



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

André Torres Ferreira

**Simulação térmica transiente de paredes  
de edifícios: um modelo para análise e  
validação de programas comerciais.**

Tese de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sobre a orientação de:

**Professor**

**Luís António de Sousa Barreiros Martins**

**Professora**

**Senhorinha Fátima Capela Fortunas Teixeira**







## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores pela disponibilidade e orientação me dedicada ao longo deste caminho.

Agradeço em especial aos meus pais pelo esforço e dedicação ao longo do meu percurso académico, e à minha irmã e namorada pelo apoio prestado.

Agradeço aos meus amigos e colegas que me acompanharam neste percurso, em especial ao Diogo Esteves e ao Tiago Vilaça pelo apoio e companheirismo durante estes 5 anos.



## Resumo

A plataforma legislativa Nacional relativa ao desempenho energético dos edifícios, designada por Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), tem por base a Diretiva 2002/91/CE (atualizada em 2010) e inclui o Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização em Edifícios (RSECE). Este regulamento obriga à simulação térmica dinâmica e detalhada de grandes edifícios novos utilizando *softwares* acreditados pela norma *ANSI/ASHRAE 140-2004*. Para os grandes edifícios existentes é obrigatória a realização de uma auditoria energética no prazo máximo de seis anos a qual, na maioria dos casos, também envolverá a referida simulação térmica.

Prevê-se assim um grande crescimento na utilização de *softwares* comerciais pelo que haverá interesse em desenvolver uma ferramenta simplificada que permita a sua análise e validação, dado que aqueles utilizam modelos cuja precisão por vezes se desconhece.

No trabalho presente foi desenvolvido um modelo, através do método dos volumes finitos, para a simulação térmica transiente de uma parede exterior dum edifício, o qual servirá de base para a criação de um programa de cálculo dinâmico das cargas térmicas num edifício simplificado, cujos resultados permitirão uma fácil comparação com os *softwares* comerciais.

O modelo foi desenvolvido de raiz em ambiente *MatLab* e permite a definição de uma parede multi-camada, para além de incluir condições de fronteira avançadas, quer para a superfície interior, quer para a superfície exterior. Neste caso, é possível introduzir perfis horários para a temperatura exterior do ar e radiação solar incidente, sendo ainda consideradas as trocas de calor por radiação em separado com o chão e com o céu.

Os resultados preliminares vieram demonstrar a importância da localização do isolamento na inércia térmica da parede, bem como a relevância da radiação solar incidente. Em algumas situações surgiram problemas de convergência numérica com origem nas condições-fronteira radiativas.



## Abstract

The Portuguese legislation for the Energy Performance and Certification of Buildings is based on the European directive 2002/91/EC (with a recast in 2010), and includes the Regulation for the Energy and Air-conditioning Systems of buildings (RSECE). The latter requires all new large buildings to validate a dynamic and detailed thermal simulation using software solutions qualified by the standard ANSI/ASHRAE 140-2004. Also, all existing large buildings must undergo an energy audit within six years and, in most cases, this will also result in the need for a detailed thermal simulation.

Therefore, a large increase in the use of commercial software packages is expected in the near future, so that there is the need for a simplified tool that will allow, by comparison, a better understanding in the analysis and validation of these products.

In this work, by using the finite volume methodology, a model was developed for the transient thermal simulation of a building wall. The work will be the basis for a software code that will enable the dynamic thermal-load evaluation of a simplified building. The results will allow an easy comparison with the commercial software packages.

The model was developed in the MATLAB<sup>®</sup> environment, allows the introduction of a multi-layer wall and includes advanced boundary-layer conditions, both for the interior and exterior wall surfaces. In the latter it is possible to use hourly profiles as inputs for the external air temperature and solar radiation. The heat-transfer by long wave radiation is separately treated from wall to floor and wall to sky.

The preliminary results demonstrate the importance of the insulation location in the inertial behavior of the wall, as well as the incident solar radiation in the resulting heat-fluxes. Some numerical convergence problems arose, due to particular irradiative boundary-layer conditions that will require a detailed analysis.



## Índice Geral

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Índice Geral.....	vii
Lista de abreviaturas .....	ix
Lista de Símbolos .....	x
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas .....	xvi
1. Introdução .....	1
2. Enquadramento teórico .....	3
2.1. Transferência de Calor .....	3
2.1.1. Condução.....	4
2.1.2. Convecção.....	8
2.1.3. Radiação .....	10
2.1.4. Características térmicas.....	11
2.1.5. Transferência de calor em edifícios .....	12
2.2. Regulamentos Energéticos.....	15
2.2.1. Diretiva 2002/91/CE .....	16
2.2.2. Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de abril .....	17
2.2.3. Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril .....	19
2.2.4. Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril .....	21
2.2.5. Diretiva 2010/31/EU .....	24
2.3. Simulação Térmica.....	25
2.3.1. Métodos de cálculo de cargas térmicas.....	27
2.3.1.1. Método da diferença de temperatura diferencial (TETD/TA).....	28
2.3.1.2. Método das funções de transferência (TFM).....	28
2.3.1.3. Método da diferença de temperatura (CLTD/SCL/CLF).....	29
2.3.1.4. Método do balanço energético (HBM).....	29
2.3.1.5. Método das séries temporais radiativas (RTS).....	30
2.3.2. Softwares de Simulação Térmica .....	32
2.3.2.1. RCCTE-STE.....	32

2.3.2.2.	<i>ENERGYPLUS</i> .....	34
2.3.2.3.	<i>TRNSYS</i> .....	36
2.3.2.4.	<i>ESP-r</i> .....	38
2.3.2.5.	<i>DOE2.1e</i> .....	39
2.3.2.6.	<i>TRACE700</i> .....	41
2.3.2.7.	<i>CARRIER_HAP</i> .....	42
3.	Modelo matemático .....	45
3.1.	Método dos volumes finitos .....	45
3.2.	Aplicação ao caso de estudo .....	48
3.3.	Implementação em <i>MATLAB</i> .....	55
4.	Resultados .....	59
4.1.	Validação do programa .....	59
4.2.	Estado não estacionário .....	76
5.	Conclusões .....	105
	Referências Bibliográficas .....	107
	Anexos .....	111
	Anexo A – Resolução do modelo matemático .....	113
	Anexo B – Funcionamento do programa .....	123
	Anexo C – Simulação para o dia 18 de fevereiro .....	127
	Anexo D – Simulação para o dia 26 de janeiro .....	141
	Anexo E – Simulação para o dia 31 de julho .....	155
	Anexo F – Simulação para o dia 10 de agosto .....	169

## **Lista de abreviaturas**

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

*MatLab – Matrix Laboratory*

SCE – Sistema de Certificação Energética

QAI – Qualidade do Ar Interior

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*

TETD/TA – *Total/Equivalent Temperature Differential/Time Averaging*

TFM – *Transfer Function Method*

CLTD/SCL/CLF - *Cooling Load Temperature Difference/Solar Cooling Load Factor/Cooling Load Factor*

HBM – *Heat Balance Method*

RTS – *Radiant Time Series*

## Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
$T_{ext}$	Temperatura exterior	K
$T_{int}$	Temperatura interior	K
$k$	Condutibilidade térmica	W/m.K
$\rho$	Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	Calor específico	J/kg.K
$\alpha$	Difusibilidade térmica	m <sup>2</sup> /s
$T_P^0$	Temperatura no ponto P no instante	K
$T_P$	Temperatura no ponto P no instante seguinte	K
$A$	Área	m <sup>2</sup>
$\Delta x$	Distância entre pontos	m
$\Delta t$	Intervalo de tempo	s
$h_{conv\ ext}$	Coefficiente de convecção exterior	W/m <sup>2</sup> .K
$h_{conv\ int}$	Coefficiente de convecção interior	W/m <sup>2</sup> .K
$h_{rad\ ext}$	Coefficiente de radiação exterior	W/m <sup>2</sup> .K
$h_{rad\ int}$	Coefficiente de radiação interior	W/m <sup>2</sup> .K
$h_{ext}$	Coefficiente de convecção e radiação exterior	W/m <sup>2</sup> .K
$h_{int}$	Coefficiente de convecção e radiação interior	W/m <sup>2</sup> .K
$I_{rad}$	Intensidade da radiação solar	W/m <sup>2</sup>

$\alpha_{abs}$	Coeficiente de absorção
$\varepsilon$	Emissividade
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Condução de calor na parede. ....	5
Figura 2.2 – Condução de calor num volume, em uma direcção. ....	5
Figura 2.3 – Variação da temperatura na parede.....	6
Figura 2.4 – Variação da temperatura na parede.....	7
Figura 2.5 – Variação da temperatura na parede.....	7
Figura 2.6 – Convecção numa parede. ....	9
Figura 2.7 – Variação da temperatura na superfície da parede. ....	9
Figura 2.8 – Radiação. ....	11
Figura 2.9 – Circuito reo-elétrico (Dec.Lei n.º 79/2006 de 4 de abril).....	33
Figura 3.1 – Esquema dos pontos considerados. ....	46
Figura 3.2 – Demonstração do método de cálculo utilizado. ....	48
Figura 3.3 – Esquema do volume de controlo para 2 materiais. ....	52
Figura 3.4 – Ambiente <i>MatLab</i> .....	55
Figura 3.5 – Um programa em ambiente <i>MatLab</i> .....	55
Figura 3.6 – Estrutura do programa.....	56
Figura 3.7 – Código do menu inicial do programa implementado. ....	57
Figura 4.1 – Distribuição dos pontos.....	60
Figura 4.2 – Distribuição das etapas.....	60
Figura 4.3 – Variação da temperatura no betão ao longo do tempo. ....	63
Figura 4.4 – Variação do fluxo no betão ao longo do tempo.....	63
Figura 4.5 – Variação da temperatura no tijolo ao longo do tempo.....	64
Figura 4.6 – Variação do fluxo no tijolo ao longo do tempo. ....	64
Figura 4.7 – Variação da temperatura no isolante ao longo do tempo.....	65
Figura 4.8 – Variação do fluxo no isolante ao longo do tempo.....	65
Figura 4.9 – Temperaturas em estado estacionário ao longo da espessura da parede. ....	66
Figura 4.10 – Variação da temperatura no betão ao longo do tempo. ....	68
Figura 4.11 – Variação da temperatura no tijolo ao longo do tempo.....	68
Figura 4.12 – Variação da temperatura no isolante ao longo do tempo.....	69
Figura 4.13 – Temperaturas finais para os 3 materiais em regime estacionário ao longo da espessura da parede. ....	69
Figura 4.14 – Distribuição dos pontos na parede ....	70

Figura 4.15 – Variação da temperatura na parede ao longo do tempo. ....	72
Figura 4.16 – Temperaturas finais. ....	72
Figura 4.17 – Temperaturas finais ao longo da espessura com o efeito da radiação solar. ....	75
Figura 4.18 –Dados climática para o dia 1 de Janeiro retirada da base de dados do SOLTERM. .....	78
Figura 4.19 – Variação da temperatura ao longo do dia 26 de janeiro. ....	79
Figura 4.20 – Variação da radiação solar ao longo do dia 26 de janeiro.....	80
Figura 4.21 – Variação da temperatura ao longo do dia 18 de fevereiro.....	81
Figura 4.22 – Variação da radiação solar ao longo do dia 18 de fevereiro.....	81
Figura 4.23 – Variação da temperatura ao longo do dia 31 de julho. ....	82
Figura 4.24 – Variação da radiação solar ao longo do dia 31 de julho.....	83
Figura 4.25 – Variação da temperatura ao longo do dia 10 de agosto.....	84
Figura 4.26 – Variação da radiação solar ao longo do dia 10 de agosto.....	84
Figura 4.27 – Variação da temperatura nas faces ao longo do tempo (18 de fevereiro). ....	86
Figura 4.28 – Variação da temperatura exterior ao longo do tempo (18 de fevereiro). ....	86
Figura 4.29 – Variação do fluxo (18 de Fevereiro) .....	87
Figura 4.30 – Variação de radiação solar (18 de fevereiro). ....	87
Figura 4.31 – Variação da temperatura nas faces ao longo do tempo (26 de janeiro).....	88
Figura 4.32 – Variação da temperatura exterior ao longo do tempo (26 de janeiro). ....	88
Figura 4.33 – Variação do fluxo (26 de janeiro). ....	89
Figura 4.34 – Variação da radiação solar (26 de janeiro).....	89
Figura 4.35 – Variação da temperatura ao longo do tempo (31 de julho). ....	90
Figura 4.36 – Variação da temperatura exterior ao longo do tempo (31 de julho). ....	91
Figura 4.37 – Variação do fluxo (31 de julho). ....	91
Figura 4.38 – Variação da radiação solar ao longo do tempo (dia 31 de julho).....	92
Figura 4.39 – Variação da temperatura nas faces da parede a Este.....	93
Figura 4.40 – Variação do fluxo a Este. ....	94
Figura 4.41 – Variação da radiação solar a Este.....	94
Figura 4.42 – Variação da temperatura nas faces da parede a Oeste.....	95
Figura 4.43 – Variação do fluxo a Oeste.....	95
Figura 4.44 – Variação da radiação solar a Oeste.....	96
Figura 4.45 – Variação da temperatura na parede escura. ....	97

Figura 4.46 – Variação do fluxo na parede escura.....	98
Figura 4.47 – Esquema da parede_1 e parede_2.....	99
Figura 4.48 – Variação da temperatura na parede_1 (31 de julho).....	102
Figura 4.49 – Variação da temperatura na parede_1 (18 de fevereiro).....	102
Figura 4.50 – Variação da temperatura na parede_2 (31 de julho).....	103
Figura 4.51 – Variação da temperatura na parede_2 (18 de fevereiro).....	103
Figura 4.52 – Temperaturas finais.....	104
Figura B.1 – Menu inicial.....	124
Figura B.2 – Menu de escolha das temperaturas.....	124
Figura B.3 – Menu de escolha dos materiais.....	125
Figura B.4 – Defenição das materiais e suas características.....	125
Figura B.5 – Definição do dia.....	126
Figura C.1 – Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este).....	128
Figura C.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este).....	129
Figura C.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este).....	130
Figura C.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este).....	131
Figura C.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul).....	132
Figura C.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).....	133
Figura C.7 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).....	134
Figura C.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul).....	135
Figura C.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste).....	136
Figura C.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste).....	137
Figura C.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste).....	138
Figura C.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste).....	139
Figura D.1 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este).....	142
Figura D.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este).....	143
Figura D.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este).....	144
Figura D.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este).....	145
Figura D.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul).....	146
Figura D.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).....	147
Figura D.7 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Sul).....	148
Figura D.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul).....	149

Figura D.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste). .....	150
Figura D.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste). .....	151
Figura D.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste). .....	152
Figura D.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste). .....	153
Figura E.1 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este). .....	156
Figura E.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este). .....	157
Figura E.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este). .....	158
Figura E.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este). .....	159
Figura E.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul). .....	160
Figura E.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul). .....	161
Figura E.7 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Sul). .....	162
Figura E.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul). .....	163
Figura E.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste). .....	164
Figura E.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste). .....	165
Figura E.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste). .....	166
Figura E.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste). .....	167
Figura F.1 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este). .....	170
Figura F.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este). .....	171
Figura F.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este). .....	172
Figura F.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este). .....	173
Figura F.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul). .....	174
Figura F.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul). .....	175
Figura F.7 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Sul). .....	176
Figura F.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul). .....	177
Figura F.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste). .....	178
Figura F.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste). .....	179
Figura F.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste). .....	180
Figura F.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste). .....	181

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classe de inércia térmica de um edifício segundo o RCCTE.....	15
Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais .....	59
Tabela 4.2 – Valores obtidos através da simulação em <i>MatLab</i> .....	61
Tabela 4.3 – Valores obtidos através do cálculo analítico.....	62
Tabela 4.4 – Valores obtidos na simulação em <i>MatLab</i> e analiticamente .....	67
Tabela 4.5 – Constituição da parede.....	70
Tabela 4.6 – Valores obtidos em <i>MatLab</i> e analiticamente .....	71
Tabela 4.7 – Resultados obtidos no <i>MatLab</i> para o caso 4 .....	74
Tabela 4.8 – Resultados obtidos em <i>MatLab</i> .....	76
Tabela 4.9 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 26 de janeiro .....	79
Tabela 4.10 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 18 de fevereiro .....	80
Tabela 4.11 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 31 de julho .....	82
Tabela 4.12 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 10 de agosto .....	83
Tabela 4.13 – Constituição da parede.....	85
Tabela 4.14 – Resultados obtidos para os dias 18 de fevereiro e 26 de janeiro.....	90
Tabela 4.15 – Resultados obtidos para o dia 18 de fevereiro e 31 de julho.....	92
Tabela 4.16 – Resultados obtidos para as orientações consideradas .....	96
Tabela 4.17 – Resultados obtidos para uma parede escura e clara .....	98
Tabela 4.18 – Constituição das paredes .....	99
Tabela 4.19 – Condições para a simulação.....	100
Tabela 4.20 – Resultados obtidos para parede_1.....	100
Tabela 4.21 – Resultados obtidos para parede_2.....	101
Tabela 4.22 – Constituição da parede.....	104

## 1. Introdução

O presente estudo foi realizado no âmbito da especialização em Energia e Ambiente do ciclo de estudos integrado conducente ao grau de mestre em engenharia mecânica.

A plataforma legislativa, designada globalmente por Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE), transpõe para Portugal a Diretiva Europeia 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios, habitualmente conhecida como EPBD. Esta Diretiva foi recentemente reformulada, com efeitos a partir de fevereiro de 2012 e definição de novas metas até 2020.

Neste âmbito, o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) impõe, para os edifícios com área útil superior a 1000 m<sup>2</sup>, a sua simulação térmica dinâmica e multizona utilizando *softwares* acreditados pela norma *ANSI/ASHRAE 140-2004*.

Até ao momento são poucas as entidades portuguesas que efetuam adequadamente simulações térmicas detalhadas, talvez devido ao seu elevado custo e complexidade, mas também pelo facto de até agora só terem sido aplicadas no projeto de grandes edifícios novos. No entanto, prevê-se que este seja um mercado de grande crescimento no futuro próximo, devido à obrigatoriedade de todos os grandes edifícios existentes passarem a cumprir o RSECE num prazo máximo de 6 anos e ao facto dos edifícios novos estarem sujeitos a uma auditoria após 3 anos de funcionamento, a qual colocará novas exigências em termos da qualidade das simulações.

Nomeadamente, os modelos para as simulações deverão incluir os detalhes do sistema de climatização e permitir a utilização de perfis de utilização reais e nominais, bem como de dados climatéricos reais.

A maioria das modelações térmicas de edifícios efetuadas em Portugal tem recorrido ao programa de simulação dinâmica simplificada (unizona) RCCTE-STE do LNEG, ou a programas de simulação detalhada “fechados”. Em ambas as situações, há limitações ou pouca informação relativamente às metodologias de cálculo utilizadas, bem como no acesso detalhado ou personalizado aos resultados, pelo que haverá interesse em desenvolver uma ferramenta simplificada que permita a sua análise e validação, dado que aqueles utilizam modelos cuja precisão por vezes se desconhece.

Assim, o objetivo principal do trabalho presente foi o desenvolvimento de um modelo, através do método dos volumes finitos, para a simulação térmica transiente de uma parede exterior dum edifício, o qual servirá de base para a criação de um programa de cálculo dinâmico das cargas térmicas num edifício-teste simplificado (edifício virtual), cujos resultados permitirão uma fácil comparação com os *softwares* comerciais.

O modelo, desenvolvido de raiz em ambiente *MatLab*, permite a simulação de uma parede multi-camada, para além de incluir condições fronteira avançadas e realistas, quer para a superfície interior, quer para a superfície exterior.

As várias fases do trabalho envolveram, para além do estado da arte (legislação relevante, programação em *MatLab*, transferência de calor transiente, softwares de simulação), o desenvolvimento do programa de simulação e a análise de resultados para vários tipos de parede e sob diferentes condições-fronteira.

Com este trabalho, pretende-se adquirir conhecimentos avançados sobre a simulação térmica dinâmica e detalhada de edifícios, numa perspetiva de poder avaliar melhor as metodologias utilizadas e os resultados obtidos com programas comerciais.

