancy, France, 224.
- [15] Melcor Thermoelectric Coolers. www.melcor.com
- [16] pt.wikipedia.org
- [17] Bridgeman, P. W., *The Thermodynamics of Electrical Phenomena in Metals*, Dover, New York, 1961.
- [18] Roesser, F., Thermoelectric Thermometry, *J. Appl. Phys.*, 11, 388, 1940.
- [19] Benedict, R. P., *Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements*, 3rd ed., Wiley-Interscience, New York, 1984, chap. 7.
- [20] Callen, H. B., Application of Onsager's reciprocal relations to thermoelectric, thermomagnetic and galvanomagnetic effects, *Phys. Rev.*, 78, 1349, 1948.
- [21] Callen, H. B., Irreversible thermodynamics of thermoelectricity, *Rev. Mod. Phys.*, 26, 237, 1954.
- [22] (From Pollock, D.D., *Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool*, ASTM Special Technical Publication 852, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985.
- [23] Kalogirou, Soteris. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 1st Edition. Elsevier, 2009.
- [24] Luque, Antonio. *Handbook of Photovoltaics Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2003.

- [25] ALTENER, Energia Fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projecto e instalações, 2004.
- [26] European Renewable Energy Council - www.erec.org
- [27] European Photovoltaic Industry Association - www.epia.org
- [28] Renováveis – estatísticas rápidas, Fevereiro de 2009
- [29] ElectroIQ. www.electroi.com
- [30] PR Log. www.prlog.org
- [31] Siemens Solar. www.siemenssolar.com
- [32] Nelson, J. Organic photovoltaic films. Elsevier Science, 2002.
- [33] Konarka Power Plastic. www.konarka.com
- [34] EMCORE. www.emcore.com
- [35] Enel Green Power. www.enelgreenpower.com
- [36] US Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy - www1.eere.energy.gov
- [37] Portal das Energias Renováveis. www.energiasrenovaveis.com
- [38] Associação Portuguesa de Engenharia do Ambiente - www.apea.pt
- [39] SunWind Power Inc. www.sunwindpowerinc.com
- [40] Alliance for Rural Electrification - www.ruralelec.org
- [41] Santos, Carlos & Matias, Luís. Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios. LNEC, 2006.
- [42] Engineering ToolBox. www.engineeringtoolbox.com
- [43] Kaysons. www.kaysons.in
- [44] Afonso, Clito, Castro, Manuel & Matos, Joaquim. Air Infiltration on Domestic Refrigerators: The Influence of the Magnetic Seals.
- [45] Decreto – Lei nº 80/2006, 2006, “Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) ”.
- [46] Castro, Manuel e Fernandes, Oliveira. Apontamentos de Transferência de Calor. Porto:FEUP, 2008.
- [47] SolTerm.
- [48] Mackey,C.O. e Wright, L.T.;Periodic Heat Flow – Homogenous Walls or Roofs. ASHVE Transactions, vol.50, 1944.
- [49] Martin, Christopher L., Goswami, D. Yogi. Solar Energy Pocket Reference. ISES, 2005.
- [50] Frota, Anésia B., Schiffer, Sueli R. Manual de Conforto Térmico. Studio Nobel, 2001.
- [51] EIC Solutions - www.eicsolutionsinc.com
- [52] Oliveira, Armando. Apontamentos de Energias Renováveis. Porto: FEUP, 2008.
- [53] Solarshop-europe.net

[54] Sanyo - www.sanyo-solar.eu

[55] Ansys. www.ansys.com

[56] Fluent. www.fluent.com

[57] Fluent User Guide

[58] AIAA G-077-1998

[59] www.grc.nasa.gov

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Anexo A. Resultados dos testes do Gás Traçador

Tabela A1. Valores obtidos nas medições do teste Gás Traçador com respiros fechados a 20 de Maio de 2009

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		

Tabela A2. Valores obtidos nas medições do teste Gás traçador com respiros abertos a 21 de Maio de 2009

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		

Anexo B. Resultados das medições de temperatura do ar no interior da caravana

Tabela B1. Valores das temperaturas medidas no interior da caravana no dia 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	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	20,5	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	18,1	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	28,5
23.09.09	4:15	17,91	23.09.09	12:15	22,31	23.09.09	20:15	27,8
23.09.09	4:30	17,87	23.09.09	12:30	22,67	23.09.09	20:30	27,2
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	38,6	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

Tabela B2. Valores das temperaturas medidas no interior da caravana no dia 12 de Outubro de 2009

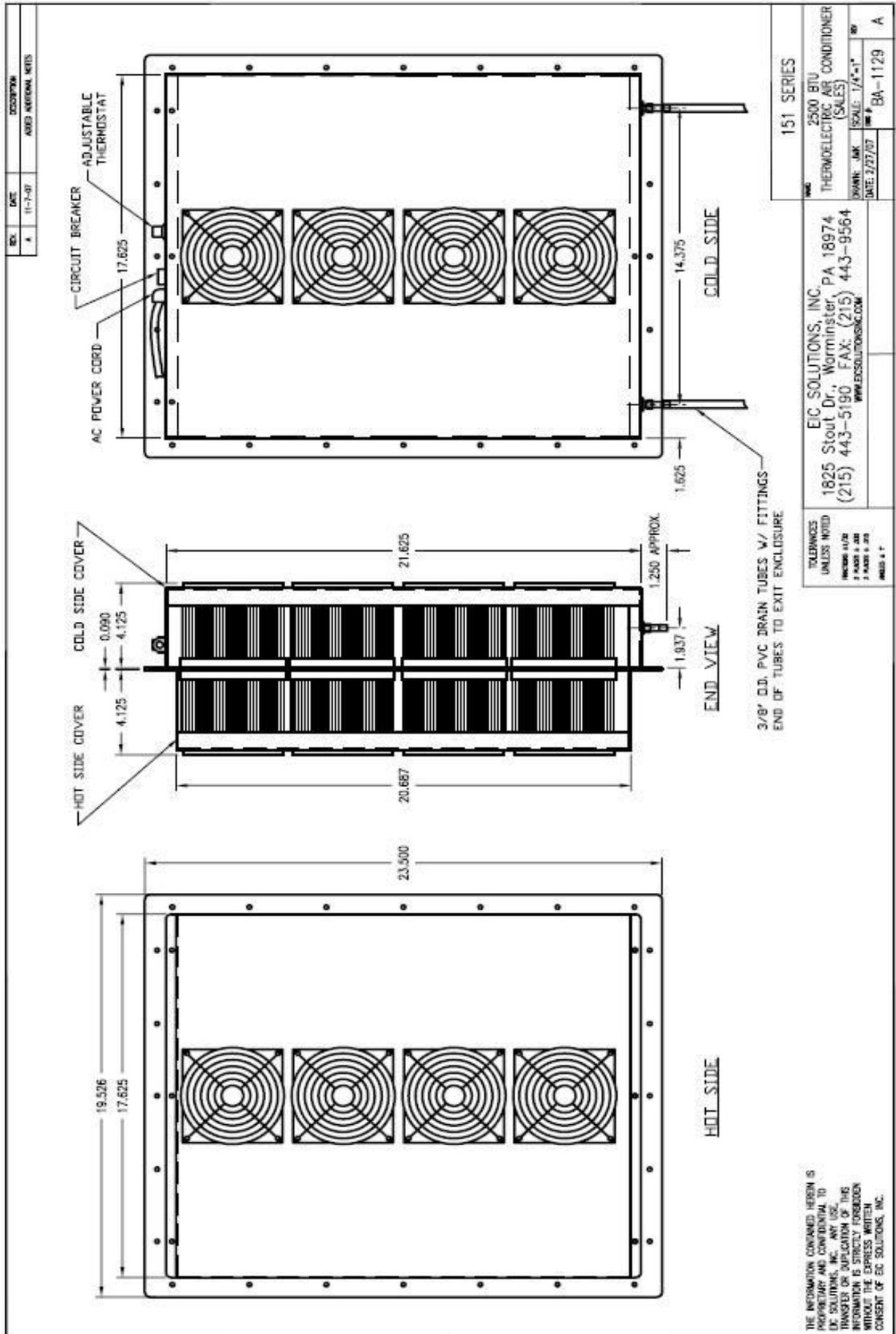
Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]
12.10.09	00:00	21,24	12.10.09	08:00	17,23	12.10.09	16:00	40,29
12.10.09	00:15	21,03	12.10.09	08:15	17,18	12.10.09	16:15	41,12
12.10.09	00:30	20,81	12.10.09	08:30	17,14	12.10.09	16:30	41,84
12.10.09	00:45	20,60	12.10.09	08:45	17,18	12.10.09	16:45	42,15
12.10.09	01:00	20,45	12.10.09	09:00	17,23	12.10.09	17:00	41,42
12.10.09	01:15	20,34	12.10.09	09:15	17,32	12.10.09	17:15	40,16
12.10.09	01:30	20,18	12.10.09	09:30	17,5	12.10.09	17:30	38,72
12.10.09	01:45	20,08	12.10.09	09:45	17,68	12.10.09	17:45	37,18
12.10.09	02:00	19,86	12.10.09	10:00	17,91	12.10.09	18:00	36,03
12.10.09	02:15	19,75	12.10.09	10:15	18,14	12.10.09	18:15	35,04
12.10.09	02:30	19,66	12.10.09	10:30	18,47	12.10.09	18:30	34,1
12.10.09	02:45	19,50	12.10.09	10:45	18,76	12.10.09	18:45	33,2
12.10.09	03:00	19,35	12.10.09	11:00	19,11	12.10.09	19:00	32,18
12.10.09	03:15	19,2	12.10.09	11:15	19,5	12.10.09	19:15	31,35
12.10.09	03:30	19,06	12.10.09	11:30	19,91	12.10.09	19:30	30,56
12.10.09	03:45	18,91	12.10.09	11:45	20,39	12.10.09	19:45	29,78
12.10.09	04:00	18,72	12.10.09	12:00	20,76	12.10.09	20:00	29,04
12.10.09	04:15	18,57	12.10.09	12:15	21,09	12.10.09	20:15	28,41
12.10.09	04:30	18,43	12.10.09	12:30	21,36	12.10.09	20:30	27,8
12.10.09	04:45	18,29	12.10.09	12:45	21,69	12.10.09	20:45	27,28
12.10.09	05:00	18,1	12.10.09	13:00	22,03	12.10.09	21:00	26,84
12.10.09	05:15	17,96	12.10.09	13:15	22,61	12.10.09	21:15	26,27
12.10.09	05:30	17,82	12.10.09	13:30	24,39	12.10.09	21:30	25,86
12.10.09	05:45	17,73	12.10.09	13:45	26,84	12.10.09	21:45	25,51
12.10.09	06:00	17,63	12.10.09	14:00	29,04	12.10.09	22:00	25,24
12.10.09	06:15	17,55	12.10.09	14:15	30,99	12.10.09	22:15	24,91
12.10.09	06:30	17,5	12.10.09	14:30	32,91	12.10.09	22:30	24,58
12.10.09	06:45	17,45	12.10.09	14:45	34,51	12.10.09	22:45	24,26
12.10.09	07:00	17,41	12.10.09	15:00	35,92	12.10.09	23:00	23,94
12.10.09	07:15	17,37	12.10.09	15:15	37,18	12.10.09	23:15	23,69
12.10.09	07:30	17,32	12.10.09	15:30	38,46	12.10.09	23:30	23,45
12.10.09	07:45	17,27	12.10.09	15:45	39,37	12.10.09	23:45	23,2