## 2. Enquadramento teórico

Neste capítulo irão ser abordados alguns conceitos teóricos relativos ao trabalho realizado, bem como a plataforma legislativa existente para a simulação térmica de edifícios e *softwares* de simulação térmica existentes.

### 2.1. Transferência de Calor

Holman (1989) afirma que a transferência de calor é a ciência que estuda a energia transferida entre corpos, resultante da diferença de temperatura entre dois corpos, sendo possível determinar como a energia transferida entre dois corpos se processa, bem como a taxa a que se dá essa troca de energia.

Em Termodinâmica a energia transferida entre dois corpos é definida como calor, e pode-se calcular qual a energia necessária para que um determinado sistema passe de um estado de equilíbrio para outro, mas não é possível determinar qual a velocidade a que essa mudança entre estados se processa, porque durante essa mudança de estados o sistema não está em equilíbrio.

Em suma, na Termodinâmica é possível prever qual a temperatura final do sistema, quando este está em equilíbrio, mas não o tempo que este demora a atingir o estado de equilíbrio. No entanto, em Transferência de Calor pode-se prever as temperaturas dos corpos constituintes do sistema em função do tempo.

Em Transferência de Calor existem três mecanismos diferentes de se verificar a transferência de energia entre dois corpos diferentes, que são:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

### 2.1.1. Condução

A energia é transferida por condução quando existe um gradiente de temperaturas num corpo, e a energia flui da região a temperatura mais elevada para a região de menor temperatura. O rácio de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura:

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Em que:

- $Q$  – Calor transferido [W]
- $A$  – Área do elemento [ $\text{m}^2$ ]
- $\Delta T$  – Variação da Temperatura [K]
- $\Delta x$  – Espessura do elemento [m]

Silva (2006) considera também que a condução depende da condutibilidade térmica do material ( $k$ ) e da espessura do elemento da envolvente. Segundo a Lei de *Fourier* para a condução, o fluxo de calor relaciona a condutibilidade térmica e o gradiente de temperaturas.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

Em que:

- $q$  – fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $k$  – condutibilidade térmica [ $\text{W}/(\text{m.K})$ ]
- $T$  – temperatura [K]

A figura 2.1 representa o processo de transferência de calor por condução numa parede, assumindo que  $T_1$  é superior a  $T_2$  o fluxo de calor será na direção da face a  $T_1$  para  $T_2$ .

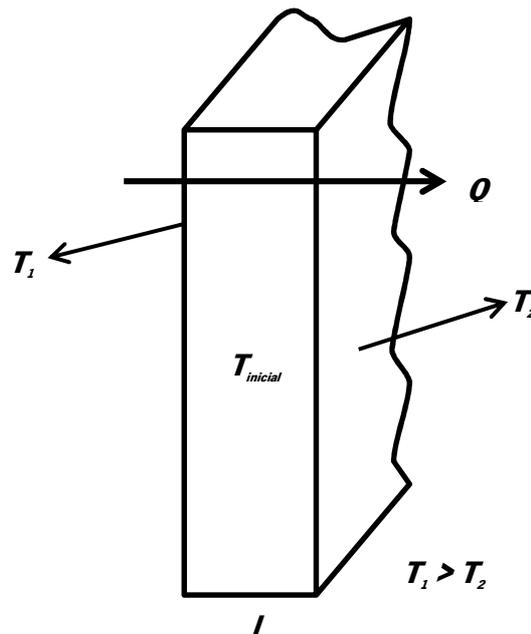


Figura 2.1 – Condução de calor na parede.

Se a temperatura na parede variar ao longo do tempo, ou existam fontes de calor considera-se que estes fatores estão presentes no corpo. Tal como indicado na figura 2.2, para um elemento de espessura  $\partial x$  o balanço de energia vem:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A \partial x = \rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t} \partial x - A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \partial x \right] \quad (2.3)$$

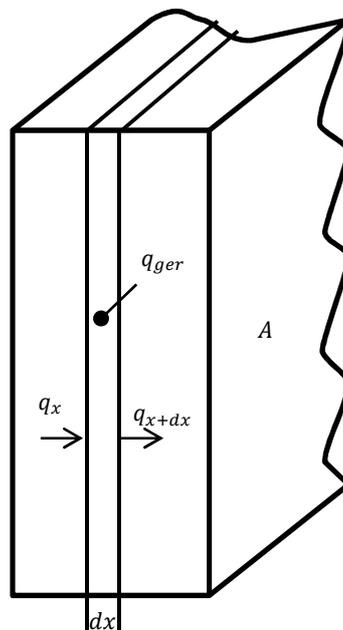


Figura 2.2 – Condução de calor num volume, em uma direcção.

Em que:

- $q_x$  – Energia que chega ao elemento ( $-kA \frac{\partial T}{\partial x}$ )
- $q_{ger}$  – Calor gerando no elemento ( $\dot{q}A\partial x$ )
- $q_{x+dx}$  – Energia que sai do elemento ( $-A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \partial x \right]$ )
- $\rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t} \partial x$  – Mudança na energia interna.

A equação 2.3 pode ser descrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

As equações 2.3 e 2.4 são referentes para o caso de condução de calor em apenas uma direção e em regime transiente e  $\dot{q}$  representa a energia gerada por unidade de volume [W/m<sup>3</sup>].

Assumindo uma  $T_{inicial}$  para a parede, nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5 pode-se observar como a temperatura no interior da parede varia ao longo do tempo, desde o instante inicial até ao instante final.

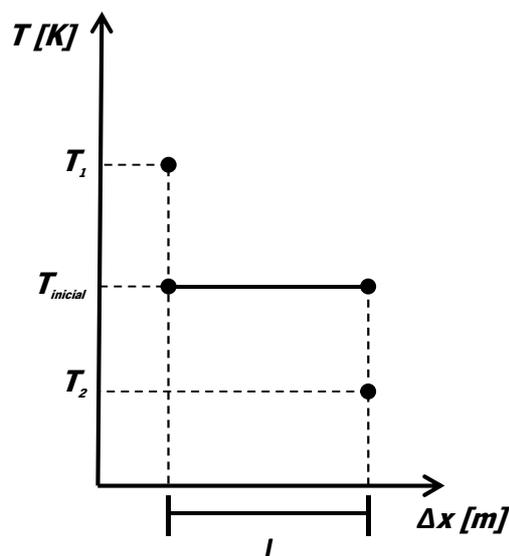


Figura 2.3 – Variação da temperatura na parede.

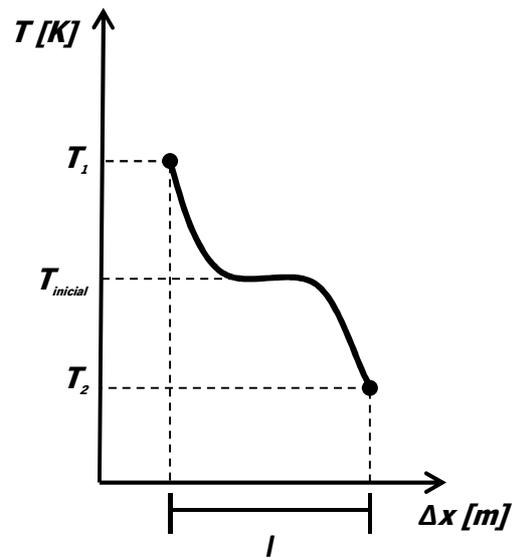


Figura 2.4 – Variação da temperatura na parede.

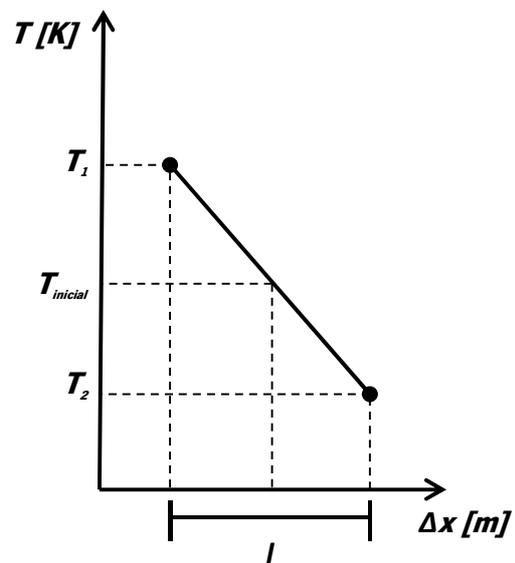


Figura 2.5 – Variação da temperatura na parede.

### 2.1.2. Convecção

Segundo *Holman* (1989), a troca de energia por movimento de fluidos denomina-se convecção. É usualmente utilizado quando se refere ao transporte de carga térmica entre um fluido e um sólido, devendo-se a efeitos combinados da condução e do movimento das cargas do fluido. Consideram-se dois tipos de transferência de calor por convecção tendo em conta a natureza do fluxo: a forçada que ocorre quando o fluxo é causado pelo exterior; ou livre quando não existe qualquer tipo de intervenção exterior. A transferência de calor por convecção traduz-se pela Lei de Arrefecimento de *Newton*.

$$q = h_{conv}(T_w - T_{\infty}) \quad (2.5)$$

Em que:

- $h_{conv}$  – coeficiente de convecção [W/(m<sup>2</sup>.K)]
- $T_w$  – Temperatura da superfície [K]
- $T_{\infty}$  - Temperatura do fluido [K]

A figura 2.6 representa de forma esquemática como se processa a transferência de calor por convecção entre um fluido e uma superfície, admitindo que a temperatura ambiente ( $T_{\infty}$ ) é superior à temperatura da superfície ( $T_s$ ) o fluxo de calor será do ambiente para a superfície. A figura 2.7 indica como varia a temperatura na superfície ao longo do tempo.

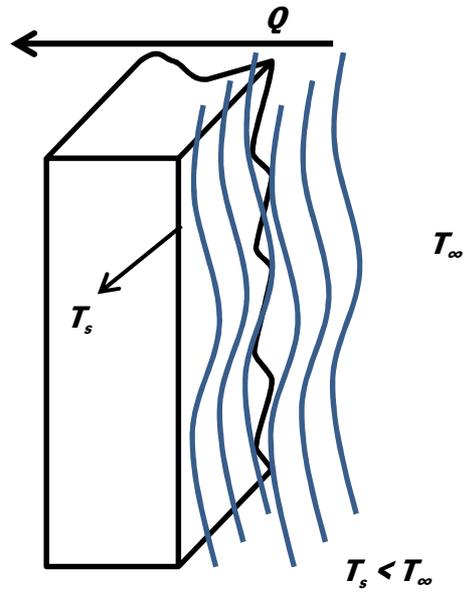


Figura 2.6 – Convecção numa parede.

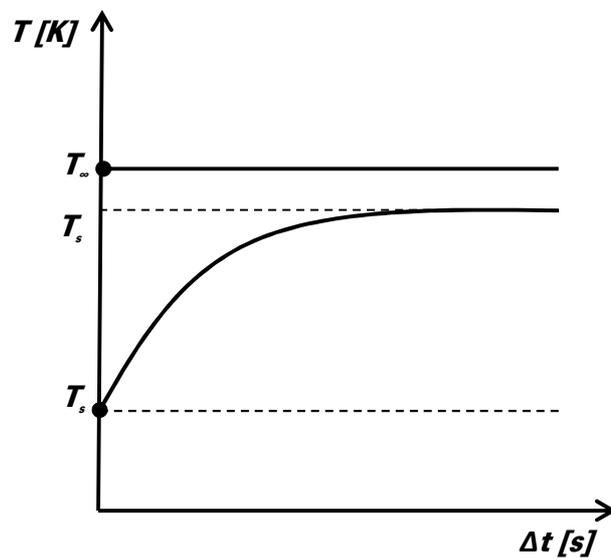


Figura 2.7 – Variação da temperatura na superfície da parede.

### 2.1.3. Radiação

*Holman* (1989) refere que o processo de transferência de calor por radiação se baseia na transferência de calor por ondas eletromagnéticas entre duas superfícies com diferentes temperaturas. A radiação emitida é traduzida através da Lei de *Stefan-Boltzman*.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.6)$$

Em que:

- $E_b$  – poder de emissividade da superfície
- $T_s^4$  – Temperatura absoluta da superfície
- $\sigma$  – Constante de *Stefan-Boltzmann* ( $\sigma=5.6693 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$ )

A energia resultante da radiação pode ser absorvida, refletida ou transmitida através de um material, assim, o fluxo de calor por radiação é definido por:

$$q = F \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.7)$$

Em que:

- F – fator angular de radiação
- $\varepsilon$  – Emissividade do material
- $\sigma$  – Constante de *Stefan-Boltzmann*
- T – Temperatura absoluta

A energia é transferida por radiação quando um corpo transmite radiação eletromagnética, ao contrário das situações anteriores não necessita de meio para transmitir radiação. A energia transferida por um corpo negro é dada pela relação de *Stephan-Boltzman*.

$$Q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

Na figura 2.8 estão indicados os diferentes fenómenos de radiação que se podem observar num corpo, ou seja, um corpo ao receber radiação poderá refletir essa radiação, transmiti-la ou absorve-la.

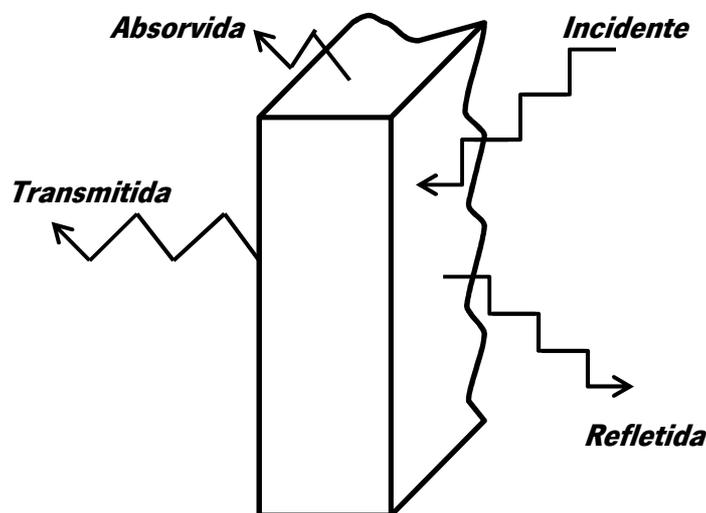


Figura 2.8 – Radiação.

#### 2.1.4. Características térmicas

Lobão (2004) refere que o comportamento térmico de um edifício depende de fatores relacionados com a sua envolvente: a localização, a orientação e os materiais utilizados na sua construção. Assim, para este estudo torna-se relevante abordar brevemente alguns conceitos que relacionem as características dos materiais com o comportamento térmico dos edifícios.

Os materiais utilizados na construção dos edifícios têm diferentes propriedades consoante o seu tipo: líquidos, sólidos, granulados ou pastas. No entanto, existem propriedades com implicações energéticas comuns a todos os materiais sólidos: propriedades da matéria, propriedades mecânicas, térmicas ou ondulatórias. (Mendonça 2005) O presente estudo irá focar-se nas propriedades térmicas e ondulatórias dos materiais, atendendo a uma propriedade comum a todos eles, independentemente do seu tipo, designada massa volúmica.

Segundo Mendonça (2005), a massa volúmica ( $\rho$ ) relaciona o volume do material com a sua massa, podendo ser calculada por três formas: pela forma relativa, isto é, através do quociente entre o peso e o volume do material, incluindo os espaços vazios; pela forma real, que

não inclui os espaços vazios; ou pela forma submergida que resulta da subtração do peso do volume do líquido à densidade saturada.

As propriedades térmicas dos materiais integram a condutibilidade térmica ( $k$ ) e o calor específico ( $c_p$ ) desse material. Por condutibilidade térmica entende-se a quantidade de calor que atravessa  $1\text{m}^2$  de um material com uma espessura de  $1\text{m}$  durante um segundo com diferença de  $1^\circ\text{C}$  entre as superfícies. O calor específico define-se pela energia produzida quando se aumenta a uma unidade de temperatura, uma unidade de massa. (Mendonça 2005)

O comportamento transiente de um material depende do seu calor específico da sua massa volumica e da sua condutibilidade térmica. Assim, esta característica do material é caracterizada e definida como difusibilidade térmica ( $\alpha$ ) traduzindo-se pela equação:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.9)$$

A propriedade ondulatória dos materiais também deve ser considerada e integra os fluxos de calor por absorção, transmissão, reflexão e a emissividade do material. A equação seguinte representa o fluxo de calor por unidade de superfície, em que  $\varepsilon$  representa a emissividade da superfície,  $\sigma$  representa a constante de *Stefan-Boltzman* e  $T$  a temperatura absoluta.

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.10)$$

O foco deste trabalho é a transferência de calor numa parede, assim sendo, torna-se relevante referir algumas noções de transferência de calor, bem como todos os fenómenos que ela engloba. Estes aspetos serão abordados no ponto seguinte.

### **2.1.5. Transferência de calor em edifícios**

Almeida (1987) considera ainda que, para quantificar a transferência de calor nos edifícios, nomeadamente entre o elemento construtivo, neste caso, a parede, e o ar interior do edifício, tal como a energia armazenada na parede, é imprescindível conhecer a distribuição interna das temperaturas, bem como, os fluxos de calor que a atravessam em qualquer instante. A transferência de calor nos edifícios implica o estudo de algumas variáveis que auxiliam no estudo

do comportamento térmico dos edifícios. O estudo da transferência de calor nos edifícios assenta na definição da condutibilidade térmica ( $k$ ) ou coeficiente global de transferência de calor, da resistência térmica do material de construção ( $R$ ) e da inércia térmica dos edifícios.

### **Condutibilidade térmica ( $k$ ):**

Como referido anteriormente, a condutibilidade térmica é uma propriedade dos materiais sólidos e determina a velocidade do fluxo de calor ( $q$ ) através desse mesmo material sólido, sendo traduzida pela Lei de *Fourier* para a condução, equação 2.2. A quantidade de calor ( $Q$ ) transferido também pode ser determinada a partir da equação 2.2.

A condutibilidade térmica é inversamente proporcional à resistência térmica, e define as perdas de calor por uma unidade de diferença da temperatura entre o interior e o exterior e por unidade de área, sendo determinada através da equação seguinte:

$$k \sim \frac{1}{R} \quad (2.11)$$

### **Resistência térmica:**

Mendonça (2005), considera que a resistência térmica de um material é a quantidade de calor transferido entre duas superfícies paralelas. Define as propriedades do isolamento térmico da parede e considera-se superficial, sendo o fluxo de calor definido pela relação entre o coeficiente de convecção ( $h$ ) e a diferença entre a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e a temperatura da superfície ( $T_s$ ), traduzida pela seguinte equação:

$$q = h (T_{ar} - T_s) \quad (2.12)$$

em que o coeficiente de convecção depende da posição da superfície em relação à direção do fluxo de calor, da geometria da superfície e da velocidade do ar.

A resistência térmica dos espaços do ar compreende todos os fenómenos de transferência de calor, englobando um fluxo de calor por condução, convecção e radiação e depende da espessura do material. O fluxo de calor por radiação depende da temperatura e da emissividade

das superfícies. Considera-se então, que a resistência térmica é dada pela relação de proporcionalidade entre a espessura do material ( $e$ ) e a sua condutibilidade:

$$R_t = \frac{e}{k} \quad (2.13)$$

### **Inércia térmica:**

A inércia térmica é um parâmetro importante quando se fala em transferência de calor nos edifícios. A inércia térmica define-se como um fenómeno pelo qual o edifício atenua as variações térmicas interiores e exteriores do edifício, tornando-se num parâmetro essencial para o seu conforto térmico (Martins, 2008).

Lobão (2004), considera que a capacidade térmica define-se como a quantidade de calor armazenado por  $m^2$  de área do elemento e por grau Célsio de amplitude térmica diária, deste modo, pode dizer-se que a inércia térmica é caracterizada pela quantificação de calor que pode ser armazenado nas massas inércias durante o período do ciclo diário. Já Mendonça (2005), considera que a inércia térmica tem origem na capacidade que os materiais possuem de armazenar calor, sendo esta propriedade denominada por capacidade térmica dos materiais e é obtida através da relação entre a massa superficial (esta massa representa o valor das massas constituídas desde a face interior da parede até à camada de isolante) do material ( $m$ ) e calor específico do material ( $c_p$ ):

$$C_t = m \cdot c_p \quad (2.14)$$

Às variações de calor armazenado dá-se o nome de fluxo de calor, sendo este proporcional à massa ( $m$ ), ao calor específico do material ( $c_p$ ) e à variação da temperatura ( $\Delta T$ ), sendo traduzido por:

$$\Delta q = m c_p \Delta T \quad (2.15)$$

Tal como foi referido anteriormente, a inércia térmica está relacionada com as flutuações térmicas interiores e exteriores dos edifícios, sendo as interiores determinadas pelo fluxo térmico do material construtivo, e as exteriores pelas condições da envolvente (estações do ano,

alterações climáticas, etc.), sendo por isso, denominados por fluxos de calor periódicos. As flutuações exteriores consideram-se suaves dependendo da estação do ano; bruscas, em função das condições climáticas (nebulosidade, ventos, etc.); e podem ser inesperadas ou previsíveis tendo em conta a variação da temperatura num ciclo de 24 horas (Mendonça, 2005). Dado que a temperatura exterior não é constante, verificam-se oscilações sinusoidais da temperatura do interior de edifício, sofrendo um amortecimento e um atraso térmicos em função da capacidade térmica da parede (Sastre, 2000). Sendo a inércia térmica a propriedade de um espaço, é representada pelas componentes com massa, em particular as que possuem capacidade de armazenamento térmico, tornando possível o armazenamento de calor e gerindo-o em função da temperatura do ar (Mendonça 2005). A massa térmica é o somatório dos produtos as massas superficiais úteis pela sua área superficial dos elementos da envolvente, e a classe térmica do edifício determina-se dividindo o somatório pela área de pavimento útil:

$$I_t = \frac{\sum(M_i \cdot A_s)}{A_p} \quad (2.16)$$

Tabela 2.1 – Classe de inércia térmica de um edifício segundo o RCCTE

Massa por metro quadrado habitável [kg/m <sup>2</sup> ]	Inércia
$I_t < 150$	Fraca
$150 \leq I_t \leq 400$	Média
$I_t > 400$	Forte

## 2.2. Regulamentos Energéticos

A simulação térmica de edifícios rege-se por diversos regulamentos, por forma a garantir um maior controlo na simulação e na regulamentação energética dos edifícios, para que estes obedeçam a normas de construção de forma a garantir o conforto térmico dos utilizadores.

### **2.2.1. Diretiva 2002/91/CE**

O Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, tendo em conta as medidas de combate às alterações climáticas elaborou uma diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios, Diretiva 2002/91/CE. Esta diretiva considera que os edifícios deverão cumprir os requisitos mínimos de desempenho energético e que se deve orientar na melhoria desse mesmo desempenho através da implementação de sistemas alternativos de fornecimento de energia. De forma a controlar de forma eficaz o desempenho e consumo energético dos edifícios, esta diretiva prevê um plano de certificação energética adequado a cada país da União Europeia, bem como a exigência de inspeções e auditoria periódicas aos sistemas de climatização (Diretiva 2002/91/CE, artigo 1.º).

Esta diretiva aplica-se a todos os Estados-Membros e impõe a emissão de certificados energéticos nos seguintes casos:

- Obtenção de licença de utilização em edifícios novos;
- Reabilitação importante de edifícios existentes (custo > 25% do custo do edifício);
- Locação ou venda de edifícios de habitação e de serviços existentes (certificado válido no máximo de 10 anos);
- Periodicamente, de 6 em 6 anos, para todos os edifícios de serviços com mais de 1000 m<sup>2</sup>.

A diretiva exige apenas o cumprimento da regulamentação energética no final da construção. No entanto alguns Estados Membros, Portugal incluído, o cumprimento da regulamentação é efetuado antes e no final da construção, o que permite uma mais fácil deteção e correção de erros antes da construção do edifício do que no final, o que permite uma poupança no que toca a evitar elevadas correções no final da construção.

Em Portugal, como resultado dos requisitos impostos pela mesma, foram elaborados 3 Decretos-Lei no âmbito do desempenho energético:

- O Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de abril;
- O Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril;
- O Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril.

### **2.2.2. Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de abril**

O cidadão deve ser informado sobre o desempenho energético de um determinado edifício através da certificação energética que determina a qualidade térmica desse edifício. Esta qualidade térmica é definida pelos potenciais consumos de energia, caso se trate de edifícios novos, caso contrário, é definida pelos consumos reais, passando pelos custos energéticos suportados durante o funcionamento normal do edifício (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, página 2411).

A certificação energética tem dois objetivos, dependendo do edifício: nos edifícios existentes, a certificação energética destina-se a informar os proprietários sobre as medidas a adotar para melhorar a eficiência energética, reduzindo assim os seus custos energéticos; nos edifícios novos ou sujeitos a profundas reabilitações, a certificação energética visa a correta implementação de regulamentos térmicos em vigor para aqueles edifícios, nomeadamente a implementação de sistemas de energias renováveis de forma a melhorar a eficiência energética do edifício, seguindo os termos da lei, nos artigos 5.º e 6.º da Diretiva n.º 2002/91/CE (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, página 2411).

A certificação energética pressupõe uma rigorosa inspeção ao edifício. O Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização nos Edifícios (RSECE) e o Regulamento das Características e do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) definem os requisitos necessários à inspeção no âmbito da certificação. Assim, a inspeção deve integrar: a eficiência energética do edifício, a qualidade do ar interior, ensaios de implementação de sistemas de climatização, manutenção desses sistemas e inspeções periódicas de caldeiras e de equipamentos de ar condicionado. Deste modo, assegura-se a boa qualidade do ar interior, minimizando-se os riscos para a saúde pública e maximizando o conforto e produtividade dos utilizadores (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, artigo 1.º).

O processo de certificação energética é faseado, isto é, por exigir um enorme número de meios humanos devidamente qualificados, têm prioridade os edifícios maiores, abrangendo assim um universo maior, dependendo da experiência da população e da adaptação das atividades licenciadoras às novas regras. Num esforço de desburocratização o Estado, responsável por assegurar o melhoramento do desempenho energético e da qualidade do ar interior dos edifícios, adotou um modelo de certificação simples tendo em conta as alterações

climáticas, racionalizando os consumos energéticos nos edifícios, dando-se o nome de Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior (SCE) (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, página 2411).

O SCE tem como objetivos: assegurar o cumprimento das normas regulamentadas no RCCTE e no RSECE; certificar o desempenho energético e da qualidade do ar interior dos edifícios; identificar medidas a adotar de forma a corrigir ou melhorar o desempenho de sistema energético. Os edifícios que são abrangidos por este sistema são: os novos edifícios, os edifícios já existentes mas sujeitos a profundas reabilitações e os edifícios para a habitação e serviços (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, artigos 2.º e 3.º).

Segundo o artigo 6.º do Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, a gestão do SCE é da responsabilidade da Agência para a Energia (ADENE) a quem compete a manutenção do funcionamento do sistema – controlo dos peritos qualificados e dos respetivos processos de certificação energética; compete também a aprovação do certificado de desempenho energético da boa qualidade do ar interior, a formação dos peritos e o livre acesso a toda a informação necessária ao processo de certificação. De acordo com os artigos 7.º e 8.º do Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, aos peritos qualificados e reconhecidos pela devida entidade compete: avaliar e analisar o desempenho energético e a qualidade do ar interior dos edifícios, bem como, a emissão do respetivo certificado; a realização de inspeções periódicas a caldeiras e sistemas de ar condicionado segundo o RSECE. Já aos proprietários dos edifícios, compete o cumprimento de todas as obrigações previstas no RCCTE e no RSECE; a solicitação aos peritos o acompanhamento dos devidos processos de certificação energética; a requisição de inspeções periódicas dos sistemas energéticos; o fornecimento de toda a informação necessária à certificação energética do edifício; e finalmente são responsáveis pela afixação da cópia do certificado do desempenho energético e da qualidade do ar interior (Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, artigo 9.º).

Como consta no artigo 12.º do Dec. Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, em termos de fiscalização, a ADENE, desde que haja indícios de que um edifício representa perigo para o cidadão ou, na sequência de reclamações de situações que futuramente possam constituir perigo para a saúde dos utentes, pode ordenar um processo de fiscalização ao referido edifício.

### **2.2.3. Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril**

O RSECE visa regulamentar a instalação de sistemas de climatização em edifícios e implementar algumas medidas de racionalização energética fixando limites máximos. Devido ao crescimento do setor dos edifícios, verificou-se um aumento na procura de sistemas de climatização, conduzindo a um abruuto crescimento dos consumos energéticos, e o fato de não existirem limites para a renovação do ar levou a alguns problemas na qualidade do ar interno (QAI) (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, página 2416).

Neste contexto, a União Europeia, no âmbito do Protocolo de Quioto decidiu implementar algumas medidas de combate às alterações climáticas. Assim, procedeu-se à revisão do RSECE, tendo por objetivo melhorar a eficiência energética, garantir as condições de conforto térmico e de higiene e implementar limites de consumos energéticos que mantenham a boa qualidade do ar interno (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, página 2416).

De acordo com o artigo 1.º do Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, o RSECE deve garantir as condições de conforto térmico e a boa qualidade do ar interno, impondo limites de renovação do ar de acordo com o desempenho energético; deve assegurar o cumprimento dos requisitos da racionalização energética, bem como dos limites dos consumos energéticos nas condições normais de funcionamento; deve promover a fiscalização da manutenção dos sistemas de climatização e dos consumos energéticos; e deve ser responsável pela formação profissional dos técnicos responsáveis.

O RSECE aplica-se a todos os edifícios ou frações autónomas não habitacionais com área útil superior a 1000 m<sup>2</sup> (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 27º); ao licenciamento dos novos edifícios não habitacionais com potência instalada  $P_m$  superior a 25 kW (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 27º); ao licenciamento de todos os novos edifícios habitacionais com sistemas de climatização com uma potência instalada  $P_r$  superior a 25 kW para climatização (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 27º); aos novos sistemas de climatização a serem instalados em edifícios com potência superior às anteriores; aos edifícios que sofreram profundas reabilitações ao nível da envolvente, das instalações de sistemas de climatização ou sistemas energéticos (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 2º).

O artigo 3.º do RSECE refere que um edifício é caracterizado energeticamente por um indicador de consumo, ou por um indicador de dióxido de carbono produzido pelo consumo de energia do edifício. O conforto térmico é calculado através das necessidades energéticas e tem em conta a velocidade do ar interior que não deve exceder os 0,2 m/s. Já a qualidade do ar interior é determinada dependendo do valor mínimo da renovação do ar por espaço, em função da sua utilização e do tipo de poluentes e dependendo do valor máximo das concentrações de substâncias poluentes do ar interior (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 4º).

O consumo energético de grandes edifícios é avaliado periodicamente no âmbito do Sistema Nacional de Certificação Energética (SCE) (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 7º). No caso de edifícios de serviços a construir o consumo nominal de energia é calculado por uma simulação dinâmica multizona do edifício e por padrões dependendo da tipologia do mesmo; assim à semelhança de outros edifícios são sujeitos também a inspeções periódicas, tal como os edifícios com profundas reabilitações também o são (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 8º). Os pequenos edifícios já existentes ficam isentos destes requisitos de limitação do consumo energético (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 10º); já nos pequenos edifícios a construir o consumo energético não pode exceder o consumo nominal específico e, em termos de climatização, não pode exceder os 80% das necessidades permitidas pelo RSECE quer para o  $N_v$ , quer para o  $N_s$ .

O artigo 11.º do Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, afirma que todos os novos edifícios de habitação abrangidos pelo RSECE não podem exceder as necessidades nominais específicas correspondentes a 80% das necessidades nominais de energias máximas permitidas pelo RSECE tanto para o aquecimento, como para o arrefecimento. O RSECE refere também que todos os edifícios têm obrigatoriamente de garantir a boa qualidade do ar interno, por isso devem ser realizadas auditorias periódicas à QAI no âmbito do SCE e devem ser medidas todas as concentrações de substâncias poluentes, sendo que a complexidade da inspeção é da responsabilidade do SCE (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 12º).

O RSECE visa também limitar os consumos energéticos para a potência instalada de novos sistemas de climatização, assim, as potências térmicas de aquecimento e de arrefecimento dos sistemas de climatização não podem exceder em mais de 40% o valor do projeto (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 13º). Nos edifícios novos de serviços, bem como nos edifícios com profundas reabilitações sempre que a soma das potências de climatização nas frações

autónomas seja  $4 P_m$ , é exigida a instalação de um sistema de climatização com produção térmica centralizada, sendo que em algumas situações seja obrigatório o uso de energias renováveis. A potência elétrica para o aquecimento não pode exceder os 5% da potência térmica de aquecimento até ao limite de 25 kW por fração autónoma do edifício; já nos sistemas de arrefecimento permite-se a instalação de um equipamento de reaquecimento cuja potência não excede os 10% da potência de arrefecimento a instalar (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 14º).

O sistema de climatização obriga a uma limitação da temperatura de conforto térmico; a uma regulação da potência de aquecimento e arrefecimento e a uma possibilidade de fecho ou redução automática da climatização, de modo a garantir a QAI (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 15º). Os sistemas energéticos dos edifícios devem manter as condições exigidas por lei de modo a garantir o funcionamento otimizado e alcançar o conforto ambiental de QAI e de eficiência energética. Deste modo, devem ter um plano de manutenção preventiva e a sua respetiva regulamentação, elaborados pelos devidos técnicos especializados para o efeito, para que o certificado energético seja devidamente emitido (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, artigo 19º). Deste modo, o RSECE prevê sanções e coimas pesadas para o incumprimento da lei.

Em resumo, o RSECE é uma importante diretiva do ponto de vista energético, já que veio impor rígidos requisitos nos projetos de novos edifícios, assegurando as necessidades de conforto térmico, racionalizando os gastos energéticos e sobretudo tentando minimizar os efeitos negativos na construção. Assim, tem-se verificado uma melhoria significativa na qualidade da construção e na aplicação de isolamento térmico nos edifícios.

#### **2.2.4. Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril**

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) é um regulamento que visa assegurar as condições necessárias ao conforto térmico nos novos edifícios e nos edifícios que sofreram profundas reabilitações, quer sejam de habitação ou de serviços, e procura também minimizar os efeitos negativos na construção (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 1.º). Com este regulamento adquiriu-se novas práticas na construção, sendo atualmente utilizados isolamentos térmicos nos edifícios, verificando-se uma evolução no

controlo das condições ambientais interiores (Diário da República – I Série – A, n.º 67 – 4 de abril de 2006, página 2468).

Atualmente, o RCCTE prevê também o melhoramento da qualidade dos edifícios e a redução do seu consumo energético e as respetivas emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente. Assim, exige-se um maior rigor na formação de técnicos responsáveis pela comprovação dos requisitos acima referidos (Diário da República – I Série – A, n.º 67 – 4 de abril de 2006, página 2469).

O RCCTE promove meios para proporcionar boas condições ambientais nos espaços interiores tanto no Inverno, como no Verão, e principalmente impõe limites nos consumos energéticos (Diário da República – I Série – A, n.º 67 – 4 de abril de 2006, página 2469). No entanto, estes valores são apenas referenciais, por isso, para os calcular deve ter-se em conta as condições ambientais segundo valores padrão admitidos como médios prováveis, tal como a temperatura ambiente, a temperatura com ventilação para a renovação do ar e a garantia da qualidade do ar interior que se tem vindo a degradar. Esta degradação deve-se ao uso de novos materiais e de novas técnicas de construção que libertam, de forma muito significativa, poluentes, impondo-se a necessidade de definir rígidos limites para a renovação do ar interior, de modo a salvaguardar a saúde dos seus utilizadores (Diário da República – I Série – A, n.º 67 – 4 de abril de 2006, página 2469).

A caracterização do comportamento térmico dos edifícios tem em conta certos índices e parâmetros. Os índices térmicos a determinar são os valores das necessidades anuais de energia útil para o aquecimento ( $N_{ic}$ ) – a energia útil necessária para manter a temperatura interior no valor de referência durante a estação de aquecimento (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo II, alínea mm), e para o arrefecimento ( $N_{vc}$ ) - a energia útil necessária para manter a temperatura interior no valor de referência durante a estação de arrefecimento (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo II, alínea nn), para a produção de águas quentes sanitárias ( $N_{ac}$ ) – energia útil para aquecer o consumo médio de referência a uma temperatura de 60°C e as necessidades globais de energia primária ( $N_{tc}$ ) – soma do  $N_{ic}$ , das  $N_{vc}$  e das  $N_{ac}$  tendo em conta os sistemas adotados (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo II, alínea pp). Já os parâmetros é: os coeficientes de transmissão térmica – quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área do elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele atravessa (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo II,

alínea pp); a classe de inércia térmica do edifício; o fator solar dos vãos envidraçados – quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado e a energia de radiação solar que nele incide (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo II, alínea ff) e a taxa de renovação do ar – taxa de caudal horário de entrada de ar novo num edifício ou numa fração autónoma (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo II, alínea bbb) (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 4.º).

Os valores necessários para realizar a determinação destes índices e destes parâmetros estão todos regulamentados pelos artigos presentes no RCCTE (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 4.º). Assim, como consta no capítulo III, artigo n.º 5 do Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, cada fração autónoma do edifício não pode exceder o valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento ( $N$ ) atendendo à qualidade térmica do meio envolvente e ao aproveitamento dos ganhos de energias renováveis (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 5.º); nem exceder o valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento ( $N_r$ ), tendo em conta a qualidade térmica da sua envolvente (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 6.º); ou exceder o valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para a produção de águas quentes sanitárias (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 7.º); ou exceder também o nível máximo admissível de energia primária fixado no artigo 15º do mesmo regulamento (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, artigo 8.º).

As condições interiores de referência, como consta no capítulo V, artigo n.º 14 de RCCTE, são as seguintes: temperatura do ar é de 20°C para a estação de aquecimento, 25°C para a temperatura do ar e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento. A taxa de renovação do ar interior, de modo a garantir uma boa qualidade do ar é de 0,6 renovações por hora; já o consumo de referência de água quente sanitária é 40l a 60°C por pessoa e por dia.

O RCCTE é aplicado nos casos em que o valor de área útil ( $A_{uv}$  é de 50 m<sup>2</sup> (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, capítulo V, artigo 17.º), e considera que todos os espaços úteis ficam sujeitos aos valores nominais de referência dispostos no artigo 4.º do mesmo regulamento, assim não se aplicam aos espaços não úteis, tais como: sótãos e caves não habitadas, circulações comuns às frações autónomas, varandas e marquises fechadas, estufas ou solários, garagens, armazéns e que não podem ser incluídos no cálculo do  $N_{ic}$ ,  $N_{vc}$  e  $N_{tc}$  (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, capítulo V, artigo 17º).

Em suma, este regulamento aplica-se a todos os edifícios de habitação e de serviços que respeitem o valor de referência para a área útil, assim quando este valor é menor que 50 m<sup>2</sup> o edifício fica dispensado da verificação deste regulamento se cumprirem as condições dispostas no Anexo IV, n.º 4 do RCCTE (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, anexo IX, n.º4).

### **2.2.5. Diretiva 2010/31/EU**

Devido ao aumento do consumo de energia por parte dos edifícios, que representa 40% do consumo de energia total da União Europeia (UE), a Diretiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios foi alterada. Assim, o Parlamento Europeu e o Conselho decidiram reformular a mesma, criando a Diretiva 2010/31/UE no mesmo âmbito do desempenho energético dos edifícios. Deste modo, é inevitável ajustar todos os limites energéticos, bem como todos os requisitos para um desempenho energético eficaz e com sustentabilidade, tanto económica como ambiental (Diretiva 2010/31/UE, n.º 3). Torna-se, por isso, necessário adotar medidas de redução de consumos energéticos e de promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis; deste modo, tenta-se reduzir a dependência energética da UE, bem como a minimização da emissão de gases com efeitos de estufa.