Tabela B3. Valores das temperaturas medidas no interior da caravana no dia 14 de Outubro de 2009

Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Dia	Hora	Temperatura [°C]
14.10.09	00:00	19,3	14.10.09	08:00	16,88	14.10.09	16:00	39,1
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	16,7	14.10.09	18:00	34
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	18,1	14.10.09	11:00	17,5	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	27,2
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	19,4	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	17,5	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	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	17,1	14.10.09	15:30	36,71	14.10.09	23:30	20,01
14.10.09	07:45	17	14.10.09	15:45	37,98	14.10.09	23:45	19,71

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Anexo C. Desenho técnico do Sistema Termoelétrico



Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Anexo D. Cargas térmicas, produção e consumo de energia para os dias mais desfavoráveis em Moura e no Porto.

Tabela D1. Dados referentes ao dia mais desfavorável em Moura

Mês	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Rad.G. Horiz. [W/m ²]	Rad N [W/m ²]	Rad E [W/m ²]	Rad S [W/m ²]	Rad W [W/m ²]	Q _{env} [W]	Q _{evidr} [W]	Q _{infiltr} [W]	Q _{interno} [W]	Q _{total} [W]	E _{TEC} [Wh]	E _{PV} [Wh]
7	26	1	17,8	0	0	0	0	0	-416,788	-77,04	-302,968908	480	-316,797	0	0
7	26	2	16,6	0	0	0	0	0	-486,253	-89,88	-353,463726	480	-449,596	0	0
7	26	3	15,4	0	0	0	0	0	-555,717	-102,72	-403,958544	480	-582,396	0	0
7	26	4	14,2	0	0	0	0	0	-625,182	-115,56	-454,453362	480	-715,195	0	0
7	26	5	14,2	0	0	0	0	0	-625,182	-115,56	-454,453362	480	-715,195	0	0
7	26	6	14,8	83	42	42	38	38	-553,885	-61,108304	-429,205953	480	-564,2	0	513,359
7	26	7	16,6	270	194	535	89	89	-296,537	131,946884	-353,463726	480	-38,0541	0	1629,56
7	26	8	19,4	465	163	742	124	119	-55,9677	229,957732	-235,642484	480	418,3476	1045,869	2725,504
7	26	9	22,9	651	136	774	219	136	193,8591	322,313248	-88,3659315	480	907,8064	2269,516	3697,023
7	26	10	26,7	811	141	678	325	141	434,3635	395,966676	71,5343255	100	1001,864	2504,661	4465,947
7	26	11	30,6	929	139	492	405	139	652,3317	434,975684	235,642484	100	1422,95	3557,375	4977,747
7	26	12	34,1	992	144	261	453	144	828,3005	448,200356	382,9190365	100	1759,42	4398,55	5209,109
7	26	13	36,9	992	144	144	453	261	989,6799	496,255576	500,7402785	100	2086,676	5216,689	5154,733
7	26	14	38,6	929	139	139	405	492	1113,303	575,170664	572,274604	100	2360,748	5901,871	4832,254
7	26	15	38,9	811	141	141	325	678	1137,353	609,559096	584,8983085	100	2431,81	6079,525	4272,251
7	26	16	38,1	651	136	136	219	774	1069,901	583,626328	551,2350965	100	2304,763	5761,907	3503,308
7	26	17	36,1	465	163	119	124	742	906,9958	505,000912	467,0770665	100	1979,074	4947,684	2573,481
7	26	18	33,2	270	194	89	89	535	661,7037	378,545244	345,047923	100	1485,297	3713,242	1541,818
7	26	19	29,6	83	42	38	38	42	302,8213	97,870336	193,563469	100	694,2551	1735,638	489,311
7	26	20	26,2	0	0	0	0	0	69,46465	12,84	50,494818	100	232,7995	581,9987	0
7	26	21	23,5	0	0	0	0	0	-86,8308	-16,05	-63,1185225	100	-65,9993	0	0
7	26	22	21,4	0	0	0	0	0	-208,394	-38,52	-151,484454	100	-298,398	0	0
7	26	23	19,8	0	0	0	0	0	-301,013	-55,64	-218,810878	100	-475,464	0	0
7	26	24	18,5	0	0	0	0	0	-376,267	-69,55	-273,5135975	100	-619,33	0	0

Tabela D2. Dados referentes ao dia mais desfavorável no Porto

Mês	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Rad.G. Horiz. [W/m ²]	Rad N [W/m ²]	Rad E [W/m ²]	Rad S [W/m ²]	Rad W [W/m ²]	Q _{env} [W]	Q _{evidr} [W]	Q _{infiltr} [W]	Q _{interno} [W]	Q _{total} [W]	E _{TEC} [Wh]	E _{pv} [Wh]
8	7	1	16,1	0	0	0	0	0	-515,196	-95,23	-374,503	480	-504,929	0	0
8	7	2	15,2	0	0	0	0	0	-567,295	-104,86	-412,374	480	-604,529	0	0
8	7	3	14,2	0	0	0	0	0	-625,182	-115,56	-454,453	480	-715,195	0	0
8	7	4	13,3	0	0	0	0	0	-677,28	-125,19	-492,324	480	-814,795	0	0
8	7	5	12,4	0	0	0	0	0	-729,379	-134,82	-530,196	480	-914,394	0	0
8	7	6	12,6	67	34	34	31	31	-688,173	-93,5939	-521,78	480	-823,546	0	176,6317
8	7	7	13,7	247	158	532	80	80	-474,862	87,01593	-475,493	480	-383,339	0	637,4217
8	7	8	15,7	434	122	734	146	112	-280,499	190,3123	-391,335	480	-1,52161	0	1091,839
8	7	9	18,2	614	130	767	278	130	-82,8295	295,8231	-286,137	480	406,8563	1017,141	1503,401
8	7	10	21,1	768	138	674	401	138	107,3147	370,277	-164,108	100	413,4835	1033,709	1831,469
8	7	11	24,1	882	139	492	493	139	275,0487	407,8903	-37,8711	100	745,0679	1862,67	2055,439
8	7	12	26,8	942	139	257	543	139	402,213	410,0247	75,74223	100	987,9799	2469,95	2159,609
8	7	13	28,8	942	139	139	543	257	517,2766	449,6746	159,9003	100	1226,851	3067,129	2144,022
8	7	14	30,2	882	139	139	493	492	626,0343	527,7552	218,8109	100	1472,6	3681,501	2010,926
8	7	15	30,7	768	138	138	401	674	659,8031	555,8948	239,8504	100	1555,548	3888,87	1770,47
8	7	16	30,1	614	130	130	278	767	602,191	521,6715	214,603	100	1438,465	3596,164	1442,949
8	7	17	28,5	434	122	112	146	734	456,7103	423,4709	147,2766	100	1127,458	2818,644	1045,878
8	7	18	26,1	247	158	80	80	532	240,2164	289,6022	46,28692	100	676,1055	1690,264	612,0814
8	7	19	23,4	67	34	31	31	34	-63,0089	22,43005	-67,3264	100	-7,90526	0	170,645
8	7	20	21	0	0	0	0	0	-231,549	-42,8	-168,316	100	-342,665	0	0
8	7	21	19,1	0	0	0	0	0	-341,535	-63,13	-248,266	100	-552,931	0	0
8	7	22	17,7	0	0	0	0	0	-422,577	-78,11	-307,177	100	-707,863	0	0
8	7	23	16,5	0	0	0	0	0	-492,041	-90,95	-357,672	100	-840,663	0	0
8	7	24	15,6	0	0	0	0	0	-544,14	-100,58	-395,543	100	-940,263	0	0

Anexo E. Dados de outros módulos consultados

Tabela E1. Dados referentes a outros módulos consultados aquando da escolha do módulo fotovoltaico

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

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Anexo F. Desenho técnico e curvas características do Módulo HIT-240HDE4 da Sanyo