A Diretiva 2010/31/UE vem alterar: o método de cálculo do desempenho energético dos edifícios; a sua aplicação em edifícios novos, em edifícios existentes e naqueles que sofreram profundas reabilitações; as condições tanto de certificação, como nas inspeções periódicas dos sistemas de climatização (Diretiva 2010/31/UE, artigo 1.º). A metodologia de cálculo do desempenho energético é da responsabilidade de cada Estado-Membro de acordo com o artigo 3.º da mesma diretiva; já os níveis ótimos de rentabilidade são calculados de acordo com o artigo 5.º da mesma.

Esta diretiva europeia afirma que todos os Estados-Membros devem adotar medidas para que os edifícios cumpram todos os requisitos impostos. Assim, no caso dos edifícios novos impõe-se que estes possuam sistemas alternativos de elevada eficiência energética (Diretiva 2010/31/UE, artigo 6.º); no caso dos edifícios já existentes deve proceder-se à adoção de medidas para que estes cumpram todos os requisitos mínimos exigidos por esta diretiva (Diretiva

2010/31/UE, artigo 7.º); É também proposto que em 31 de dezembro de 2020, todos os edifícios novos tenham necessidades nulas de energia (Diretiva 2010/31/UE, artigo 9.º).

Relativamente ao certificado de desempenho energético, este deve incluir: o desempenho energético do edifício, bem como os valores de referência, consumo energético anual e a percentagem de energia proveniente de fontes renováveis; deve incluir também recomendações para a melhoria económica, em termos de custos do desempenho energético de um edifício, tal como consta no artigo 11.º da Diretiva 2010/31/UE. O artigo 12.º da mesma diretiva refere que o certificado de desempenho energético deve ser emitido os edifícios construídos, vendidos ou arrendados e para os edifícios com uma área útil de 500 m<sup>2</sup> e frequentemente visitados pelo público.

Segundo o artigo 14.º da mesma diretiva, os Estados-Membros devem adotar medidas para a inspeção dos sistemas de climatização: para os sistemas de aquecimento a inspeção deve incluir avaliação do rendimento da caldeira, bem como a sua adequação para as necessidades do edifício; para os sistemas de ar condicionado, o artigo 15.º diz que todos os equipamentos com potência útil superior a 12 kW devem ser periodicamente inspecionados. Caso os Estados-Membros não cumpram os requisitos presentes nesta diretiva europeia, estão previstas sanções aplicadas pela Comissão Europeia.

Em Portugal, está prevista a reformulação dos Dec. Lei n.º 78/2006, n.º 79/2006 e do n.º 80/2006 de 4 de abril no âmbito do desempenho energético dos edifícios. A sua publicação está prevista para dezembro de 2012.

### **2.3. Simulação Térmica**

A simulação térmica de um edifício permite analisar o desempenho energético do mesmo. O anexo VIII do RSECE define quais os aspetos que a simulação deve incluir, nomeadamente, as características da envolvente, condições climáticas, condições de conforto térmico, sistemas de climatização, ventilação, iluminação, águas quentes sanitárias, sistemas solares passivos e proteções solares.

No âmbito da simulação térmica de edifícios existem diversos *softwares* que proporcionam a informação sobre consumos energéticos, necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício que se pretende simular. Esta informação é necessária e importante quando se pretende dimensionar os sistemas de climatização, qual a eficiência do edifício e quais as alterações que se devem efetuar para tornar o edifício mais eficiente.

Devido à complexidade e rigor do tema, é necessário existir um *software* que valide todos os requisitos necessários para a análise energética de um edifício. Assim, a *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Condition Engineers* (ASHRAE) desenvolveu um programa de *software* que verifica e valida a construção desses *softwares*, denominado de *Ashrae Standard*, e que funciona como um método padrão de teste da evolução e construção de *software* para a análise energética dos edifícios. Este método SMOT (*Standard Method of Test*) é um método universal que testa *softwares* no âmbito da análise energética de determinados edifícios. É utilizado para detetar diferenças no estudo da simulação térmica, tais como: diferenças nos algoritmos, limitações da simulação ou erros de codificação (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Condition Engineers*, página 1).

De acordo com a *ASHRAE*, a simulação de desempenho energético de um edifício, bem como do seu equipamento mecânico é um assunto muito complexo, dado que existem muitos parâmetros e modelos térmicos e não é prático testar todas as suas combinações. Assim, os testes são descritos de acordo com os planos de construção do *software* e com as especificações energéticas e mecânicas do edifício em causa.

Através deste método visa-se testar as capacidades dos programas na modelação tendo em conta todos os efeitos combinados tais como: ganhos solares das janelas, massa térmica, calor interno, infiltração e controlo das temperaturas, facilitando o diagnóstico dos mecanismos de transferência de calor específica. Este método tenta também, testar a capacidade dos *softwares* em analisar o desempenho do espaço de refrigeração, isto é, analisar os ganhos internos, a variação da temperatura, tendo em conta a desumidificação ou com o ar-condicionado (*ASHRAE*, página 1).

Estes testes são muito úteis na análise térmica de um edifício. No entanto, não existe um programa de *software* de simulação de energia que realize uma validação do desempenho energético e do equipamento mecânico no seu todo. Tenta-se é gerar uma diversidade de

resultados meramente informativos que servem de padrão para auxiliar a construção de *softwares* de simulação térmica (*ASHRAE*, página 2).

Este método de ensaio permite analisar e diagnosticar a construção de *software* de simulação térmica, comparando diferentes programas do mesmo âmbito, tendo em conta diferentes graus de complexidade da modelação. Assim, compara previsões de energia de edifícios diferentes; verifica um programa em relação à sua versão anterior, depois de efetuada a alteração dos códigos necessários; verifica um programa contra si mesmo; e diagnostica as fontes de algoritmos (*ASHRAE*, página 4).

Assim, a mesma sociedade anteriormente referida, procedeu ao estudo da análise energética para uma série de casos reais. Um desses estudos é referente à validação do *IDA Indoor Climate and Energy 4.0 build 4* (IDA ICE) através do método *Ansi Ashrae Standard 140-2004* (*Equa Simulation AB*, página 3).

O objetivo deste estudo é encontrar uma solução ideal para o aquecimento e arrefecimento de uma determinada zona (*Equa Simulation AB*, página 3). Assim, para se obter resultados precisos, o parâmetro de tolerância foi minimizado 100 vezes relativamente ao valor padrão, a zona climática foi igual para todos os casos estudados e os máximos e mínimos são os que estão tabelados (*Equa Simulation AB*, página 4).

Em termos gerais, concluiu-se que o IDA ICE 4 desempenha bem a sua função de acordo com os requisitos do caso, e apresenta valores razoáveis para os testes de capacidade térmica, estando por isso, num nível analítico/ semi-analítico, tal como os outros *softwares* de simulação térmica (*Equa Simulation AB*, página 43).

Antes de abordar os *softwares* de simulação térmica, vão ser apresentados os métodos de cálculo de cargas térmicas, os quais servem de base para os *softwares* de simulação térmica.

### **2.3.1. Métodos de cálculo de cargas térmicas**

Os processos de transferência de calor e os ganhos térmicos internos nas zonas a climatizar são os processos necessários para que se verifique cargas térmicas quer de aquecimento, quer de arrefecimento.

São múltiplos os fatores que influenciam o processo de cálculo das cargas térmicas, quer sejam externos (paredes, coberturas, pavimentos), internos (iluminação, ocupação), infiltrações (fuga de ar, humidade), ou pelo sistema de climatização (Alves, 2011).

Os modelos de cálculo das cargas térmicas são:

- Método da diferença de temperatura diferencial (TETD/TA);
- Método das funções de transferência (TFM);
- Método da diferença de temperatura (CLTD/SCL/CLF);
- Método do balanço energético (HBM);
- Método das séries temporais radiativas (RTS).

#### **2.3.1.1. Método da diferença de temperatura diferencial (TETD/TA)**

Alves (2011) afirma que o método *Total Equivalent Temperature Differential/Time Averaging* (TETD/TA) tem por base considerar a transferência de calor por radiação solar incidente, ou seja, leva em consideração a absorção da energia por radiação pela superfície em causa e as trocas de energia resultantes da diferença das temperaturas entre a temperatura aparente e a temperatura do ar exterior.

Este método consiste em calcular os ganhos térmicos baseando-se na lei de *Fourier* para a condução, e calcula a média dos ganhos térmicos por hora, sucessivamente, de acordo com a massa térmica da superfície.

#### **2.3.1.2. Método das funções de transferência (TFM)**

ASHRAE (2009) (citado por Alves, 2011) diz que o TFM tem como objetivo representar o intervalo de tempo entre um ganho interno e a carga térmica a ser removida. Assim, recorre-se à programação numérica, utilizando no entanto os pressupostos do método anterior.

Enquanto o TETD/TA considera só os ganhos térmicos através da radiação incidente, o TFM utiliza esse mesmo pressuposto mas inclui as funções de transferência associadas a cada elemento construtivo, assumindo que os ganhos térmicos resultantes da iluminação são iguais

ao seu consumo elétrico, (ASHRAE, 2009). Deste modo, o TFM aplica diferentes coeficientes dependendo do tipo de ganho interno (iluminação e ocupação), da radiação solar incidente, da transferência de calor por condução através da superfície opaca, das infiltrações, entre outros. Assim obtêm-se resultados mais realistas, já que envolve diferentes fatores no cálculo das cargas térmicas (Mitalas, 1978).

### **2.3.1.3. Método da diferença de temperatura (CLTD/SCL/CLF)**

O atraso do tempo dos ganhos internos por condução através das superfícies opacas, bem como o atraso na conversão do ganho térmico por radiação em cargas térmicas são fatores integrantes do método da diferença de temperatura (CLTD/SCL/CLF – Cooling Load Temperature Difference/Solar Cooling Load Factor/Cooling Load Factor). Deste modo, este método baseia-se na proporcionalidade direta dos coeficientes para o cálculo das cargas térmicas de um espaço:

- CLTD – estes fatores ajustam os ganhos internos por condução através de uma superfície opaca, e são referentes à diferença das temperaturas do efeito combinado entre a diferença da temperatura do ar exterior e interior ao longo do dia, radiação solar incidente, e a inércia térmica da superfície;
- CLF – estes ajustam os ganhos internos através das cargas térmicas do espaço;
- SCL – referem os ganhos internos por transmissão solar através de uma envolvente envidraçada (Alves, 2011).

### **2.3.1.4. Método do balanço energético (HBM)**

O método do balanço energético (HBM – Heat Balance Method) é um método simples para o cálculo das cargas térmicas porque os seus parâmetros estão bem definidos e são calculados de forma explícita. Os pressupostos deste modelo são que para todas as superfícies (paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos) assume-se:

- Que a temperatura interna da superfície é uniforme;
- O parâmetro da superfície radiativa difusa;

- Que a condução de calor é unidimensional (ASHRAE, 2005).

ASHRAE (2005) considera que este modelo é constituído por quatro processos:

- Balanço energético às superfícies exteriores que engloba o fluxo de radiação absorvida, o fluxo de convecção do ar exterior e o fluxo convectivo da parede;
- Condução de energia pelas paredes, considerando a temperatura da superfície do interior da parede, os fluxos de calor ao longo da parede em função do tempo;
- Balanço energético às superfícies interiores, tendo em conta todos os parâmetros do fluxo de calor por condução, convecção, e radiação;
- Balanço energético do ar considerando a transferência de calor por convecção através das superfícies, porções das cargas internas e cargas causadas pelas infiltrações do ar e a transferência de calor referente ao sistema de climatização.

Desta forma o HBM pressupõe a existência de uma zona técnica que envolva 4 paredes, uma cobertura e um pavimento, e é realizado através de uma análise de 24 horas às temperaturas interiores e exteriores da mesma zona técnica.

### ***2.3.1.5. Método das séries temporais radiativas (RTS)***

Spitler et al (1997) consideram que o método das series temporais radiativas é um método recente que deriva do método do balanço energético que foi desenvolvido pela ASHRAE e surge como um método que simplifica todos os outros métodos para o cálculo das cargas térmicas.

O método dos sistemas temporais radiativos (RTS – Radiant Time Series) funciona como um substituto do TETD/TA, do CLTD/SCL/CLF e do TFM e contabiliza todos os ganhos de calor através de processos radiativos, convectivos e condutivos. Deve integrar dois tipos de atrasos: do ganho de calor por condução através da superfície exterior opaca (paredes, coberturas, pavimentos) e a conversão radiativa do ganho de calor pelas diferenças de temperatura entre o interior e o exterior.

No caso do cálculo dos ganhos térmicos por condução, considera-se para qualquer instante ( $\theta$ ), o ganho térmico por condução da superfície ( $q_{\theta}$ ) resulta do somatório dos fatores de

resposta diretamente proporcionais à diferença de temperatura da mesma superfície e é calculado para cada tipo de parede e cobertura, tendo em conta 24 fatores de resposta:

$$q_{\theta} = A \sum_{j=0}^{23} y_{pj} (T_{e,\theta-j\delta} - T_{rc}) \quad (2.17)$$

Em que:

$q_{\theta}$  – Ganhos de calor por condução da superfície;

$A$  – Área da superfície;

$y_{pj}$  – Fator de resposta;

$T_{e,\theta-j\delta}$  – Temperatura solar a  $j$  horas atrás;

$T_{rc}$  – Temperatura do ar.

O cálculo das trocas de calor por convecção entre as superfícies e o ar e as trocas de calor por radiação aplicam-se ao cálculo das trocas de calor no interior das divisões.

O cálculo das cargas internas é realizado separando as trocas de calor por convecção das trocas por radiação, uma vez que as de convecção são imediatas, e as de radiação introduzem um atraso no tempo.

Através do RTS, a porção radiativa dos ganhos térmicos é convertida em carga térmica e é analisada através de fatores de resposta que calculam a carga térmica a ser introduzida no espaço baseando-se no ganho térmico, considerando-se assim:

$$Q_{\theta} = r_0 q_{r\theta} + r_1 q_{r\theta-\delta} + r_2 q_{r\theta-2\delta} + \dots + r_{23} q_{r\theta-23\delta} \quad (2.18)$$

Em que:

$Q_{\theta}$  – Carga térmica introduzida no espaço;

$q_{r\theta}$  – Instante analisado;

$q_{r\theta-n\delta}$  – Ganho térmico por radiação no instante anterior;

$r_n$  – Fatores de resposta.

Em suma, o RTS utiliza dois tipos de fatores temporais radiativos, um para ganhos internos por radiação solar e outro para os ganhos internos.

Em relação ao método que se pretende implementar, a diferença em relação aos anteriores é a adição de um coeficiente de radiação para a transferência de calor entre o céu e o solo, e também a influência da radiação solar no tempo em que se efetua o cálculo, e não com atraso.

### **2.3.2. Softwares de Simulação Térmica**

Como consequência do avanço tecnológico surgiram diversos *softwares* que permitem um estudo rigoroso da eficiência energética dos edifícios, entre os quais se encontram o *RCCTE-STE*, o *ENERGYPLUS*, o *TRNSYS*, o *ESP-r*, o *DOE2.1e*, o *TRACE700*, e o *CARRIER\_HAP*.

#### **2.3.2.1. RCCTE-STE**

O *software* RCCTE-STE foi desenvolvido pelo INETI (Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação) e permite a verificação do RCCTE (Dec. Lei n.º 80/2006 de 4 de abril) e do RSECE (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril).

O RCCTE-STE faz uma simulação horária anual baseado num modelo monozona, no entanto, também pode ser utilizado num modelo multizona, desde que seja efetuado para cada zona individualmente, e posteriormente os resultados obtidos sejam devidamente adicionados de forma a obter o desempenho energético global do edifício. Esta simulação horária anual pode ser representada como um circuito reo-elétrico (Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de abril) tal como demonstra a figura 2.9.

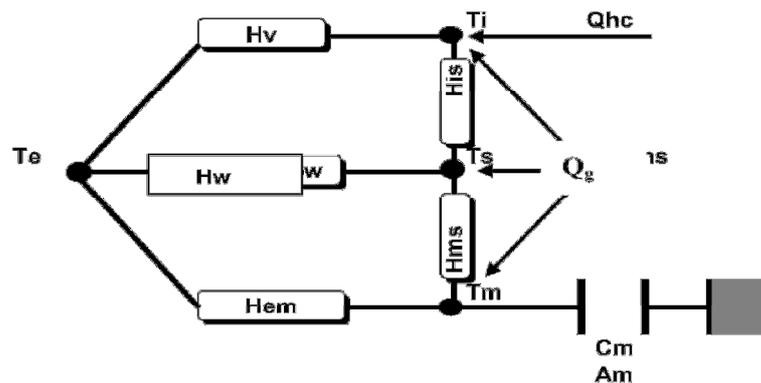


Figura 2.9 – Circuito reo-elétrico (Dec.Lei n.º 79/2006 de 4 de abril).

O *software* calcula as necessidades de aquecimento e arrefecimento de forma a manter o espaço às temperaturas definidas no RSECE para as estações de aquecimento e arrefecimento. Na figura 2.8 os nós do circuito representam as temperaturas:

- $T_i$  – Temperatura interior;
- $T_m$  – Temperatura média da massa térmica do espaço;
- $T_s$  – Temperatura média das superfícies interiores da envolvente;
- $T_e$  – Temperatura exterior.

Para aplicação do RCCTE e do RSECE, o RCCTE-STE possui uma base climática para cada conselho de Portugal de acordo com a divisão climática do país.

Na figura 2.9 as resistências representam as transferências de energia que se verificam no espaço que se pretende simular:

- $H_v$  – Transferência de calor através das trocas de ar;
- $H_w$  – Transferência de calor por condução pelos vãos envidraçados;
- $H_{em}$  – Transferência de calor por condução através da envolvente opaca (efeito radiativo desprezado);
- $H_{ms}$  – Transferência de calor entre a massa de armazenamento térmica e as superfícies;
- $H_{is}$  – Transferência de calor entre as superfícies da envolvente interior.

Em cada hora é efetuado um balanço energético do espaço, onde se contabiliza um balanço entre as perdas e os ganhos térmicos pela envolvente e pelos vãos envidraçados, e pelos ganhos internos. A equação seguinte demonstra como esse cálculo é efetuado:

$$Q_{hc} = Q_v + Q_w + Q_{em} + Q_g \quad (2.19)$$

As componentes do balanço térmico são:

- $Q_{hc}$  – Energia necessária para a climatização do espaço;
- $Q_v$  – Ganho ou perda de calor correspondente à renovação de ar;
- $Q_w$  – Ganho ou perda de calor por condução através dos vãos envidraçados;
- $Q_{em}$  – Ganho ou perda de calor através da envolvente opaca;
- $Q_g$  – Ganhos totais, incluindo ganhos pela ocupação, equipamentos, iluminação, ganhos solares pelos vãos envidraçados e pela envolvente opaca.

### **2.3.2.2. ENERGYPLUS**

O United States Department of Energy (2012) considera que o *ENERGYPLUS* tem por base os *softwares* BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e o DOE-2, sendo desenvolvidos no âmbito da simulação térmica de edifícios. Este *software* vem colmatar algumas deficiências do BLAST e do DOE-2, embora possuam ferramentas válidas, com o tempo tornam-se obsoletos, já que não são capazes de processar corretamente o *feedback* do sistema AVAC para determinadas condições do espaço.

O *ENERGYPLUS* auxilia os engenheiros nas decisões de escolha da potência do equipamento de climatização, na análise dos custos energéticos operacionais e fornece ferramentas que permitem otimizar o desempenho energético do edifício. Assim, considera-se o *ENERGYPLUS* como um *software* de análise energética e simulação de cargas térmicas.

Os parâmetros de aquecimento e as respetivas cargas térmicas, de modo a assegurar-se o conforto térmico, as condições do sistema de climatização, o consumo de energia do edifício, bem como outros detalhes da simulação são determinados através da descrição do utilizador do edifício, da construção do mesmo e dos sistemas mecânicos que influenciam o estudo energético do edifício.