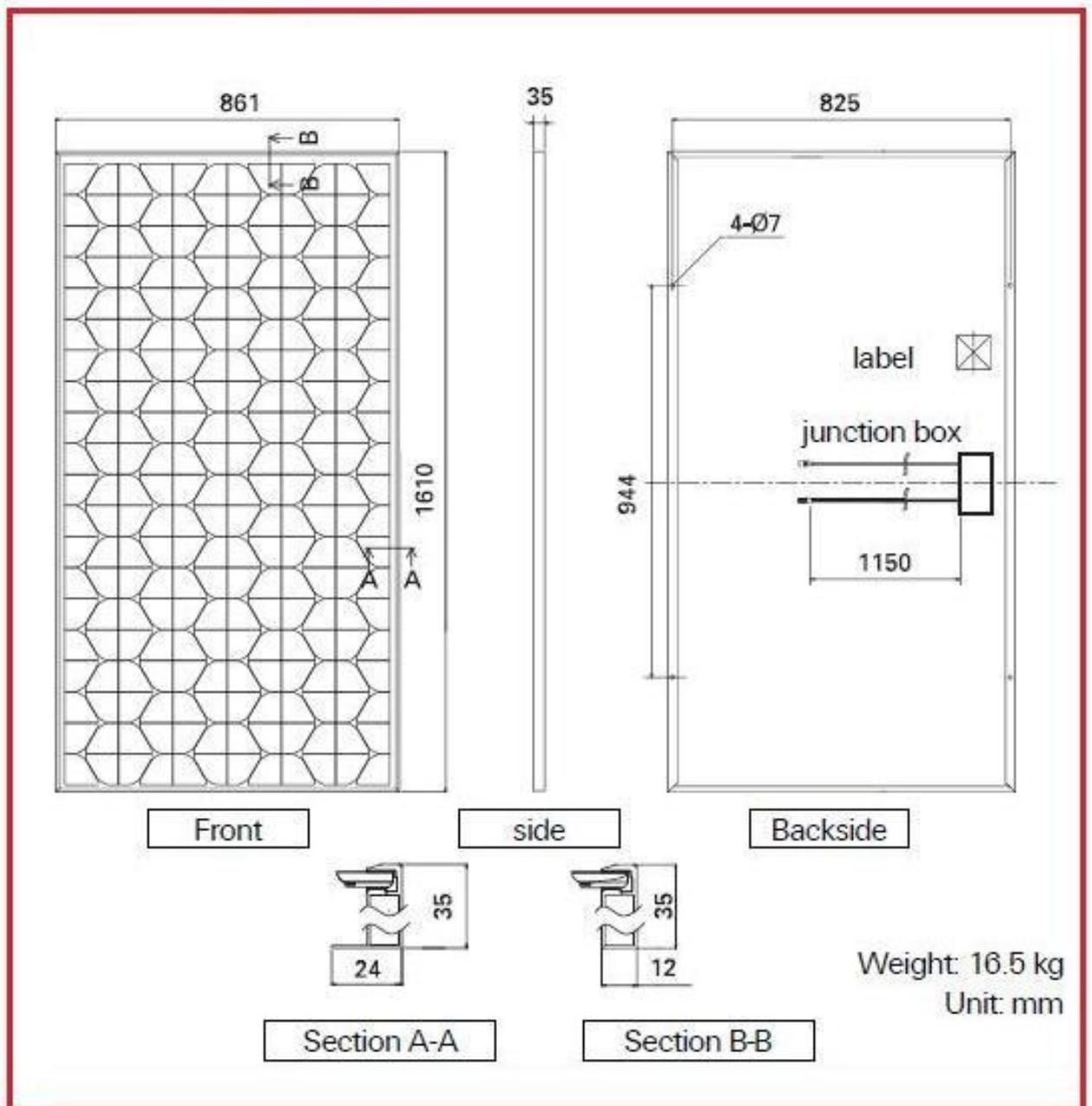


Figura F0.1. Desenho técnico do módulo fotovoltaico HIT-240HDE4 da Sanyo

Curvas características do Módulo HIT-240HDE4 da Sanyo

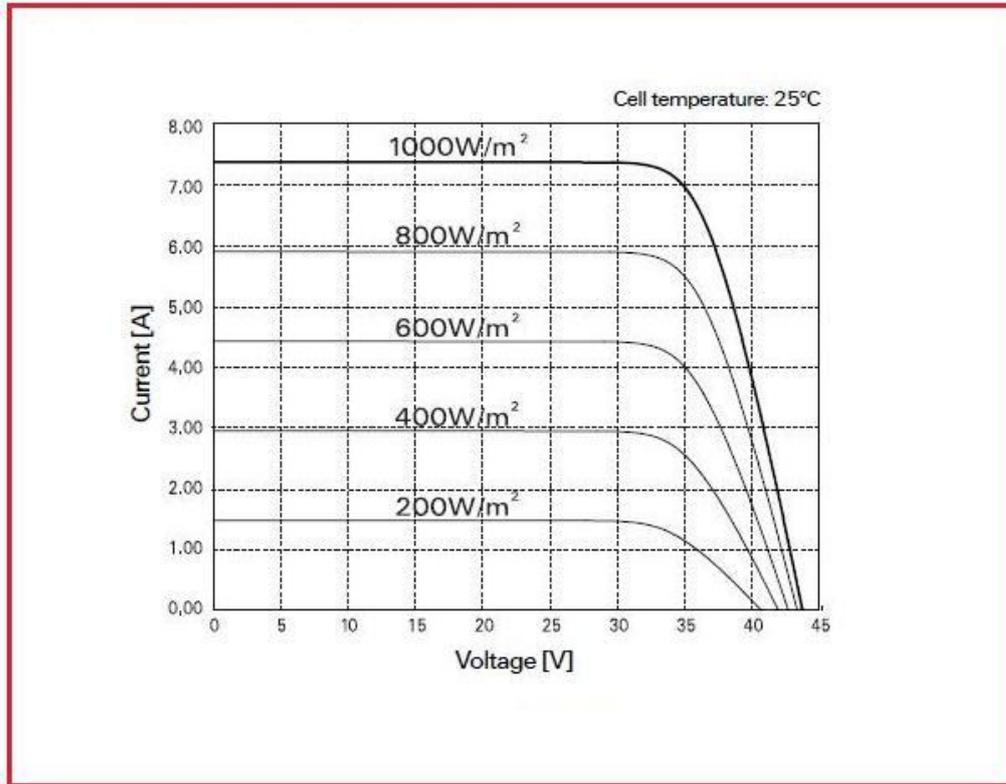


Figura F0.2. Dependência da curva característica do módulo com a irradiação

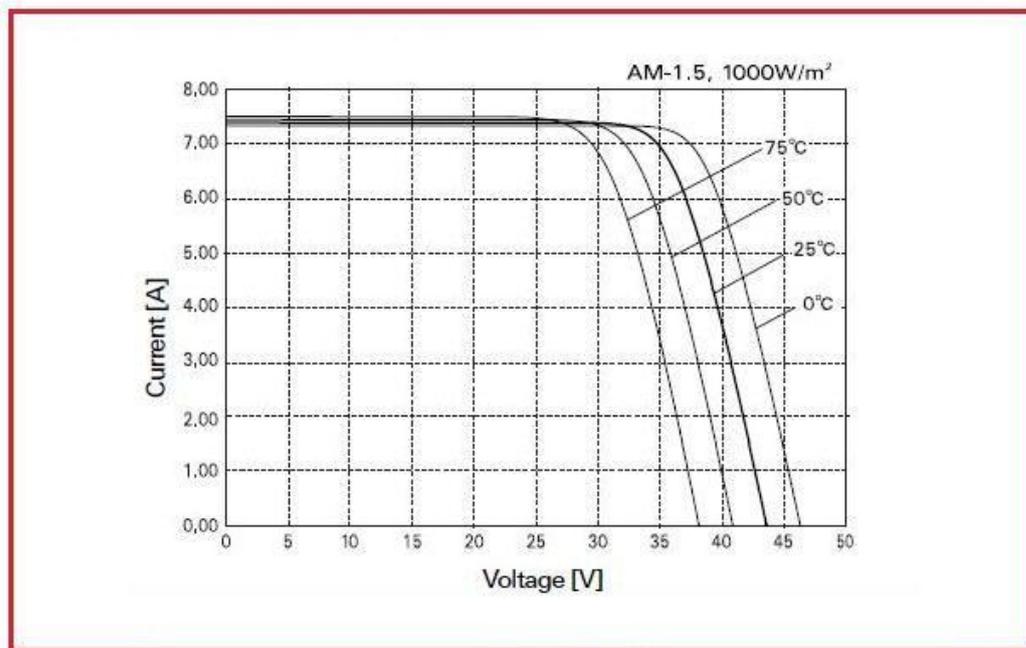


Figura F0.3. Dependência da curva característica do módulo com a temperatura da célula

Anexo G. Dados e resultados das simulações

Modelo 2 - Modelo com ar envolvente

Tabela G1. Parâmetros inseridos na simulação com o Modelo 2

Solver Setting	
Solver Formulation Time	Segregated Implicit Unsteady
Velocity Formulation	1st Order Implicit
Gradient Option	Absolute
Porous Formulation	Breen-Gauss Cell Based Superficial Velocity
Operating Conditions	
Operating Pressure [Pa]	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

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

Tabela G2. Propriedades dos materiais inseridos na simulação

Materials					
	ρ [kg/m ³]	Cp [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 G3. Condições de fronteira da simulação

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

Tabela G4. Perfil de temperatura para simulação do 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 janelas e ar envolvente

Tabela G5. Parâmetros da simulação com o Modelo 3

Solver Setting	
Solver Formulation	Segregated Implicit
Time	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

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

Tabela G6. Propriedades dos materiais inseridos na simulação

Materials					
	ρ [kg/m ³]	Cp [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

Tabela G7. Condições de fronteira da simulação

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

Tabela G8. Perfil de temperatura para simulação do 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 final

Tabela G9. Parâmetros da simulação com o Modelo 4

Solver Setting	
Solver Formulation	Segregated Implicit
Time	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 G10. Propriedades dos materiais inseridos na simulação do Modelo 4

Materials				
	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	λ [W/m.K]	ν [m ² /s]
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 G11. Condições de fronteira da simulação do Modelo 4

Boundary Conditions	
Zone	Thermal
Paredes	Perfil de Temperatura
Chão	Perfil de Temperatura
Tecto	Perfil de Temperatura
Janelas	Perfil de Temperatura

Tabela G12. Temperaturas médias obtidas nas simulações do Modelo 4 para $\alpha_{conv}=6$ e $10 \text{ W/m}^2.K$

$\alpha_{conv}=6 \text{ W/m}^2.K$			$\alpha_{conv}=10 \text{ W/m}^2.K$		
Hora	Tempo [s]	Temperatura [°C]	Hora	Tempo [s]	Temperatura [°C]
08:00	0	17,91	08:00	0	17,91
08:30	1800	18,41	08:30	1800	18,59
09:00	3600	19,72	09:00	3600	20,14
09:30	5400	21,42	09:30	5400	22,03
10:00	7200	23,22	10:00	7200	23,96
10:30	9000	24,99	10:30	9000	25,76
11:00	10800	26,39	11:00	10800	27,11
11:30	12600	27,52	11:30	12600	28,18
12:00	14400	28,64	12:00	14400	29,29
12:30	16200	29,69	12:30	16200	30,28
13:00	18000	30,19	13:00	18000	30,63
13:30	19800	30,80	13:30	19800	30,93
14:00	21600	31,08	14:00	21600	31,08
14:30	23400	35,61	14:30	23400	33,77
15:00	25200	42,32	15:00	25200	37,30
15:30	27000	46,17	15:30	27000	38,67
16:00	28800	47,84	16:00	28800	39,07
16:30	30600	48,39	16:30	30600	38,94
17:00	32400	48,09	17:00	32400	38,34
17:30	34200	47,26	17:30	34200	37,63
18:00	36000	45,63	18:00	36000	36,61
18:30	37800	43,76	18:30	37800	35,09
19:00	39600	40,89	19:00	39600	32,42
19:30	41400	36,90	19:30	41400	29,74
20:00	43200	32,33	20:00	43200	27,07
20:30	45000	28,78	20:30	45000	25,31
21:00	46800	26,37	21:00	46800	24,20
21:30	48600	24,80	21:30	48600	23,42
22:00	50400	23,71	22:00	50400	22,88
22:30	52200	22,91	22:30	52200	22,47
23:00	54000	22,29	23:00	54000	22,16
23:30	55800	21,76	23:30	55800	21,87
0:00	57600	21,18	0:00	57600	21,48

Validação Modelo

Tabela G13. Parâmetros da simulação para validação do Modelo

Solver Setting	
Solver Formulation	Segregated Implicit
Time	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 G14. Propriedades dos materiais inseridos na simulação para validação

Materials				
	ρ [kg/m ³]	Cp [J/(kg.K)]	λ [W/(m.K)]	ν [m ² /s]
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 G15. Condições de fronteira da simulação

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

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Simulações para $\alpha_{\text{conv}}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Tabela G16. Perfis de temperatura para as paredes na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

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 G17. Perfis de temperatura para as janelas na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

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

Os resultados para o modelo de validação correspondem ao valor das temperaturas obtidas nas simulações no ponto (0;0,7;-0,8) correspondente à posição do datalogger.

Tabela G18. Temperaturas no ponto obtidas nas simulações para $\alpha_{conv}=6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]
14:00	0	26,34
14:15	900	28,19
14:30	1800	33,22
14:45	2700	38,54
15:00	3600	43,06
15:15	4500	46,56
15:30	5400	49,04
15:45	6300	50,88
16:00	7200	52,41
16:15	8100	53,26
16:30	9000	53,49
16:45	9900	53,26
17:00	10800	52,58
17:15	11700	51,61
17:30	12600	50,04
17:45	13500	47,91
18:00	14400	45,29
18:15	15300	42,31
18:30	16200	39,39
18:45	17100	36,8
19:00	18000	34,52
19:15	18900	32,53
19:30	19800	30,79
19:45	20700	29,23
20:00	21600	27,77
20:15	22500	26,45
20:30	23400	25,31
20:45	24300	24,41
21:00	25200	23,71
21:15	26100	23,17
21:30	27000	22,73
21:45	27900	22,33
22:00	28800	21,95

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Simulações para $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Tabela G19. Perfis de temperatura para as paredes na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2.\text{K}$

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 G20. Perfis de temperatura para as janelas na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2.\text{K}$

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 G21. Temperaturas no ponto obtidas nas simulações para $\alpha_{conv}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]
14:00	0	26,34
14:15	900	28,29
14:30	1800	32,78
14:45	2700	37,43
15:00	3600	41,32
15:15	4500	44,25
15:30	5400	46,47
15:45	6300	47,73
16:00	7200	48,69
16:15	8100	49,36
16:30	9000	49,30
16:45	9900	48,73
17:00	10800	47,99
17:15	11700	46,98
17:30	12600	45,37
17:45	13500	43,24
18:00	14400	40,67
18:15	15300	37,84
18:30	16200	35,14
18:45	17100	32,8
19:00	18000	30,81
19:15	18900	29,09
19:30	19800	27,59
19:45	20700	26,24
20:00	21600	25,00
20:15	22500	23,88
20:30	23400	22,95
20:45	24300	22,25
21:00	25200	21,76
21:15	26100	21,43
21:30	27000	21,18
21:45	27900	20,95
22:00	28800	20,73

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Simulações para $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Tabela G22. Perfis de temperatura para as paredes na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

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 G23. Perfis de temperatura para as janelas na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

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 G24. Temperaturas no ponto obtidas nas simulações para $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]
14:00	0	26,34
14:15	900	29,03
14:30	1800	33,66
14:45	2700	37,6
15:00	3600	40,55
15:15	4500	42,63
15:30	5400	44,02
15:45	6300	44,86
16:00	7200	45,09
16:15	8100	44,98
16:30	9000	44,46
16:45	9900	43,69
17:00	10800	42,63
17:15	11700	41,29
17:30	12600	39,53
17:45	13500	37,19
18:00	14400	34,7
18:15	15300	32,02
18:30	16200	29,69
18:45	17100	27,86
19:00	18000	26,39
19:15	18900	25,25
19:30	19800	24,2
19:45	20700	23,33
20:00	21600	22,5
20:15	22500	21,73
20:30	23400	21,11
20:45	24300	20,7
21:00	25200	20,47
21:15	26100	20,36
21:30	27000	20,31
21:45	27900	20,24
22:00	28800	20,24

Simulações em Moura

Tabela G25. Parâmetros das simulações para Moura

Solver Setting	
Solver Formulation	Segregated Implicit
Time	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 G26. Propriedades dos materiais inseridos na simulação

Materials				
	ρ [kg/m ³]	Cp [J/(kg.K)]	λ [W/(m.K)]	ν [m ² /s]
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 G27. Condições de fronteira da simulação

Boundary Conditions	
Zone	Thermal
Paredes	Perfil de Temperatura
Chão	Perfil de Temperatura
Tecto	Perfil de Temperatura
Janelas	Perfil de Temperatura

Simulações para $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Tabela G28. Perfis de temperatura para as paredes na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

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 G29. Perfis de temperatura para as paredes na simulação com $\alpha_{Conv}=10 \text{ W/m}^2.K$

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

Tabela G30. Temperaturas médias obtidas nas simulações para $\alpha_{\text{conv}}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]	Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]
00:00	0	17,8	12:00	43200	51,03
00:30	1800	18,12	12:30	45000	52,8
01:00	3600	18,52	13:00	46800	54,89
01:30	5400	18,58	13:30	48600	56,3
02:00	7200	18,41	14:00	50400	57,69
02:30	9000	18,12	14:30	52200	58,54
03:00	10800	17,75	15:00	54000	58,2
03:30	12600	17,37	15:30	55800	57,8
04:00	14400	17,1	16:00	57600	56,52
04:30	16200	16,99	16:30	59400	54,2
05:00	18000	17,22	17:00	61200	51,06
05:30	19800	17,78	17:30	63000	47,08
06:00	21600	18,89	18:00	64800	42,59
06:30	23400	20,51	18:30	66600	38,09
07:00	25200	22,86	19:00	68400	34,39
07:30	27000	25,79	19:30	70200	31,49
08:00	28800	29,02	20:00	72000	29,29
08:30	30600	32,41	20:30	73800	27,56
09:00	32400	35,89	21:00	75600	26,13
09:30	34200	39,05	21:30	77400	24,9
10:00	36000	41,74	22:00	79200	23,85
10:30	37800	44,44	22:30	81000	22,95
11:00	39600	46,74	23:00	82800	22,16
11:30	41400	49,02	23:30	84600	21,49

Figuras relativas a perfis de temperatura para as simulações para $\alpha_{conv}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

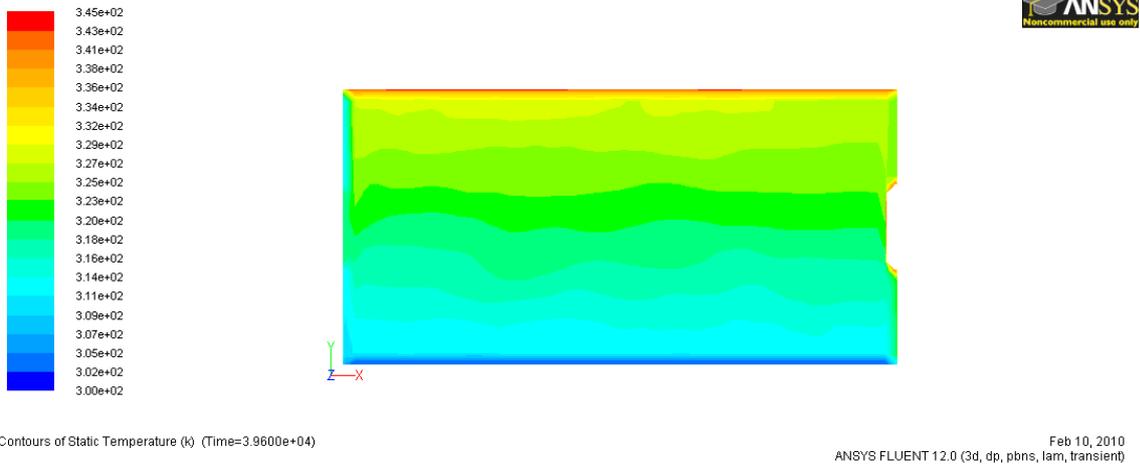


Figura G0.1. Perfil temperaturas às 11h para $\alpha_{Conv}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

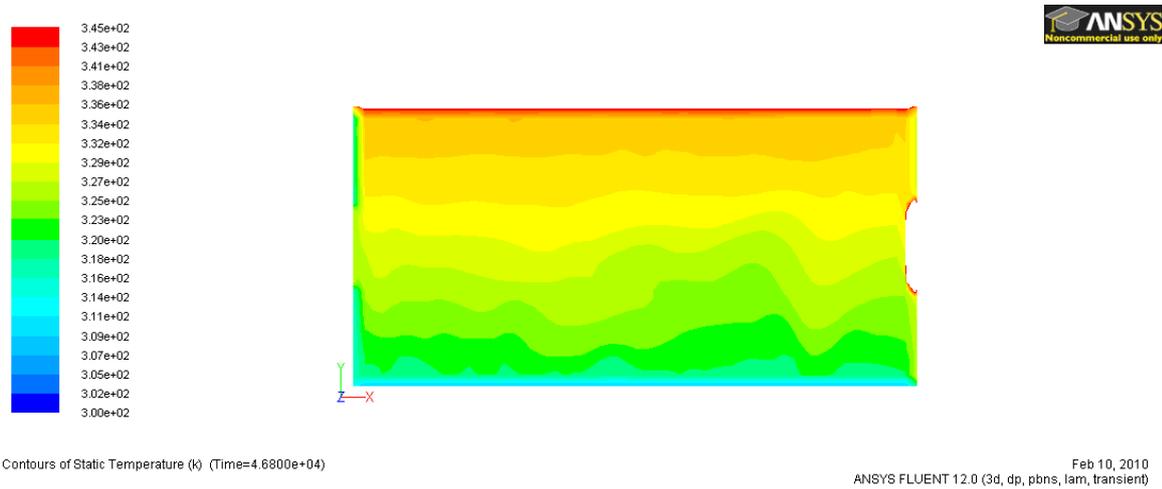


Figura G0.2. Perfil temperaturas às 13h para $\alpha_{Conv}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