As características do *ENERGYPLUS* para a simulação energética são bastante semelhantes às do BLAST e do DOE-2, destacando-se as seguintes:

- Inclui soluções simultâneas integradas, isto é, a resposta primária do edifício e dos sistemas secundários encontram-se fortemente relacionadas;
- As etapas de interação entre as zonas térmicas e o meio ambiente são definidas pelos utilizadores, considerando as etapas de interação entre as zonas térmicas e os sistemas de climatização como parâmetro variável;
- O balanço térmico é baseado numa solução térmica na definição das cargas térmicas e em simultâneo permite o cálculo dos efeitos de radiação e convecção para cada etapa do processo;
- Utiliza o método das funções de transferência de condução para calcular a condução de calor transiente através dos elementos de construção (paredes, pavimentos, coberturas, entre outros);
- Uma melhoria dos modelos de transferência de calor através de modelos tridimensionais finitos;
- A produção combinada com modelos de transferência de massa que responde por unidade de absorção;
- Os modelos de conforto térmico baseiam-se na atividade energética;
- A melhoria no cálculo da energia solar difusa em superfícies inclinadas através do modelo do céu anisotrópico;
- Fornece soluções avançadas no cálculo da energia dos elementos da construção, ou seja, calcula o balanço térmico, a energia solar absorvida pelos vãos envidraçados, entre outros;
- O controlo da iluminação natural, integrando o cálculo da iluminação interior, controlo do brilho, e cálculo da iluminação artificial;
- A modelação dos sistemas típicos e modifica-os através de um sistema configurável do sistema AVAC;
- Calcula o parâmetro referente à poluição atmosférica que potencialmente influencie o desempenho energético do sistema.

A função do *ENERGYPLUS* é calcular as cargas térmicas e o consumo de energia, durante um determinado período de tempo, através da definição da construção do edifício, opções do

projeto ou dos sistemas AVAC, incluindo parâmetros que relacionem diretamente o ambiente envolvente do edifício e os aspetos térmicos do mesmo.

Tal como foi referido anteriormente, o *ENERGYPLUS*, veio tentar resolver algumas limitações do BLAST e do DOE-2. Assim, o principal objetivo era eliminar as interconexões entre as secções dos vários programas e satisfazer a necessidade de interpretar cada etapa do código do programa. A análise energética é realizada através da definição de módulos bem organizados, sendo um facilitador do desenvolvimento de novos módulos de simulação de outros componentes, sem que estes interfiram com outros módulos em desenvolvimento.

O *ENERGYPLUS*, para além das ligações naturais no sistema AVAC, considera outras ligações com outros fluidos, tal como o balanço de calor. Outra vantagem é que os resultados da análise energética bem como os códigos do programa são de domínio público. Assim, este *software* permite uma minimização de custos de investimento de recursos e uma maximização do impacto de pesquisa no campo da construção da análise energética, bem como, o cálculo das cargas térmicas. Finalmente, auxilia na compreensão da interligação das envolventes do edifício e na consideração de que o edifício não responde apenas aos fatores ambientais, mas também responde aos sistemas de climatização. Considera-se por isso que o *ENERGYPLUS* é programado através de linhas de código que permite uma variedade de ficheiros de entrada e a consideração de parâmetros que assegurem a neutralidade do algoritmo.

Os relatórios resultantes de análise energética realizada por este *software* contêm informações sobre a visão geral do balanço de calor, incluindo os cálculos do balanço de calor que formam a base do modelo de construção das linhas de código, incluindo também informações sobre o sistema AVAC do edifício, sendo por isso uma ferramenta útil no que diz respeito à tomada de decisões no âmbito energético.

### **2.3.2.3. TRNSYS**

O *Solar Energy Laboratory* e a *University of Wisconsin-Madison* (2009) assumem o *TRNSYS* como um *software* de simulação térmica transiente que permite facilitar:

- A adição de modelos matemáticos;

- A capacidade na construção de modelos multizona;
- Interação com outros *softwares* de simulação térmica.

Este *software* é utilizado por engenheiros e investigadores para validar novos conceitos energéticos desde simples sistemas de água quente até ao design e simulação de edifícios e os seus equipamentos, incluindo estratégias de controlo, ocupação, e sistemas de energias alternativas. É considerado um *software* aberto e de estrutura modular, uma vez que simplifica os modelos de acordo com as necessidades específicas. As aplicações do *TRNSYS* incluem:

- Sistemas solares;
- Edifícios de baixo consumo energético e sistemas AVAC;
- Sistemas de energia renovável;
- Cogeração e células de combustível;
- Sistemas que necessitem de simulação dinâmica.

O *TRNSYS* engloba um conjunto de subprogramas: o *TRNSYS Simulation Studio*, o *TRNSYS Simulation Engine*, o *Building Visual Interface*, o *TRNEdit and TRNSED Applications* e o *TRNSYS Add-ons*.

O *TRNSYS Simulation Studio* permite criar projetos manipulando os componentes necessários à simulação, e interligando-os entre si. Também inclui um comando de controlo que define quais as variáveis se deve integrar, imprimir, e de erro para que seja mais fácil o estudo da simulação.

O *TRNSYS Simulation Engine* é realizado através do *Fortran* e compilado numa biblioteca dinâmica do *Windows*. As informações da simulação contidas no ficheiro de entrada do *TRNSYS* são lidas do núcleo do mesmo. Este motor de simulação é executado através do programa *TRNExe.exe* que integra gráficos que permitem a visualização de diversos *outputs* durante a simulação. Estes gráficos permitem ampliar ou reduzir o número de variáveis em cada etapa.

O *Building Visual Interface* é uma ferramenta que introduz as variáveis para edifícios multizona, permitindo especificar todos os detalhes da construção do edifício, bem como todos os parâmetros necessários para realizar uma simulação do comportamento térmico do edifício

em causa, as propriedades das janelas e os horários de aquecimento e arrefecimento. O *TRNBuild* cria um ficheiro descritivo do edifício que integra toda a informação necessária para a simulação térmica do edifício.

O *TRNEdit* é um editor especializado que pode ser utilizado para criar ou modificar um ficheiro de entrada *TRNSYS*, no entanto não é recomendável utilizar este editor para modificar o ficheiro de entrada. Pode ser também utilizado para criar aplicações redistributivas, conhecidas como aplicações *TRNED*.

O *TRNSYS Add-ons* oferece uma grande variedade de componentes padrão, existindo para o efeito varias bibliotecas que permitem expandir as suas capacidades.

#### **2.3.2.4. ESP-r**

O departamento de engenharia mecânica da Universidade de *Starthclyde* (2012) assume que *software ESP-r* permite uma análise detalhada de todos os fatores que influenciam o desempenho energético e ambiental do edifício. O *ESP-r* é um *software* que apresenta valores reais, uma vez que a análise dos sistemas físicos dos edificios é apresentada com valores reais, e suporta todos os detalhes do projeto em estudo, permitindo assim um avaliação rigorosa do desempenho energético do edifício.

O objetivo deste *software* é simular o desempenho energético e ambiental do edifício, de uma forma bastante rigorosa e detalhada, de modo a que esta análise seja o mais real possível, permitindo ao utilizador estudar os parâmetros do edifício tendo em conta a forma do edifício, a sua construção, o fluxo de ar e de energia.

O método de análise tem por base uma abordagem finita para a conservação do volume, em que se transforma um problema em várias iterações de conservação sendo consequentemente integradas num sistema de etapas tendo em conta os parâmetros considerados para o estudo. Para isto, o *ESP-r* possui diversas funcionalidades, tais como: uma base de dados que auxilia o estudo do desempenho energético; um simulador que permite considerar múltiplos fatores; e por fim, um gerador de relatórios que apresentam a informação detalhada do estudo em causa.

O *ESP-r* é utilizado para a compreensão do desempenho térmico e dos processos físicos, bem como para o controlo ambiental do edifício. Os *inputs* deste *software* têm por base a geometria do edifício que é definida através de ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*) suportando uma apresentação do edifício relativamente à complexidade arbitrária. Os modelos de análise são construídos com base nas superfícies e espaços da zona e têm em conta o sombreamento temporal, padrões de insolação, radiação, módulos fotovoltaicos e que dependem da temperatura. Já a rede de componentes pode definir-se como sistemas AVAC, distribuição do fluxo de ar, ou como sistemas da distribuição elétrica.

Assim, os módulos do *ESP-r* resultam em informação que é utilizada para fazer várias análises energéticas ou ambientais da simulação, já que engloba inúmeros fatores. O *ESP-r* é uma poderosa ferramenta no estudo energético, uma vez que, para além da integração de vários fatores padrão, também inclui parâmetros como: luz natural, ventilação natural, produção de calor e geração de energia elétrica.

Logicamente, este *software* não é perfeito, por isso tem algumas lacunas a colmatar. Deste modo, é considerado mais um *software* de pesquisa, do que propriamente de simulação térmica, já que não tem uma base de dados muito extensa, a linguagem é um pouco pesada e de difícil compreensão e por isso considera-se necessário que um especialista forme os utilizadores, para que estes possam manusear a *software* de forma rápida e eficaz.

#### **2.3.2.5. DOE2.1e**

Wray (2003) refere que o *DOE2.1e* é um modelo de simulação térmico desenvolvido pelo laboratório *Lawrence Berkley*. Este *software* permite comparar o impacto das decisões do projeto relativamente ao aquecimento, arrefecimento e cargas térmicas, avaliando a diferença de custos operacionais da simulação. Assim, o *DOE2.1e* faz uma simulação horária, e calcula as cargas térmicas e o consumo energético total do edifício, tendo em conta: a construção, a operação e o sistema de climatização do edifício.

O *DOE2.1e* faz a simulação através de 5 subprogramas:

- Processador BDL (*Building Description Language*) que traduz toda a informação inserida, uma vez que este *software* tem mais de 70000 linhas de código *FORTRAN* é necessário utilizar uma linguagem específica que permite ao utilizador descrever o edifício e os seus elementos de construção.
- Subprograma Cargas (*Loads*) que calcula todos os parâmetros inseridos, hora a hora, relativamente ao aquecimento ou arrefecimento do espaço. É considerado um sistema dinâmico, já que tem em conta todos os ganhos e perdas de calor provenientes da envolvente do edifício. Utiliza também dados meteorológicos e integra os efeitos de armazenamento térmico dos elementos de construção. Permite também simular os controlos da iluminação natural e energia elétrica;
- Subprograma Sistemas (*Systems*) calcula as taxas de fluxo de ar, potência do ventilador, e cargas das bombas de calor. Isto é, simula o funcionamento do sistema AVAC;
- Subprograma “Plantas” (*Plants*) calcula a energia consumida pelo equipamento primário;
- Subprograma Economia (*Econ*) calcula todos os custos energéticos operacionais baseando-se nos valores obtidos nos subprogramas Cargas e Sistemas. Este subprograma calcula também o valor atual do custo do ciclo de vida do edifício, integrando o combustível, a eletricidade, o equipamento, o funcionamento e a manutenção.

A programação deste *software* é muito complexa, deste modo, torna-se difícil fazer-lhe algumas alterações ou melhorias nas linhas de código. Assim, o *DOE2.1e* é considerado limitado, porque a sua capacidade de analisar os efeitos de transferência de calor nas superfícies é também restrita. Apesar de sucessivas reformulações ainda possui algumas lacunas:

- Não realiza a modelação do fluxo de ar corretamente, isto é, as fugas de ar são modeladas de forma fixa, o que não é aplicável em todas as situações;
- O coeficiente de perda de calor é constante, não incluindo os efeitos de radiação e convecção no cálculo do fluxo de ar e do fluxo de calor.

Apesar de certas lacunas, o *DOE2.1e* é uma ferramenta útil na simulação térmica de edifícios.

### **2.3.2.6. TRACE700**

Segundo a *TRANE INC.*, empresa que desenvolveu o *TRACE700*, afirma que este é uma ferramenta que permite maximizar um projeto energético de um edifício, incluindo o aquecimento, o arrefecimento, a ventilação e os sistemas de ar condicionado, tendo por base o consumo energético do edifício e o ciclo de vida dos equipamentos.

O modelo *TRACE* ajuda a estabelecer um pico de arrefecimento e as cargas de aquecimento durante a fase de planeamento da construção do projeto; auxilia na definição de estratégias de poupança de energia (tendo em conta os efeitos de iluminação natural), bem como na adoção de estratégias que maximizem o desempenho energético do edifício. Um aspeto importante deste *software* é que fornece dados que documentam o edifício, do ponto de vista energético, segundo as normas da *ASHRAE Standard 9.1* e que validam o edifício no processo de certificação energética.

De acordo com os requisitos da *ASHRAE*, os métodos de cálculo dos parâmetros é realizado através de:

- Escolha de 8 cargas energéticas, incluindo o fluxo de calor equilibrado, sendo este calculado a partir do método RTS, utilizando os algoritmos da *ASHRAE*, especificando hora a hora os gastos energéticos do edifício;
- Perfis de tempo pré-definidos;
- Descrição da envolvente do edifício, bem como do espaço da construção, fluxos de ar, fontes de calor e horários de utilização;
- Inclusão do armazenamento térmico e da energia recuperada;
- Simulação de estratégias de controlo da temperatura e renovação de ar;
- Cálculo do fluxo de ar;
- Consideração de todos os elementos energéticos que afetam o aquecimento e o arrefecimento;
- Previsão dos custos operacionais baseados nos tipos de energia e das taxas dos serviços públicos;
- Análise do impacto económico do projeto desenvolvido.

O *TRACE700* apresenta algumas funcionalidades que têm o intuito de facilitar a sua utilização e a análise energética do edifício. Tal como outros *softwares* permite também a elaboração de relatórios que incluem o resumo e os detalhes da simulação, bem como os dados e parâmetros inseridos de modo a facilitar a sua interpretação.

### **2.3.2.7. CARRIER\_HAP**

O software *CARRIER\_HAP* foi desenvolvido pela *CARRIER* (2012) e faz projetos AVAC para edifícios analisando a capacidade energética e comparando os seus consumos energéticos com os seus custos operacionais, tornando-se por isso numa excelente ferramenta na análise do desempenho energético de um edifício.

Este *software* aplica-se a edifícios de grandes e pequenas dimensões (escritórios, lojas, hospitais, escolas, entre outros) e com sistemas de climatização (ar condicionado, bombas de calor, ventiladores) uma vez que uma das diversas funcionalidades é elaborar um novo projeto para o sistema de conservação de energia.

O *CARRIER\_HAP* utiliza uma abordagem que se baseia nos sistemas de cálculo dos procedimentos de dimensionamento e nos relatórios energéticos referentes a cada tipo de sistema específico. Possuindo assim várias características adequadas ao sistema em causa, quer seja para o sistema AVAC, ou para a análise energética do edifício, ou na caracterização do clima da zona em que o edifício se encontra, ou na influencia que o equipamento do edifício tem no desempenho energético do espaço em causa.

As características deste *software* são adequadas para a dimensão do espaço, envolvendo a manipulação do ar central, bombas de calor, entre outros. Oferece uma rápida análise para a elaboração de um projeto para ventiladores, WSHP, GSHP e sistemas VRF. A dimensão dos dados é fornecida para o arrefecimento central, para as bombas de calor, para os ventiladores, entre outros.

Este *software* calcula as taxas de fluxo de ar necessário para o espaço e para cada tipo de sistema específico. Estas taxas são calculadas através dos valores da temperatura da fonte ou

CFM. A relação entre o CFM e as pessoas é considerado um parâmetro importante para a manutenção de uma boa ventilação e qualidade do ar interior.

Os requisitos mínimos para o sistema de ventilação referentes ao fluxo de ar podem ser calculados através da *ASHRAE Standard 62-2001/2004/2007* ou pela soma simples dos requisitos da ventilação do espaço. Já o fluxo de calor é calculado pelo método de função de transferência da *ASHRAE*.

No que diz respeito à análise energética, o *CARRIER\_HAP* faz uma análise real hora a hora da energia utilizando dados meteorológicos, de modo a calcular a transferência de calor, as cargas, o sistema de ar e a operação dos equipamentos existentes. Assim, leva em consideração o consumo de energia por hora e por componente de climatização (ventiladores, bombas de calor, sistemas de ar condicionado) e também de iluminação, máquinas e equipamento de escritório. Estes componentes são tabelados para determinar o total do consumo de energia do edifício; por sua vez, estes dados de consumo são utilizados para calcular o custo energético para cada fonte de energia.

Este *software* utiliza procedimentos da *ASHRAE*, tal como foi referido anteriormente, o método das funções de transferência para o cálculo da carga térmica do projeto, do aquecimento e para os cálculos da radiação solar. Assim, calcula as cargas térmicas do espaço 24 horas por dia durante os 12 meses do ano e permite a programação horária e sazonal de ocupação.

Relativamente ao sistema de ar, o *CARRIER\_HAP* executa detalhadamente simulações do comportamento térmico e mecânico do tratamento do sistema de ar, tanto para projeto como para a análise dos sistemas de energia. Os sistemas são configuráveis através do controlo para os componentes, tal como:

- Fornecimento da reposição da temperatura do ar;
- Controlo do fluxo de ar;
- Recuperação de calor e ventilação;
- Humidificadores;
- Pré-aquecimento das bombas de calor.

Uma das funcionalidades deste *software* é a rápida realização de relatórios que comparam o consumo de energia e o seu custo energético operacional e fornece o desempenho diário/mensal/anual, hora a hora do edifício. Estes relatórios integram vários gráficos que permitem uma fácil compreensão dos resultados obtidos.

### 3. Modelo matemático

Neste capítulo vai ser desenvolvido o modelo matemático que foi utilizado na simulação térmica. Este modelo matemático tem por base o método dos volumes finitos, e foi implementado em *MatLab*.

#### 3.1. Método dos volumes finitos

Em problemas de transferência de calor e massa e dinâmica de fluidos, é útil utilizarem-se métodos numéricos para a sua resolução, devido à não linearidade das equações diferenciais que resultam da modelação, bem como as geometrias e condições de fronteira complexas destes problemas. Para a resolução deste tipo de problemas existem três diferentes técnicas de solução numérica: aproximação das variáveis desconhecidas através de funções simples; discretização através da substituição das aproximações nas equações e posterior manipulação matemática; discretização das equações diferenciais e resolução das equações algébricas resultantes. As diferenças entre estas três diferentes técnicas centra-se na forma como as variáveis são aproximadas e nos processos de discretização.

O método dos volumes finitos foi originalmente desenvolvido como uma formulação especial de diferenças finitas. Este método distingue-se de outros devido à integração num volume de controlo o que leva a uma conservação das propriedades em cada volume. Como se consegue estabelecer uma relação entre o cálculo numérico e as propriedades físicas subjacentes ao princípio da conservação, este método torna-se atrativo e de melhor compreensão. A conservação das variáveis num volume de controlo finito pode ser expresso como um balanço entre os vários processos que nele ocorrem. Tal como nos outros métodos, a precisão do método depende das células da malha (quanto maior for o número de células, maior precisão terá a solução), no entanto, a precisão da solução e o tempo de cálculo dependem da espessura da malha. Para tal, é frequente utilizar-se uma malha não uniforme, ou seja, ser fina nas zonas onde existe uma grande variação de ponto para ponto e larga onde a variação de ponto para ponto é pequena.

Na figura 3.1 está representado o volume de controlo para ponto “P”. A utilização deste método centra-se na discretização da equação de calor no tempo e no espaço (3.1):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (3.1)$$

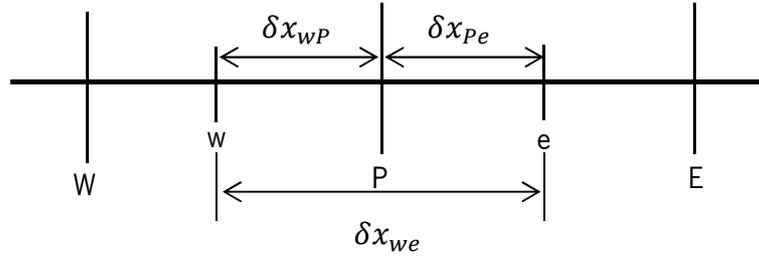


Figura 3.1 – Esquema dos pontos considerados.

Para tal, através da integração da equação 3.1, considerando o volume de controlo e o intervalo de tempo ( $\partial t$ ) vem:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} s dV dt \quad (3.2)$$

A equação (3.2) pode ser descrita como:

$$\int_w^e \left[ \int_t^{t+\Delta t} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt \quad (3.3)$$

Na equação (3.3),  $A$  significa a área da face do volume de controlo e  $\Delta V$  o volume, que é igual a  $A\Delta x$  em que  $\Delta x$  é a espessura do volume de controlo, e  $\bar{S}$  o termo fonte. Se se assumir que a temperatura em determinado nó prevalece sobre o volume de controlo, o membro à esquerda a equação 3.3 pode ser descrita da seguinte forma:

$$\int_w^e \left[ \int_t^{t+\Delta t} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV = \rho C_p (T_P - T_P^0) \Delta V \quad (3.4)$$

Na equação (3.4) “0” significa o valor da temperatura no tempo anterior ao cálculo. Se se aplicar a diferenciação central na primeira parcela do lado esquerdo da equação 3.3 esta pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho C_p (T_P - T_P^0) \Delta V = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( k_e A \frac{T_E - T_P}{\delta x_{PE}} - k_w A \frac{T_P - T_W}{\delta x_{WP}} \right) \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt \quad (3.5)$$

A temperatura a utilizar poderá ser no tempo  $t$  ou no tempo  $t+\Delta t$  de forma a calcular uma combinação entre as temperaturas de ambos os tempos. Esta aproximação pode ser feita através de um parâmetro  $\theta$  entre 0 e 1 e escrever um integral para as temperaturas no ponto P:

$$I_T = \int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [\theta T_P + (1 - \theta) T_P^0] \Delta t \quad (3.6)$$

Se o valor de  $\theta$  for 0, é utilizada a temperatura do tempo anterior, se for 1 utiliza-se a temperatura do tempo seguinte e se for  $\frac{1}{2}$  são utilizadas as temperaturas de ambos os tempos. A equação (3.6) aplicada na equação (3.5) e fazendo uma divisão por  $A \Delta t$  obtém-se:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left( \frac{T_P - T_P^0}{\Delta t} \right) \Delta x &= \theta \left[ \frac{k_e (T_E - T_P)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\delta x_{WP}} \right] \\ &+ (1 - \theta) \left[ \frac{k_e (T_E^0 - T_P^0)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_P^0 - T_W^0)}{\delta x_{WP}} \right] + \bar{S} \Delta x \end{aligned} \quad (3.7)$$

No estudo efetuado foi utilizado o método implícito, no qual,  $\theta = 1$ , logo a equação (3.7) vem:

$$\rho C_p \left( \frac{T_P - T_P^0}{\Delta t} \right) \Delta x = \left[ \frac{k_e (T_E - T_P)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\delta x_{WP}} \right] + \bar{S} \Delta x \quad (3.8)$$

Na figura 3.2 pode-se observar de que formas são utilizadas as temperaturas em função do tempo, ou seja, a partir da temperatura no ponto “P” no instante  $t$ , são calculadas as temperaturas nos pontos “W”, “P” e “E” no instante  $t+\Delta t$ .

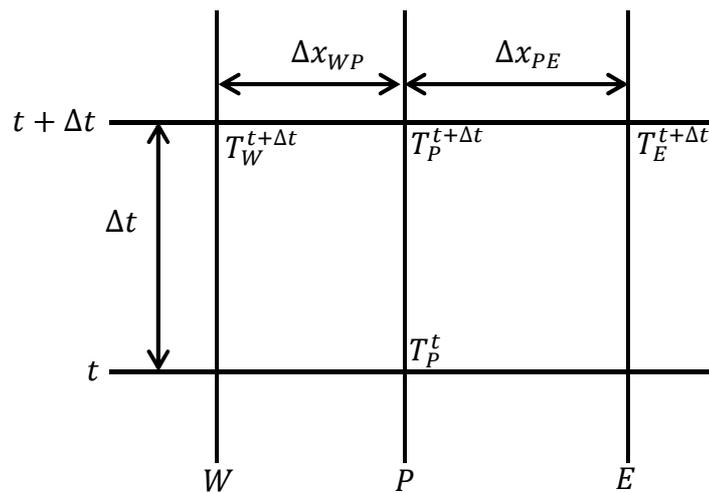


Figura 3.2 – Demonstração do método de cálculo utilizado.

### 3.2. Aplicação ao caso de estudo

No caso em estudo pretende-se estudar a variação da temperatura na parede ao longo do tempo. Foram estudadas diferentes opções para a constituição da parede, sendo a parede constituída por apenas um material, ou por vários materiais. Admitindo que:

$$r = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (3.9)$$

A equação (3.8) vem:

$$T_P - T_P^0 = r(T_E - T_P) - r(T_P - T_W) \quad (3.10)$$

## Para um material

### Apenas condução

As temperaturas nas fronteiras são constantes ao longo do tempo:

- $T_0^n = T_{ext}$
- $T_L^n = T_{int}$

Para o nó  $i = 1$  vem:

$$(1 + 3r)T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + 2rT_{ext} \quad (3.11)$$

Para o nó  $i = L - 1$  vem:

$$-rT_{L-2}^{n+1} + (1 + 3r)T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + 2rT_{int} \quad (3.12)$$

Para os restantes nós interiores vem:

$$-rT_{i-1}^{n+1} + (1 + 2r)T_i^{n+1} - rT_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad (3.13)$$

### Fronteiras sofrem convecção

As temperaturas nas fronteiras sofrem o efeito da convecção:

- $T_0^n = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv} \right)} T_P^n + \frac{h_{ext\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv} \right)} T_{ext}^n$
- $T_L^n = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_P^n + \frac{h_{int\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{int}^n$

Para o nó  $i = 1$  vem:

$$\left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv} \right)} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + \frac{2rh_{ext\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv} \right)} T_{ext} \quad (3.14)$$

Para o nó  $i = L - 1$  vem:

$$-rT_{L-2}^{n+1} + \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} \right) T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{int} \quad (3.15)$$

Nos restantes nós interiores aplica-se a equação (3.13).

### Fronteiras sofrem radiação

As temperaturas nas fronteiras sofrem o efeito da radiação:

- $T_0^n = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_P^n + \frac{h_{ext\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_{ext}^n$
- $T_L^n = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ rad} \right)} T_P^n + \frac{h_{int\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ rad} \right)} T_{int}^n$

Para o nó  $i = 1$  vem:

$$\left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + \frac{2rh_{ext\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_{ext}^n \quad (3.16)$$

Para o nó  $i = L - 1$  vem:

$$-rT_{L-2}^{n+1} + \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ rad} \right)} \right) T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ rad} \right)} T_{int}^n \quad (3.17)$$

Nos restantes nós interiores aplica-se a equação (3.13).

### Fronteiras sofrem o efeito da convecção e radiação

As temperaturas nas fronteiras sofrem o efeito da convecção e da radiação:

- $T_0^n = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} T_P^n + \frac{h_{ext}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} T_{ext}^n$
- $T_L^n = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int} \right)} T_P^n + \frac{h_{int}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int} \right)} T_{int}^n$

Para o nó  $i = 1$  vem:

$$\left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + \frac{2rh_{ext}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} T_{ext}^n \quad (3.18)$$

Para o nó  $i = L - 1$  vem:

$$-rT_{L-2}^{n+1} + \left(1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}\right) T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)} T_{int} \quad (3.19)$$

Nos restantes nós interiores aplica-se a equação (3.13).

### Conjugando os efeitos da convecção, radiação e radiação solar

As temperaturas nas fronteiras sofrem o efeito da convecção, da radiação e intensidade da radiação:

- $T_0^n = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_P^n + \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_{ext}^n + \frac{\alpha_{abs} I_{rad}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}$
- $T_L^n = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)} T_P^n + \frac{h_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)} T_{int}^n$

Para o nó  $i = 1$  vem:

$$\left(1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}\right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + \frac{2rh_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_{ext} + \frac{2r\alpha_{abs} I_{rad}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} \quad (3.20)$$

Para o nó  $i = L - 1$  vem:

$$-rT_{L-2}^{n+1} + \left(1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}\right) T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)} T_{int} \quad (3.21)$$

Nos restantes nós interiores aplica-se a equação (3.13).

### Para vários materiais

No caso de a parede ser constituída por vários materiais, é necessário determinar certos parâmetros de modo a que o cálculo se efetue de forma correta no local onde se dá a divisão de materiais, ou seja, nas faces do volume de controlo, pois nesse local existe um valor de condutividade que não é igual de ambos os lados. Lobarinhas (2003) refere que uma forma de determinar este valor é fazer uma variação linear do valor de  $k$  entre dois volumes de controlo, em que no caso da face oeste e este seria:

$$k_w = (1 - f_w)k_m + f_w \cdot k_{m+1} \quad (3.22)$$

$$k_e = (1 - f_e)k_{m+1} + f_e \cdot k_m \quad (3.23)$$

Onde o valor  $f$  representa a relação da distância do ponto do volume de controlo à face do volume com a distância entre dois pontos.

$$f_w = \frac{\frac{\Delta x_{m1}}{2}}{\frac{\Delta x_{m1}}{2} + \frac{\Delta x_{m2}}{2}} \quad (3.24)$$

$$f_e = \frac{\frac{\Delta x_{m2}}{2}}{\frac{\Delta x_{m1}}{2} + \frac{\Delta x_{m2}}{2}} \quad (3.25)$$

A figura 3.3 representa o volume do controlo para o ponto "P", que tem uma espessura de  $\Delta x_{WP} + \Delta x_{Pe}$  e no ponto "e" existe divisão de material.

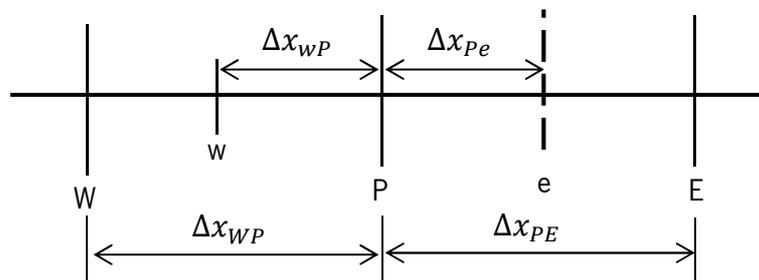


Figura 3.3 – Esquema do volume de controlo para 2 materiais.

Sabendo que:

$$q_w = k_w \frac{T_P - T_W}{\Delta x_{wP}} \quad (3.26)$$

$$q_e = k_e \frac{T_P - T_e}{\Delta x_{Pe}} \quad (3.27)$$

$$q_w = \frac{T_P - T_W}{\frac{\Delta x_{WW}}{k_W} + \frac{\Delta x_{wP}}{k_P}} \quad (3.28)$$

$$q_e = \frac{T_P - T_E}{\frac{\Delta x_{Pe}}{k_P} + \frac{\Delta x_{eE}}{k_E}} \quad (3.29)$$

Resultam as expressões:

$$k_w = \frac{k_{m1} \cdot k_{m2}}{(1 - f_w)k_{m1} + f_w \cdot k_{m2}} \quad (3.30)$$

$$k_e = \frac{k_{m1} \cdot k_{m2}}{(1 - f_e)k_{m2} + f_e \cdot k_{m1}} \quad (3.31)$$

$$\Delta x_w = \Delta x_e = \frac{\Delta x_{m1}}{2} + \frac{\Delta x_{m2}}{2} \quad (3.32)$$

$$\alpha_w = \frac{k_w}{\rho_{m2} \cdot C_{p_{m2}}} \quad (3.33)$$

$$\alpha_e = \frac{k_e}{\rho_{m1} \cdot C_{p_{m1}}} \quad (3.34)$$

$$r_w = \frac{\alpha_w \Delta t}{\Delta x_{m2} \cdot \Delta x_w} \quad (3.35)$$

$$r_e = \frac{\alpha_e \Delta t}{\Delta x_{m1} \cdot \Delta x_e} \quad (3.36)$$

Nas equações anteriores “m” representa o material. Para os nós  $i = 1$  e  $i = L - 1$  as equações são as mesmas para os casos de ser apenas um material, e no interior do mesmo material também se verifica a equação (3.13).

Nos pontos interiores onde há divisão de material a equação vem:

$$-r_m T_{i-1}^{n+1} + (1 + r_m + r_e) T_i^{n+1} - r_e T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad (3.37)$$

$$-r_w T_{i-1}^{n+1} + (1 + r_w + r_{m+1}) T_i^{n+1} - r_{m+1} T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad (3.38)$$

A aplicação destas equações discretizadas para cada volume de controlo resulta um sistema de equações algébricas na forma tridiagonal pois um ponto "P" relaciona-se com os seus vizinhos ("W" e "E"). As equações obtidas foram resolvidas através da resolução do sistema de equações a partir da expressão:

$$Ax = B \quad (3.39)$$

Em que:

- $A$  – É uma matriz tridiagonal;
- $x$  – É o vetor solução para as temperaturas no instante  $t+\Delta t$ ;
- $B$  – Vetor com os valores das temperaturas no instante  $t$ .

O sistema de equações virá:

$$\begin{bmatrix} b & c & 0 & \dots & 0 \\ a & b & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & b & c \\ 0 & \dots & 0 & a & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{t+\Delta t} \\ T_2^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{L-1}^{t+\Delta t} \\ T_L^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^t \\ T_2^t \\ \vdots \\ T_{L-1}^t \\ T_L^t \end{bmatrix}$$

No Anexo A estão as restantes equações utilizadas.

### 3.3. Implementação em *MATLAB*

O *MatLab* é um *software* interativo destinado a cálculos numéricos utilizando matrizes (MatLab = MATrix LABORatory). É um *software* que permite a análise numérica, cálculos com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos de forma fácil e rápida para o utilizador. As figuras 3.4 e 3.5 mostram como é o ambiente de trabalho deste *software*.

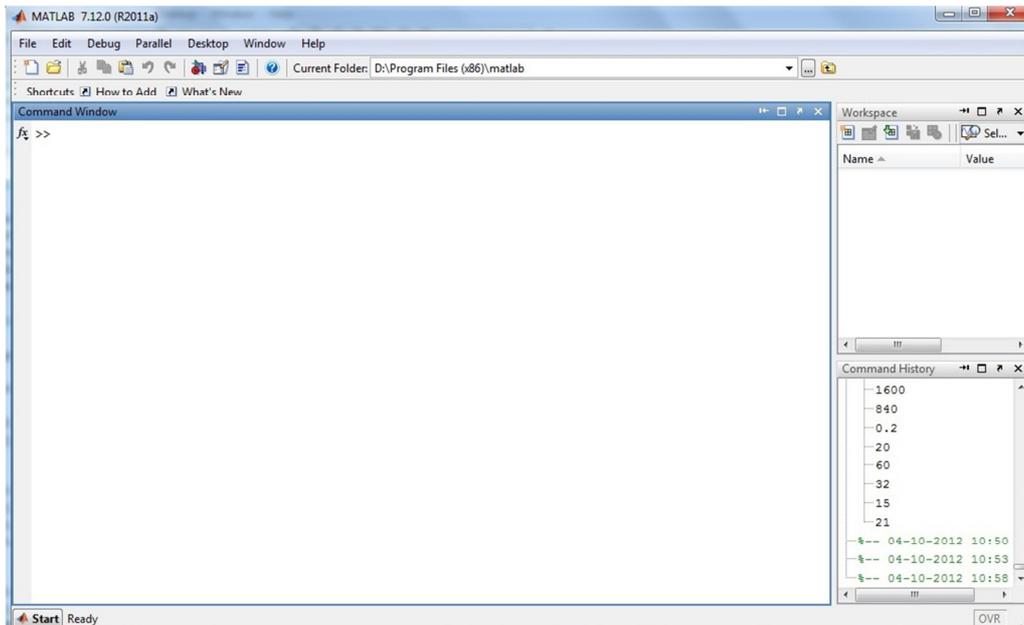


Figura 3.4 – Ambiente *MatLab*.

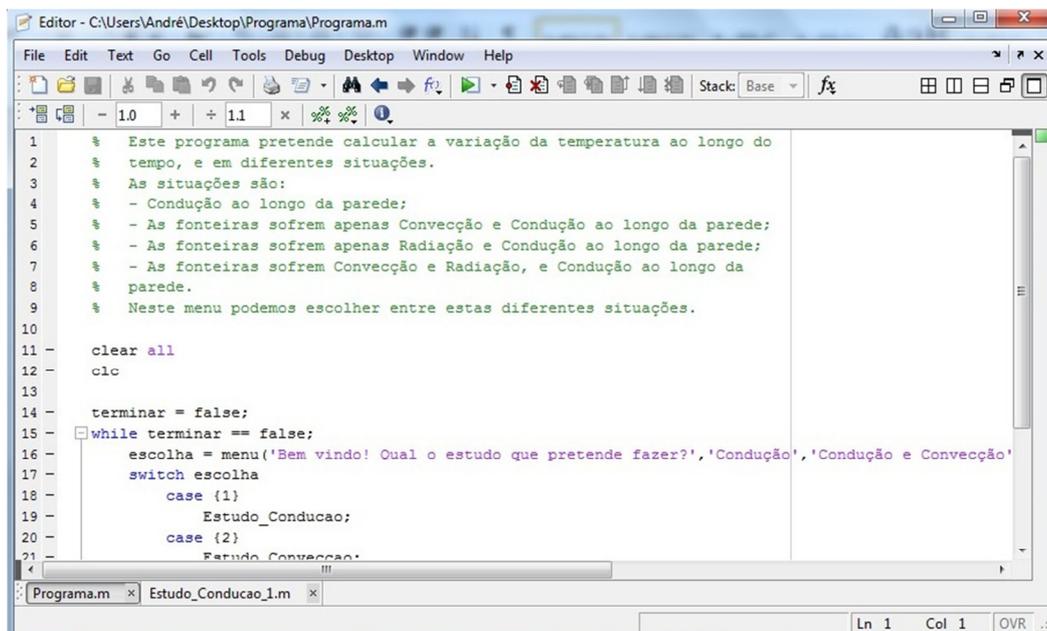


Figura 3.5 – Um programa em ambiente *MatLab*.

O presente estudo centra-se em verificar o tempo necessário para que uma parede estabilize a sua temperatura a partir de condições iniciais, bem como o fluxo de calor que atravessa a parede.

Para o cálculo das temperaturas finais, bem como do fluxo, e do tempo necessário para que a parede atinja um estado de equilíbrio, foram propostas várias situações:

- Análise do processo de transferência de calor para a parede e no interior da mesma;
- Variação da temperatura exterior longo do tempo;
- Quantidade de materiais constituintes da parede.

A partir destas situações foi construído o programa para a análise das temperaturas ao longo da parede. O esquema da figura 3.6 mostra como está organizado o programa.

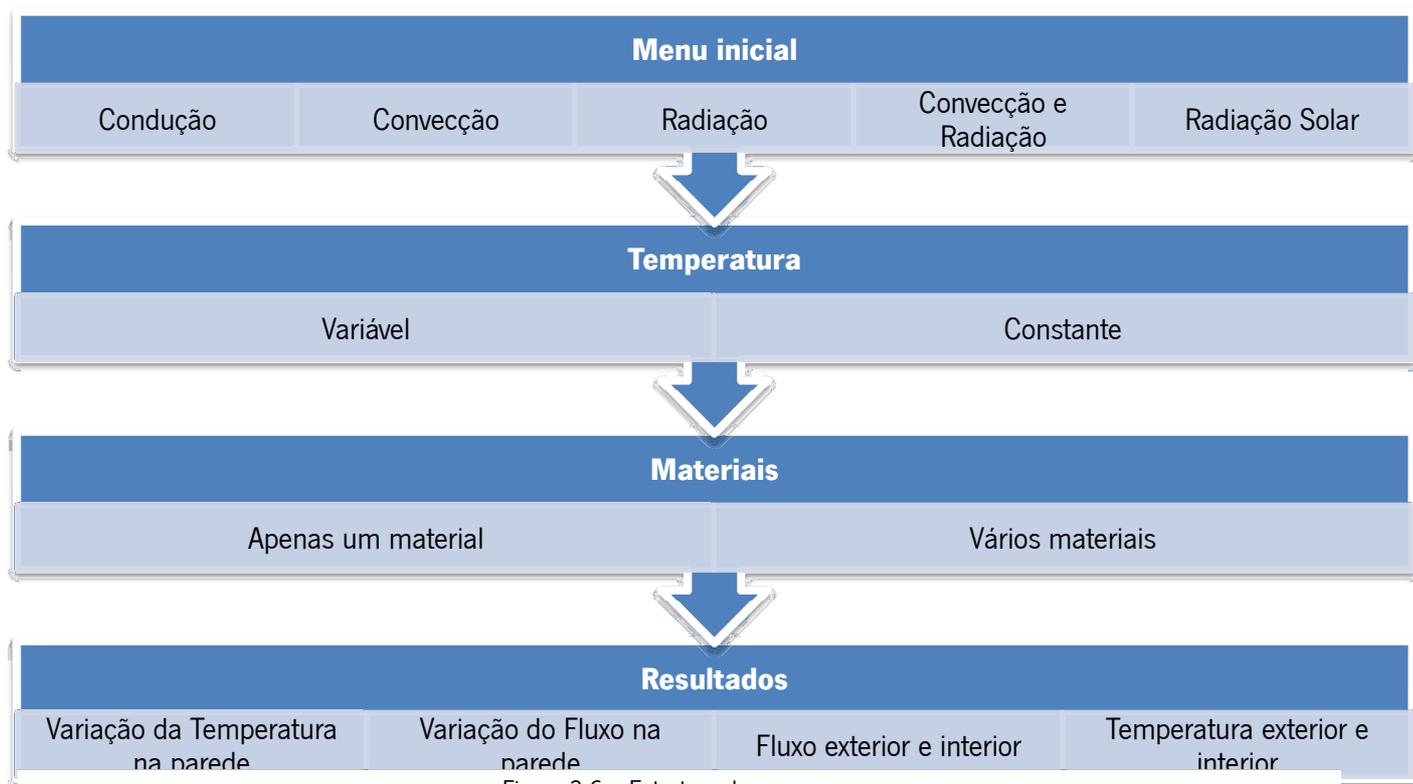


Figura 3.6 – Estrutura do programa.