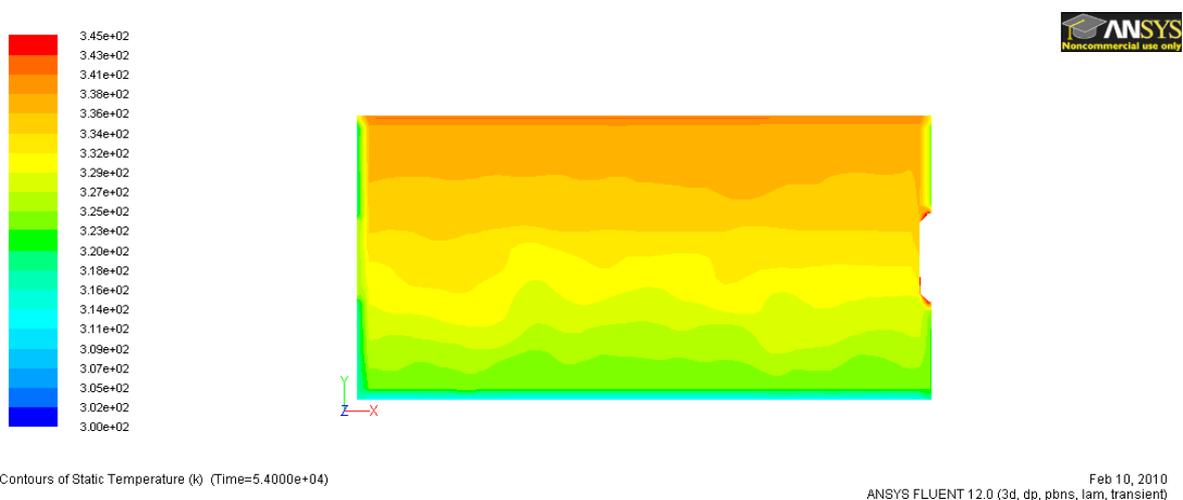


Figura G0.3. Perfil temperaturas às 17h para $\alpha_{Conv}=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

Simulações para $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Tabela G31. Perfis de temperatura para as paredes na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

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	289,27	288,56	288,62	288,55	288,62	287,95
7	21600	294,07	291,17	298,31	291,17	292,85	289,75
8	25200	299,99	294,45	304,42	294,53	295,15	292,55
9	28800	306,46	298,23	308,43	299,55	298,22	296,05
10	32400	312,82	302,11	310,69	305,05	302,10	299,85
11	36000	318,61	305,97	311,62	310,23	305,97	303,75
12	39600	323,12	309,55	311,42	314,49	309,55	307,25
13	43200	325,92	314,23	312,35	317,29	312,35	310,05
14	46800	326,61	319,62	313,97	318,23	313,97	311,75
15	50400	325,02	322,89	314,30	317,25	314,30	312,05
16	54000	321,66	323,63	313,42	314,75	313,42	311,25
17	57600	316,69	321,12	311,15	311,23	311,85	309,25
18	61200	310,67	314,91	307,77	307,77	309,45	306,35
19	64800	304,07	303,42	303,35	303,35	303,42	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 G32. Perfis de temperatura para as janelas na simulação com $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

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 G33. Temperaturas médias obtidas nas simulações para $\alpha_{\text{conv}}=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ em Moura

Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]	Tempo [h:m]	Tempo [s]	Temperatura [°C]
00:00	0	17,8	12:00	43200	48,03
00:30	1800	17,76	12:30	45000	49,47
01:00	3600	17,51	13:00	46800	51,18
01:30	5400	17,12	13:30	48600	52,56
02:00	7200	16,74	14:00	50400	53,44
02:30	9000	16,12	14:30	52200	53,99
03:00	10800	15,57	15:00	54000	53,92
03:30	12600	15,04	15:30	55800	53,09
04:00	14400	14,72	16:00	57600	51,36
04:30	16200	14,58	16:30	59400	48,86
05:00	18000	14,71	17:00	61200	45,11
05:30	19800	15,22	17:30	63000	41,04
06:00	21600	16,5	18:00	64800	37,33
06:30	23400	18,54	18:30	66600	34,05
07:00	25200	21,57	19:00	68400	31,42
07:30	27000	25,08	19:30	70200	29,2
08:00	28800	28,61	20:00	72000	27,36
08:30	30600	32,01	20:30	73800	25,76
09:00	32400	35,12	21:00	75600	24,41
09:30	34200	37,75	21:30	77400	23,2
10:00	36000	40,25	22:00	79200	22,16
10:30	37800	42,28	22:30	81000	21,11
11:00	39600	44,42	23:00	82800	20,37
11:30	41400	46,37	23:30	84600	19,69

Figuras relativas a perfis de temperatura para as simulações para $\alpha_{conv}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

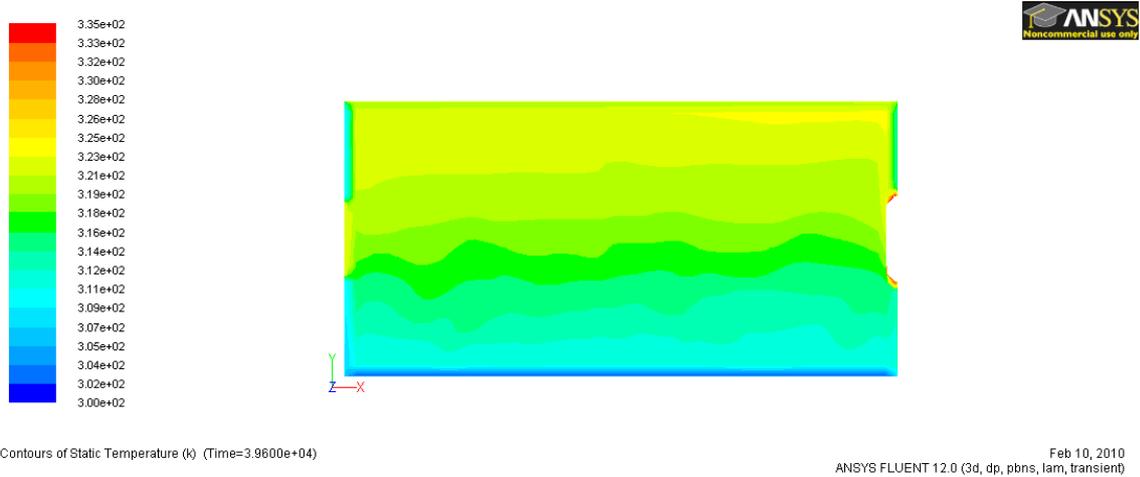


Figura G0.4. Perfil temperaturas às 11h para $\alpha_{Conv}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$ em Moura

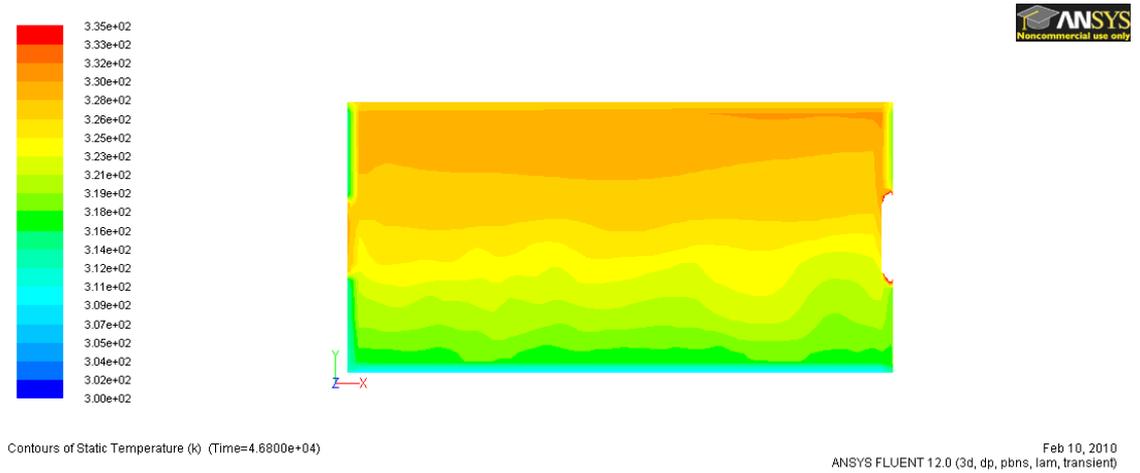


Figura G0.5. Perfil temperaturas às 13h para $\alpha_{Conv}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$ em Moura