Na figura 3.5 encontram-se as linhas de código que descrevem o menu inicial do programa implementado.

```
% Este programa pretende calcular a variação da temperatura ao longo do
% tempo, e em diferentes situações.
% As situações são:
% - Condução ao longo da parede;
% - As fronteiras sofrem apenas Convecção e Condução ao longo da parede;
% - As fronteiras sofrem apenas Radiação e Condução ao longo da parede;
% - As fronteiras sofrem Convecção e Radiação, e Condução ao longo da
% parede;
% - As fronteiras sofrem Convecção, Radiação e Radiação solar, e Condução
% ao longo da parede.
% Neste menu podemos escolher entre estas diferentes situações.

clear all
clc

terminar = false;
while terminar == false;
    escolha = menu('Bem vindo! Qual o estudo que pretende fazer?','Condução','Convecção','Radiação','Convecção e Radiação','Intensidade da Radiação','Sair');
    switch escolha
        case {1}
            Estudo_Conducao;
        case {2}
            Estudo_Conveccao;
        case {3}
            Estudo_Radiacao;
        case {4}
            Estudo_Conveccao_Radiacao;
        case {5}
            Estudo_Total;
        case {6}
            terminar=true;
    end
end
```

Figura 3.7 – Código do menu inicial do programa implementado.

No Anexo B está descrito o funcionamento do programa criado.



## 4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos. Numa primeira fase, os resultados são validados com soluções analíticas conhecidas e no final, pretende-se demonstrar a capacidade do programa na simulação e análise do comportamento transiente das paredes.

### 4.1. Validação do programa

Para verificar se o programa está a efetuar os cálculos de acordo com o esperado, primeiramente vai-se verificar se simulando uma parede constituída apenas por um material, a distribuição de temperaturas no final corresponde aos cálculos analíticos. Para isto considerou-se uma parede constituída por betão, uma constituída por tijolo, e outra constituída por um material isolante (esta parede terá uma espessura igual às anteriores, embora seja uma espessura excessiva para um material isolante, o que se pretende é comparar três paredes de diferentes materiais, mas com a mesma espessura). Na tabela 4.1 são apontadas as características de todos os materiais utilizados neste estudo, porém nesta comparação só se irá utilizar o betão, o tijolo, e o material isolante, os valores foram retirados do ITE 50 e de Mendonça (2005).

Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais

Material	Condutibilidade	Massa	Calor	Difusibilidade
	Térmica [W/m.K]	Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Específico [J/kg.K]	Térmica * 10 <sup>-7</sup> [m <sup>2</sup> /s]
Reboco	1,3	1800	1046	6,905
Betão	0,85	1600	840	6,3244
Tijolo	0,41	1000	920	4,4565
Isolante	0,037	40	1550	5,9677
Estuque	0,25	750	1250	2,6667

Com a figura 4.1 pretende-se explicar a distribuição dos pontos nos gráficos que vão ser apresentados mais adiante. O ponto "1" e "L" representam respetivamente os pontos da face exterior e interior dos materiais. De notar que na figura os pontos se apresentam equidistantes,

mas no entanto a distância entre os pontos “1” e “2” e os pontos “L-1” e “L” é  $\Delta x/2$  e entre os pontos interiores é de  $\Delta x$ .

Com a figura 4.2 pretende-se explicar de que forma está distribuído o tempo por etapas nos gráficos obtidos, considerando que de etapa para etapa corresponde um intervalo de tempo, e pode ser determinado da seguinte forma:

$$1500 \cdot 60s = 90000s \rightarrow \frac{90000s}{3600s} = 25h$$

Ou seja, para um intervalo de tempo de 60 s, a etapa 1500 corresponde a 25 h.

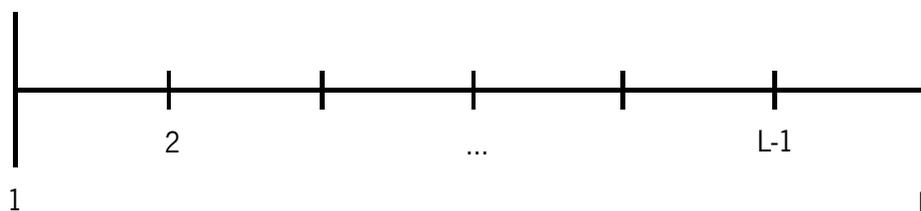


Figura 4.1 – Distribuição dos pontos.

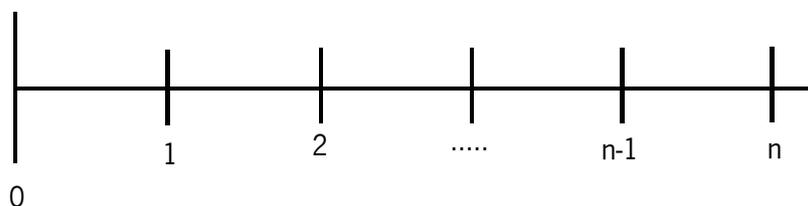


Figura 4.2 – Distribuição das etapas.

### Caso 1:

Neste primeiro caso, foi considerada uma espessura de 0,2 m e são testados diferentes materiais. O objetivo deste primeiro caso é verificar como estes se comportam ao longo do tempo até atingirem um estado de equilíbrio, considerando que as temperaturas nas faces exterior e interior da parede são constantes ao longo do tempo, ou seja, considerando apenas a condução de calor. Para isso foram considerados os seguintes aspetos:

- 31,8 °C para a temperatura exterior;

- 25 °C para a temperatura interior;
- 20 °C para a temperatura inicial da parede;
- 60 s para o intervalo de tempo entre cada etapa de cálculo;
- 7 pontos (5 interiores e 1 em cada face);
- 0,04 m de espaçamento entre pontos interiores.

Com base na análise da tabela 4.2 e da tabela 4.3, verifica-se que os valores obtidos em *MatLab* são idênticos aos obtidos pelo cálculo analítico, tanto para o fluxo de calor, como para as temperaturas finais. Fazendo uma comparação entre o betão e o tijolo, o fluxo de calor é menor para o tijolo, isto porque o tijolo tem uma condutibilidade térmica mais baixa que o betão, no entanto, o betão demora menos tempo a atingir o estado de equilíbrio que o tijolo. Dos três materiais, é o material isolante que tem um fluxo de calor mais baixo, o que seria de esperar porque a sua condutibilidade térmica é inferior à do betão e à do tijolo.

Tabela 4.2 – Valores obtidos através da simulação em *MatLab*

Material	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [h]	Pontos	Distância [m]	Temperatura [K]
Betão	28,90	21,67	2	0,02	304,1200
			3	0,06	302,7599
			4	0,10	301,3999
			5	0,14	300,0399
			6	0,18	298,6800
Tijolo	13,94	29,18	2	0,02	304,1200
			3	0,06	302,7599
			4	0,10	301,3998
			5	0,14	300,0399
			6	0,18	298,6800
Isolante	1,2580	17,12	2	0,02	304,1195
			3	0,06	302,7586
			4	0,10	301,3983
			5	0,14	300,0386
			6	0,18	298,6795

Tabela 4.3 – Valores obtidos através do cálculo analítico

Material	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Pontos	Distância [m]	Temperatura [K]
Betão	28,90	2	0,02	304,1200
		3	0,06	302,7600
Tijolo	13,94	4	0,10	301,4000
		5	0,14	300,0400
Isolante	1,2580	6	0,18	298,6800

Nas figuras 4.3 a 4.8 estão apresentados os resultados para o caso 1, referentes à variação da temperatura no material e do fluxo ao longo do tempo para os materiais selecionados

Como se verifica nas figuras 4.3, 4.5 e 4.7, no final do cálculo a distribuição das temperaturas ao longo da parede adquire uma distribuição linear. Na figura 4.9 estão representadas as temperaturas finais calculadas e como se pode verificar, estas estão distribuídas linearmente ao longo da parede, tal como indicado na figura 2.4.

As figuras 4.4, 4.6, e 4.8 apresentam a variação do fluxo de calor na face exterior e interior do material, verificando-se que para este caso, com as temperaturas consideradas, inicialmente o fluxo de calor é elevado na face exterior, já que, o material está a ganhar calor pelo exterior porque a temperatura ambiente exterior é superior à temperatura inicial do material; e negativo na face interior, uma vez que, o material está também a receber calor do ambiente interior, porque a temperatura ambiente interior é superior à temperatura inicial do material, já que o sentido de cálculo do fluxo de calor é efetuado do ambiente exterior para o ambiente interior. No entanto, ao final de algum tempo o fluxo de calor na face interior inverte o seu sentido, ou seja, o material está a perder calor para o ambiente interior.

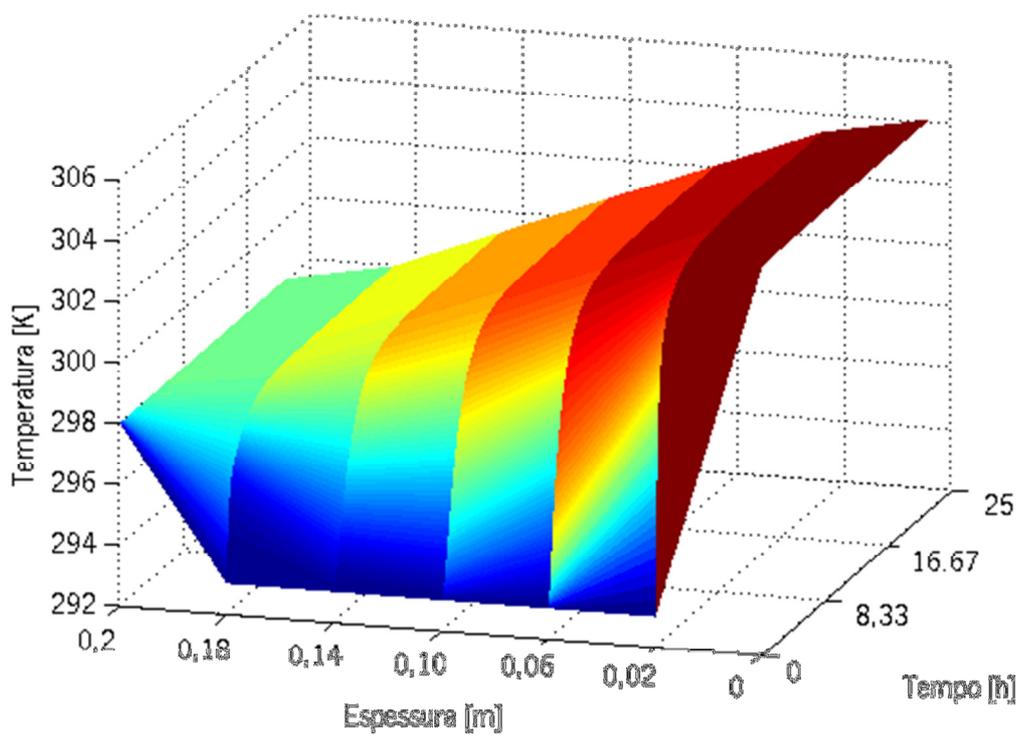


Figura 4.3 – Variação da temperatura no betão ao longo do tempo.

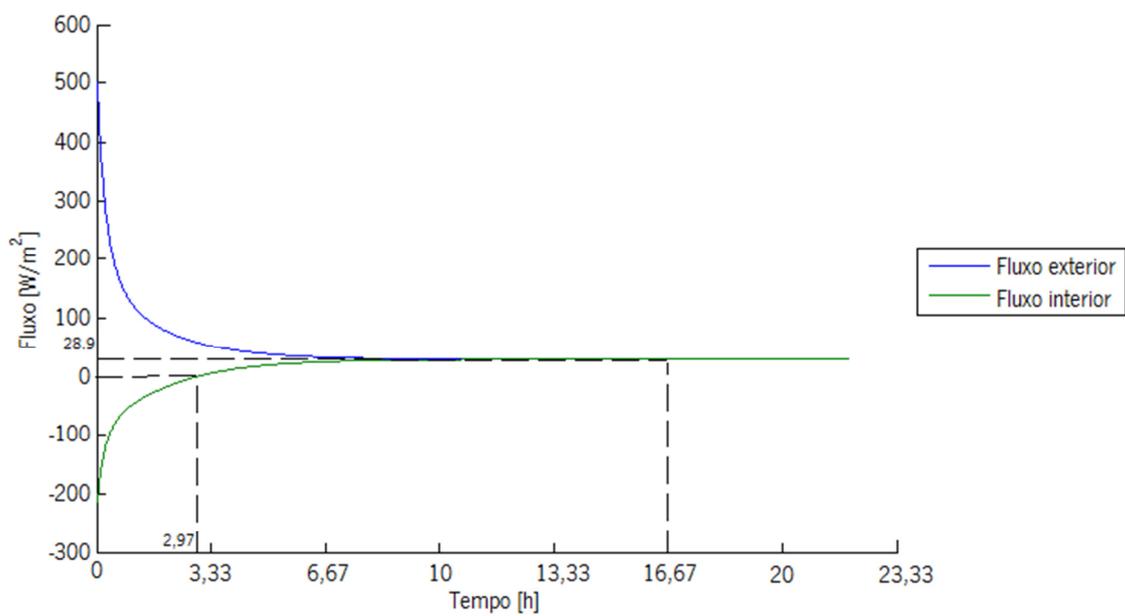


Figura 4.4 – Variação do fluxo no betão ao longo do tempo.

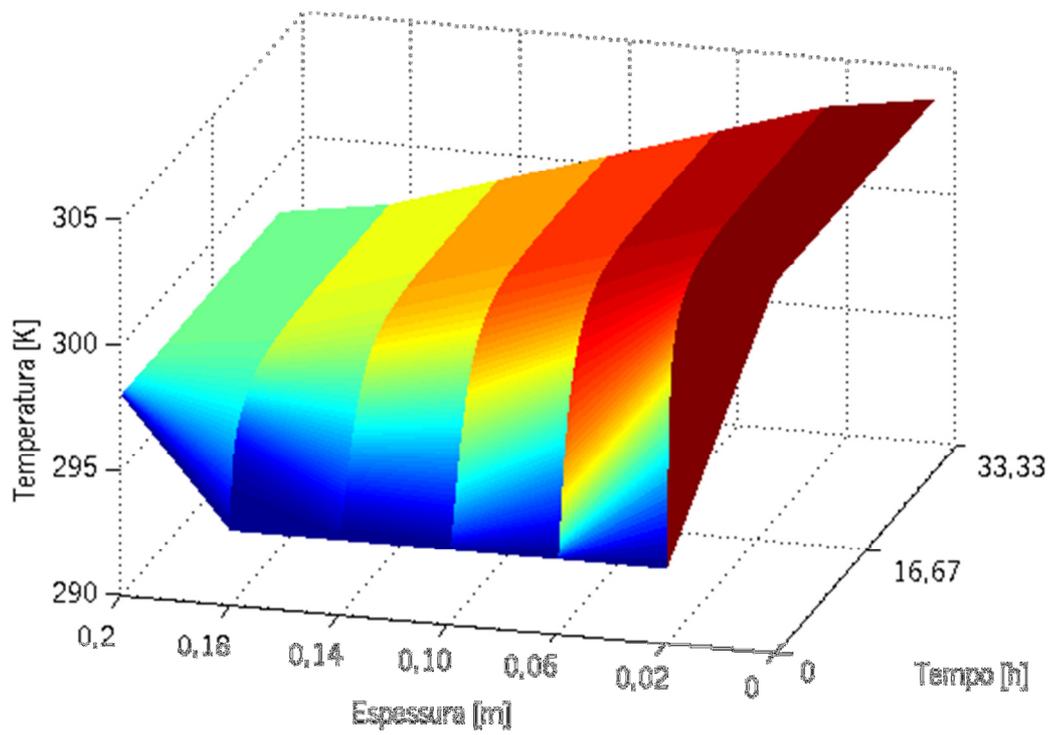


Figura 4.5 – Variação da temperatura no tijolo ao longo do tempo.

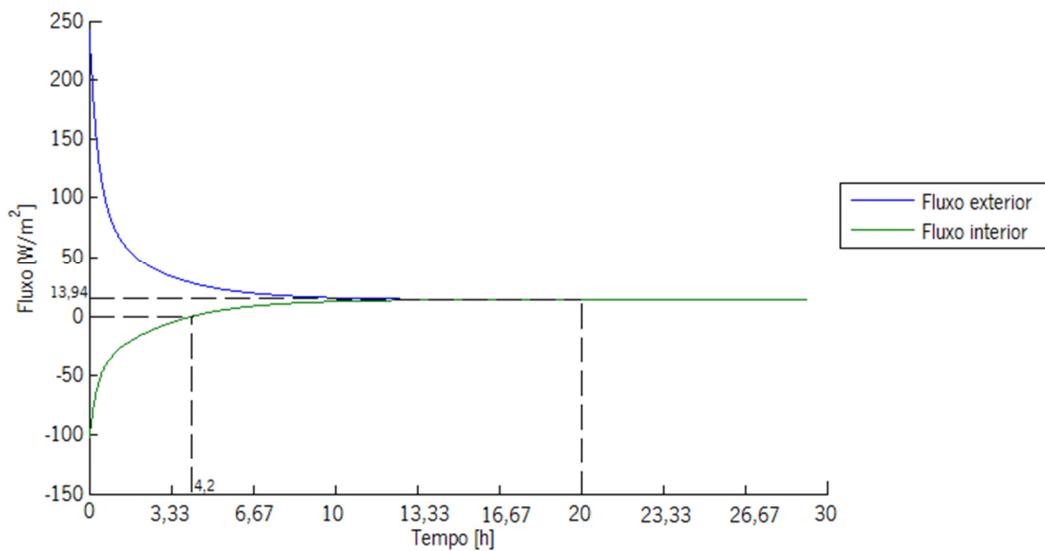


Figura 4.6 – Variação do fluxo no tijolo ao longo do tempo.