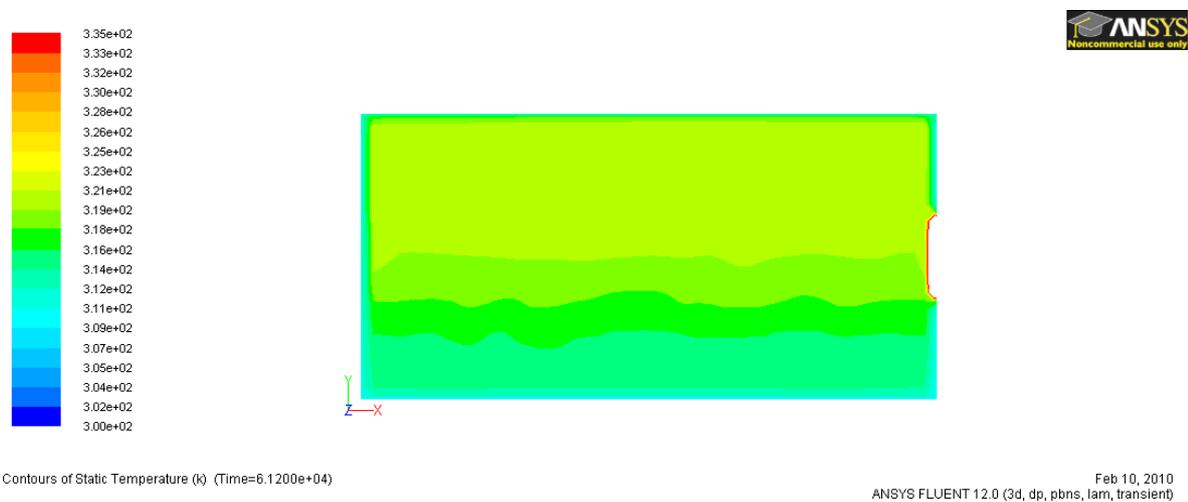


Figura G0.6. Perfil temperaturas às 17h para $\alpha_{Conv}=25 \text{ W/m}^2.\text{K}$ em Moura

Modelo sistema de refrigeração

Tabela G34. Parâmetros das simulações com sistema de refrigeração

Solver Setting	
Solver Formulation Time	Segregated Implicit Unsteady
Velocity Formulation	1st Order Implicit
Gradient Option	Absolute
Porous Formulation	Breen-Gauss Cell Based Superficial Velocity
Unsteady Formulation	
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 G35. Propriedades dos materiais inseridos na simulação

Materials				
	ρ [kg/m ³]	Cp [J/(kg.K)]	λ [W/(m.K)]	ν [m ² /s]
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 em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Tabela G36. Condições de fronteira da simulação

Boundary Conditions					
Paredes	Thermal [K]	Janelas	Thermal [K]	TEC	Momentum
Frente	313,44	Frente	438,73	Junção fria	Pressure Outlet
Direita	320,85	Direita	557,68	Laterais junção fria	Pressure Inlet
Esquerda	312,31	Esquerda	339,51		
Traseira	312,31	Traseira	331,28		
Chão	310,5				
Tecto	323,51				

Figuras relativas a perfis de temperatura para as simulações com sistema de refrigeração

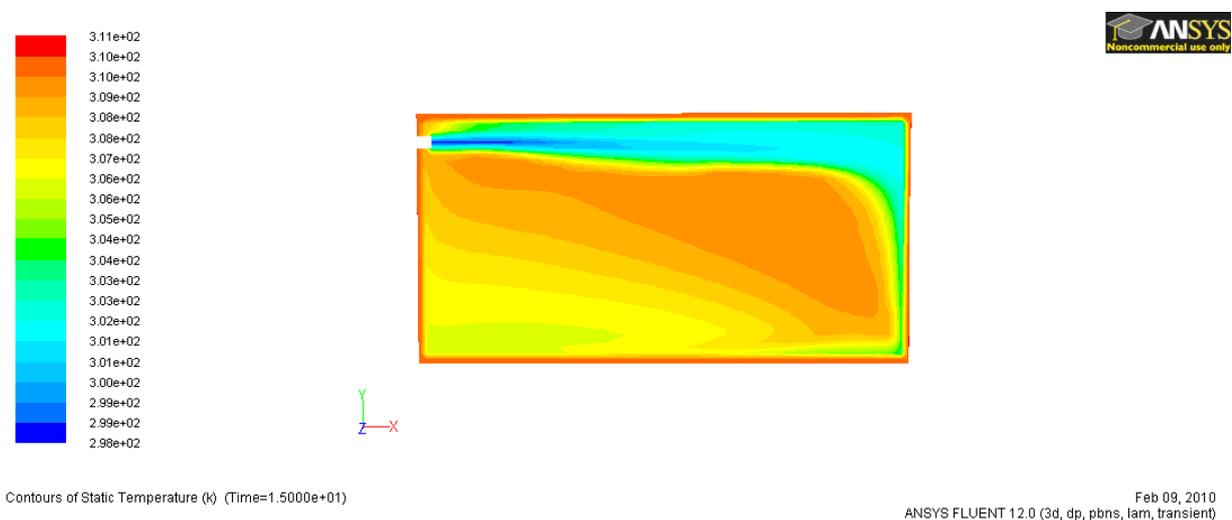


Figura G0.7. Perfil de temperaturas do ar no interior ao fim de 15 segundos

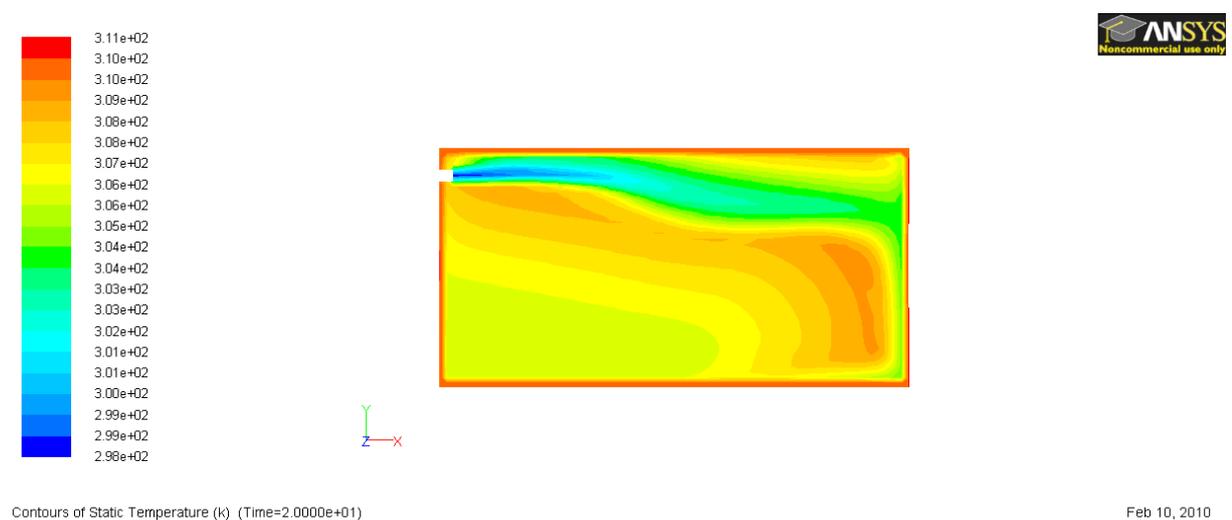


Figura G0.8. Perfil de temperaturas do ar no interior ao fim de 30 segundos

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

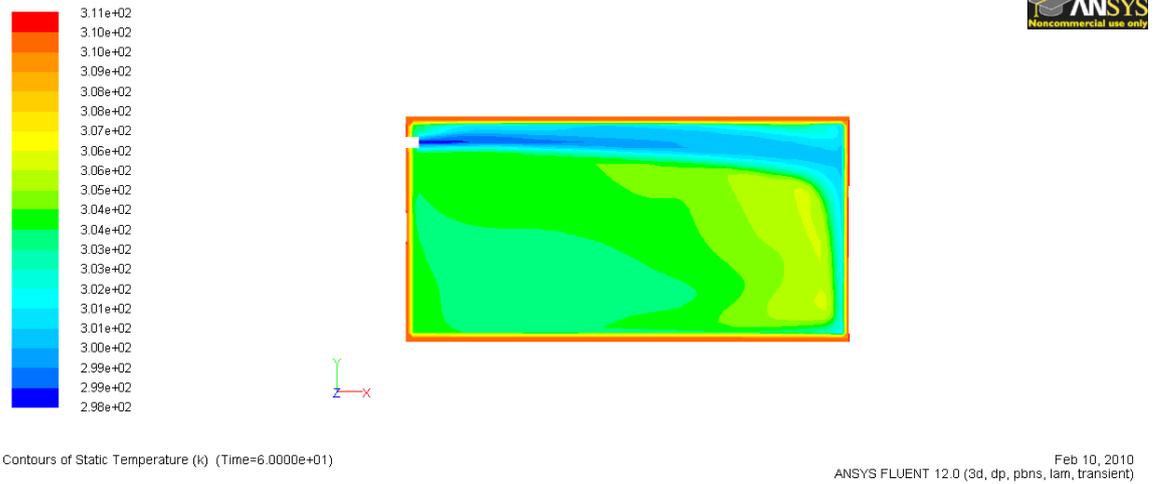


Figura G9. Perfil de temperaturas do ar no interior passados 60 segundos

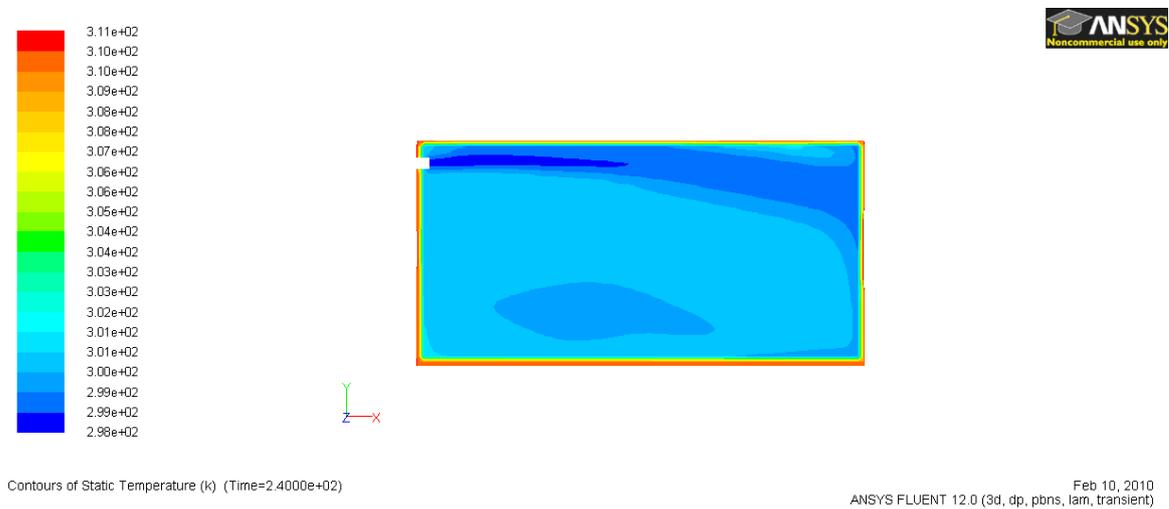


Figura G10. Perfil de temperaturas do ar no interior passados 240 segundos

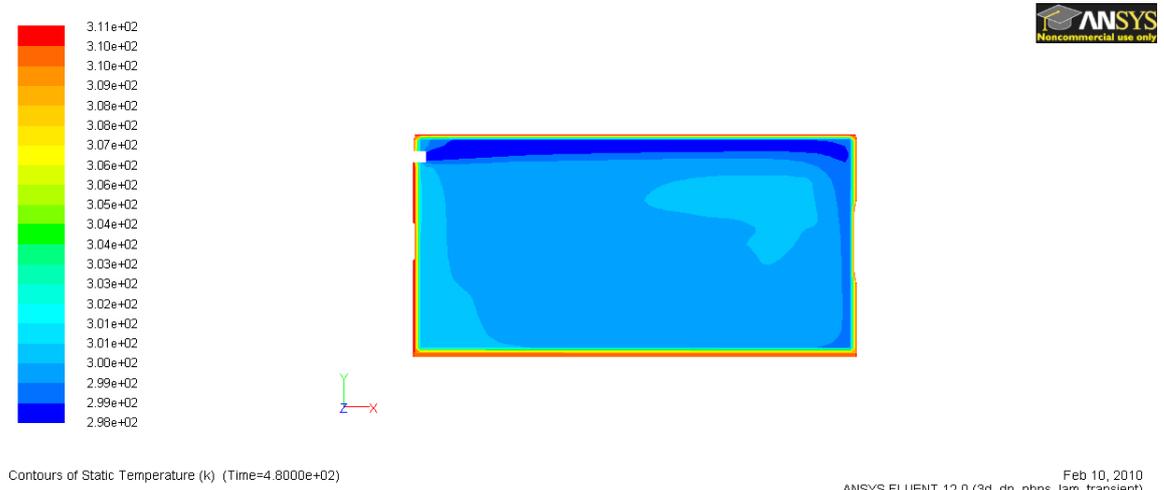


Figura G11. Perfil de temperaturas do ar no interior passados 480 segundos

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos

Anexo H. Dados meteorológicos do Porto e Moura para os dias de referência.**Tabela H1. Dados meteorológicos do dia 14 de Outubro obtidos do ano típico de referência para o Porto – Solterm.**

Mês	Dia	Hora	Temp [°C]	Precipitação [mm]	H.R. [%]	Nebulosidade total	RS-GH [W/m ²]	RS-DH [W/m ²]	RS-GV N [W/m ²]	RS-GV E [W/m ²]	RS-GV S [W/m ²]	RS-GV O [W/m ²]
10	14	1	11	0	86	2	0	0	0	0	0	0
10	14	2	10,8	0	86	2	0	0	0	0	0	0
10	14	3	10,6	0	86	2	0	0	0	0	0	0
10	14	4	10,4	0	86	2	0	0	0	0	0	0
10	14	5	10,2	0	86	2	0	0	0	0	0	0
10	14	6	10	0	86	2	0	0	0	0	0	0
10	14	7	10	0	85	6	16	16	7	8	8	7
10	14	8	10,7	0	83	4	164	93	49	517	237	49
10	14	9	12	0	79	2	336	130	80	653	450	80
10	14	10	14,1	0	72	2	485	144	100	604	620	100
10	14	11	16,3	0	65	1	596	145	111	451	743	111
10	14	12	18,3	0	58	1	655	143	116	236	807	116
10	14	13	19,8	0	53	1	655	143	116	116	807	236
10	14	14	20,7	0	50	1	596	145	111	111	743	451
10	14	15	21	0	49	2	485	144	100	100	620	604
10	14	16	20,4	0	51	2	336	130	80	80	450	653
10	14	17	19,1	0	56	4	164	93	49	49	237	517
10	14	18	17,5	0	61	5	16	16	7	7	8	8
10	14	19	16,1	0	66	2	0	0	0	0	0	0
10	14	20	14,9	0	69	2	0	0	0	0	0	0
10	14	21	14	0	72	2	0	0	0	0	0	0
10	14	22	13,3	0	75	2	0	0	0	0	0	0
10	14	23	12,7	0	77	2	0	0	0	0	0	0
10	14	24	12,2	0	78	2	0	0	0	0	0	0

Tabela H2. Dados meteorológicos do dia 26 de Julho obtidos do ano típico de referência para Moura – Solterm.

Mês	Dia	Hora	Temp. [°C]	Precipitação [mm]	H.R. [%]	Nebulosidade total	RS-GH [W/m ²]	RS-DH [W/m ²]	RS-GV N [W/m ²]	RS-GV E [W/m ²]	RS-GV S [W/m ²]	RS-GV O [W/m ²]
7	26	1	17,8	0	66	1	0	0	0	0	0	0
7	26	2	16,6	0	70	0	0	0	0	0	0	0
7	26	3	15,4	0	74	0	0	0	0	0	0	0
7	26	4	14,2	0	78	0	0	0	0	0	0	0
7	26	5	14,2	0	78	0	0	0	0	0	0	0
7	26	6	14,8	0	76	0	83	83	42	42	38	38
7	26	7	16,6	0	72	0	270	173	194	535	89	89
7	26	8	19,4	0	66	0	465	205	163	742	124	119
7	26	9	22,9	0	57	0	651	198	136	774	219	136
7	26	10	16,7	0	48	0	811	167	141	678	325	141
7	26	11	30,6	0	39	0	929	130	139	492	405	139
7	26	12	34,1	0	31	0	992	126	144	261	453	144
7	26	13	36,9	0	24	0	992	126	144	144	453	261
7	26	14	38,6	0	20	0	929	130	139	139	405	492
7	26	15	38,9	0	20	0	811	167	141	141	325	678
7	26	16	38,1	0	22	0	651	198	136	136	219	774
7	26	17	36,1	0	26	0	465	205	163	119	124	742
7	26	18	33,2	0	33	0	270	173	194	89	89	535
7	26	19	29,6	0	41	0	83	83	42	38	38	42
7	26	20	26,2	0	50	0	0	0	0	0	0	0
7	26	21	23,5	0	56	0	0	0	0	0	0	0
7	26	22	21,4	0	61	0	0	0	0	0	0	0
7	26	23	19,8	0	65	0	0	0	0	0	0	0
7	26	24	18,5	0	68	0	0	0	0	0	0	0

Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado em pilhas termoelétricas assistidas por painéis fotovoltaicos