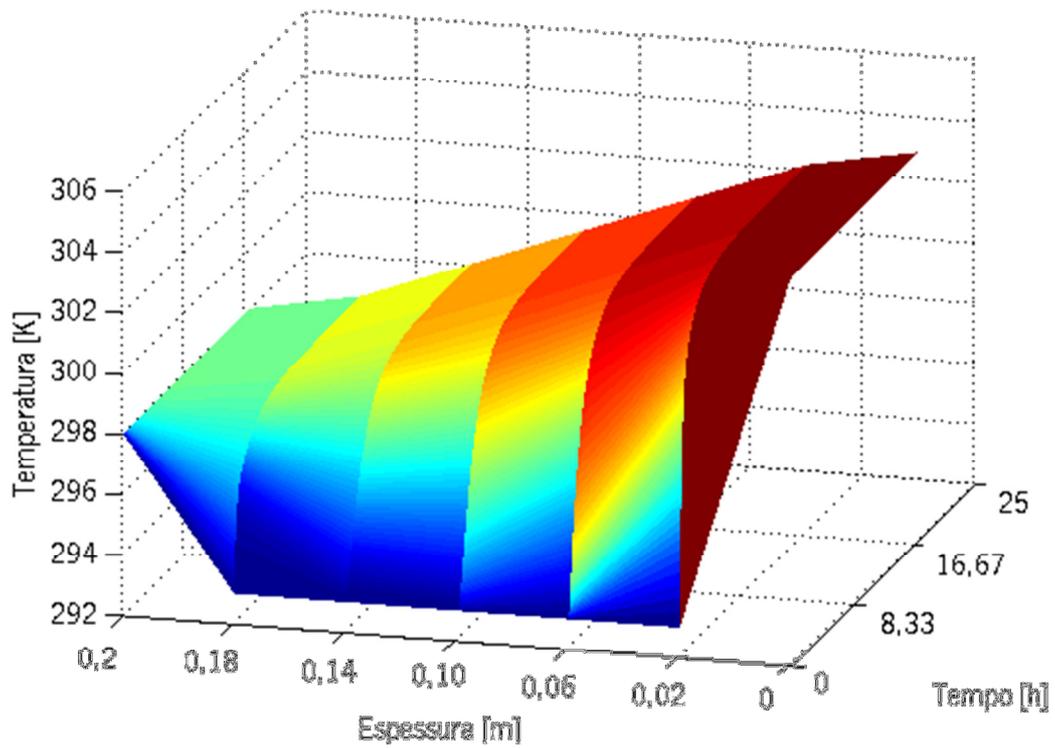


Figura 4.7 – Variação da temperatura no isolante ao longo do tempo.

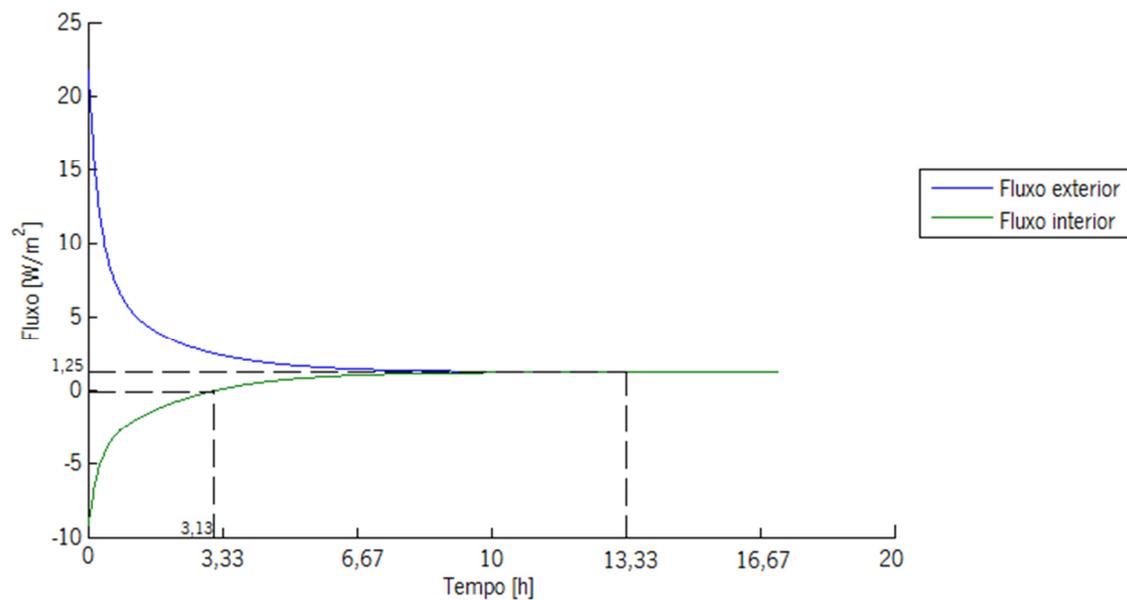


Figura 4.8 – Variação do fluxo no isolante ao longo do tempo.

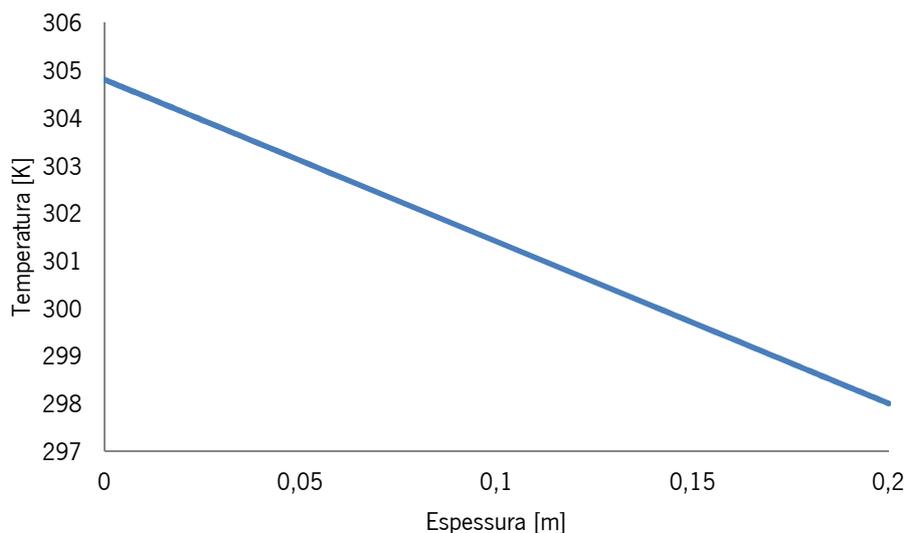


Figura 4.9 – Temperaturas em estado estacionário ao longo da espessura da parede.

### Caso 2:

De modo a verificar se o programa efetua corretamente o cálculo, não apenas no caso em que as temperaturas nas faces da parede são constantes ao longo do tempo, mas também considerando o efeito da convecção no exterior e no interior, efetuou-se uma simulação idêntica à anterior, em que se considerou o seguinte:

- 31,8 °C para a temperatura exterior;
- 25 °C para a temperatura interior;
- 20 °C para a temperatura inicial da parede;
- 60 s para o intervalo de tempo entre cada etapa de cálculo;
- 7 pontos (5 interiores e 1 em cada face);
- 0,04 m de intervalo entre pontos interiores;
- 5 W/m<sup>2</sup>.K para o coeficiente de convecção no interior;
- 20 W/m<sup>2</sup>.K para o coeficiente de convecção no exterior.

Com estas considerações e com os mesmos materiais utilizados na simulação anterior, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 4.4 e também apresenta-se os valores analíticos para comparação:

Tabela 4.4 – Valores obtidos na simulação em *MatLab* e analiticamente

Material	Pontos	Distância [m]	<i>MatLab</i>			Analiticamente	
			Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [h]	Temperatura [K]	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura [K]
Betão	1	0			304,0993		304,0994
	2	0,02			303,7696		303,7697
	3	0,06			303,1102		303,1103
	4	0,10	14,8121	62,78	302,4508	14,0121	302,4509
	5	0,14			301,7914		301,7915
	6	0,18			301,1320		301,1321
	7	0,2			300,8023		300,8024
Tijolo	1	0			304,3391		304,3392
	2	0,02			303,8895		303,8896
	3	0,06			302,9902		302,9904
	4	0,10	9,2165	57,22	302,0910	9,2165	302,0912
	5	0,14			301,1918		301,1921
	6	0,18			300,2927		300,2929
	7	0,2			299,8432		299,8433
Isolante	1	0			304,7399		304,7399
	2	0,02			304,0894		304,0899
	3	0,06			302,7886		302,7901
	4	0,10	1,2024	18,6	301,4884	1,2024	301,4902
	5	0,14			300,1887		300,1903
	6	0,18			298,8897		298,8904
	7	0,2			298,2405		298,2405

A partir dos valores obtidos verifica-se que também neste caso, os valores da simulação em *MatLab* são idênticos aos verificados no cálculo analítico. No entanto, verifica-se que considerando o efeito da convecção o tempo para que se atinja o equilíbrio aumentou consideravelmente no caso do betão e do tijolo. As temperaturas finais nesta situação são diferentes para os três materiais.

Nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 pode-se observar a variação da temperatura nas faces exterior e interior da parede ao longo do tempo. As temperaturas nas faces, aproximam-se das

temperaturas exterior e interior como demonstra a figura 2.6. Nos pontos interiores da parede a variação é linear tal como mostra a figura 4.13.

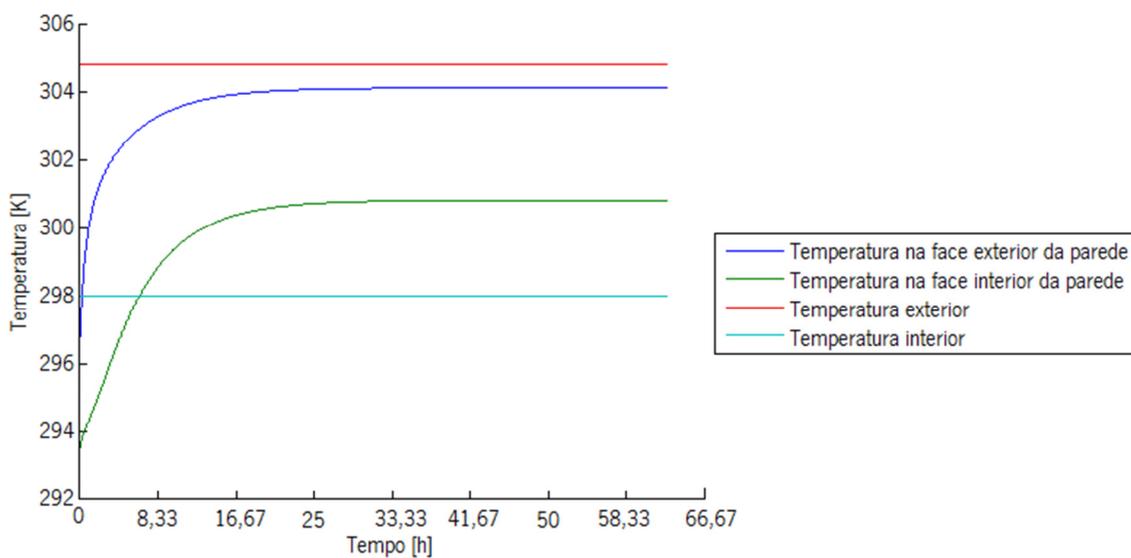


Figura 4.10 – Variação da temperatura no betão ao longo do tempo.

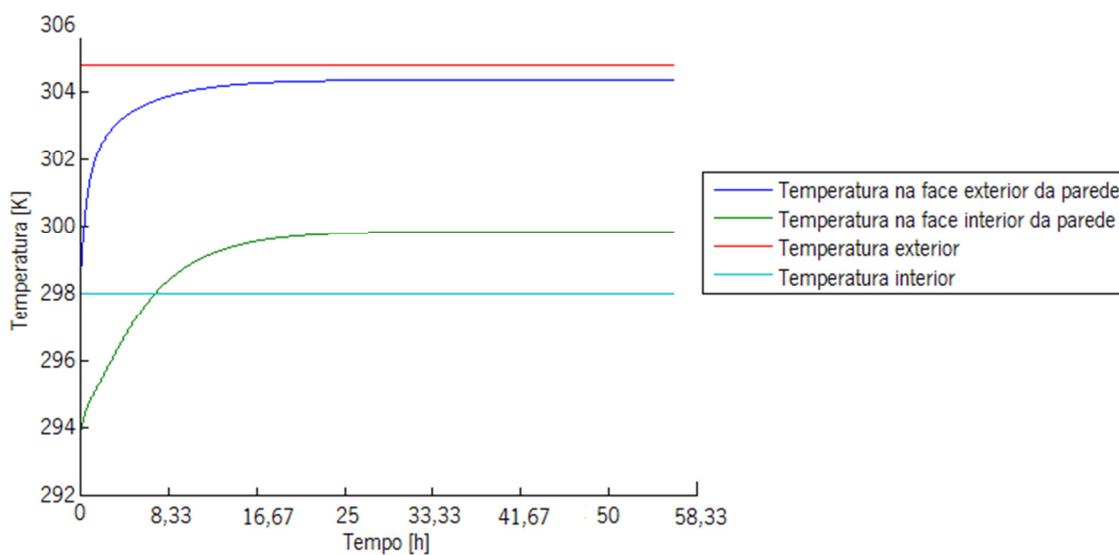


Figura 4.11 – Variação da temperatura no tijolo ao longo do tempo.

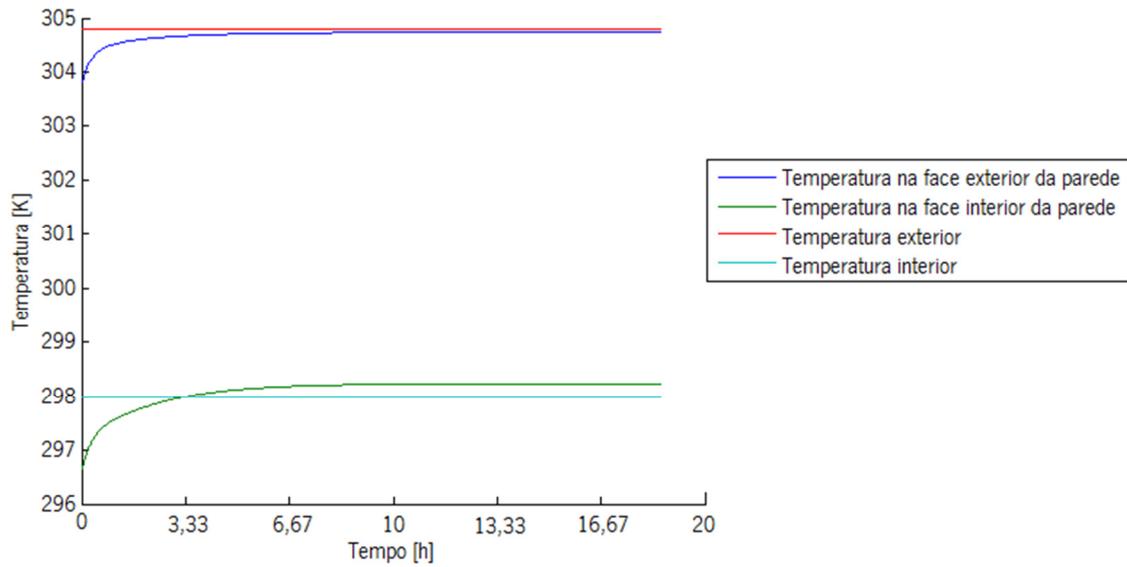


Figura 4.12 – Variação da temperatura no isolante ao longo do tempo.

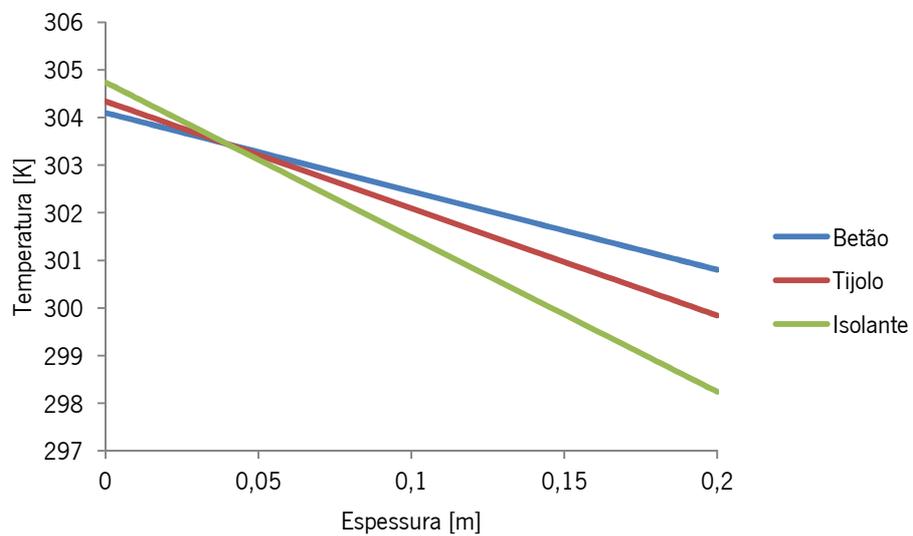


Figura 4.13 – Temperaturas finais para os 3 materiais em regime estacionário ao longo da espessura da parede.

**Caso 3:**

Outra situação que se torna necessário verificar se o programa está a efetuar corretamente o cálculo das temperaturas, é na situação de haver mais de um material. Para tal foi considerada a seguinte parede:

Tabela 4.5 – Constituição da parede

Material	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor Específico [J/kg.K]	Espessura [m]
Betão	0,85	1600	840	0.05
Isolante	0.037	40	1550	0.05
Tijolo	0,41	1000	920	0.05

Para se testar se o programa efetua o cálculo de acordo com o cálculo analítico, foram considerados os mesmos parâmetros do caso 2, com a diferença que o número de pontos considerados no cálculo foi de 19 pontos, 5 para cada material, 1 para cada face e mais 2 para os locais onde se dá a divisão de materiais, como é apresentado na figura 4.14, e a distância entre os pontos interiores é de 0,01 m.

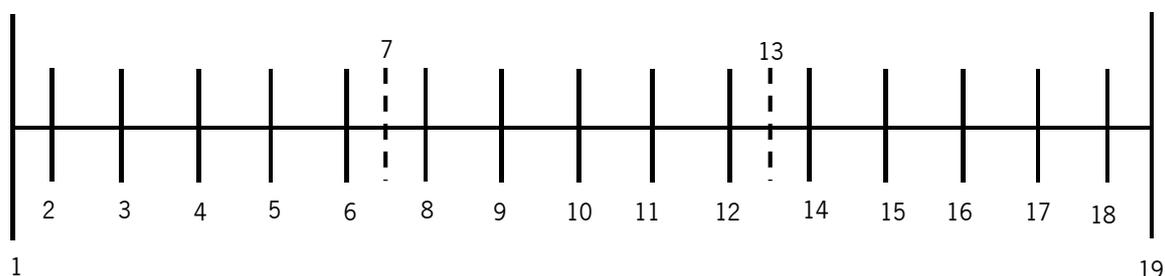


Figura 4.14 – Distribuição dos pontos na parede

Como se pode observar na tabela 4.6 os valores obtidos em *MatLab* e os valores calculados analiticamente são idênticos. Pode concluir-se que para os diferentes casos, os valores obtidos na simulação em *MatLab* correspondem aos valores esperados.

Na figura 4.15 observa-se a variação da temperatura na parede ao longo do tempo, e na figura 4.16 a temperatura final da parede. Em ambas, se constata que no final a distribuição das temperaturas no final é linear para cada material, e que na zona constituída por material isolante, a diferença de temperatura é maior, isto porque, a condutividade térmica do isolante é inferior à do betão e do tijolo.

Tabela 4.6 – Valores obtidos em *MatLab* e analiticamente

Pontos	Espessura [m]	<i>MatLab</i>			Analiticamente	
		Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [h]	Temperatura nos pontos [K]	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura nos pontos [K]
1	0			304,6092		304,6092
2	0,005			304,5868		304,5868
3	0,015			304,5419		304,5419
4	0,025			304,4970		304,4970
5	0,035			304,4521		304,4521
6	0,045			304,4072		304,4072
7	0,05			304,3848		304,3848
8	0,055			303,8691		303,8691
9	0,065			302,8378		302,8379
10	0,075	3,8157	28,27	301,8065	3,8157	301,8066
11	0,085			300,7752		300,7754
12	0,095			299,7439		299,7441
13	0,1			299,2285		299,2285
14	0,105			299,1817		299,1819
15	0,115			299,0886		299,0889
16	0,125			298,9956		298,9958
17	0,135			298,9025		298,9027
18	0,145			298,8095		298,8097
19	0,15			298,7629		298,7631

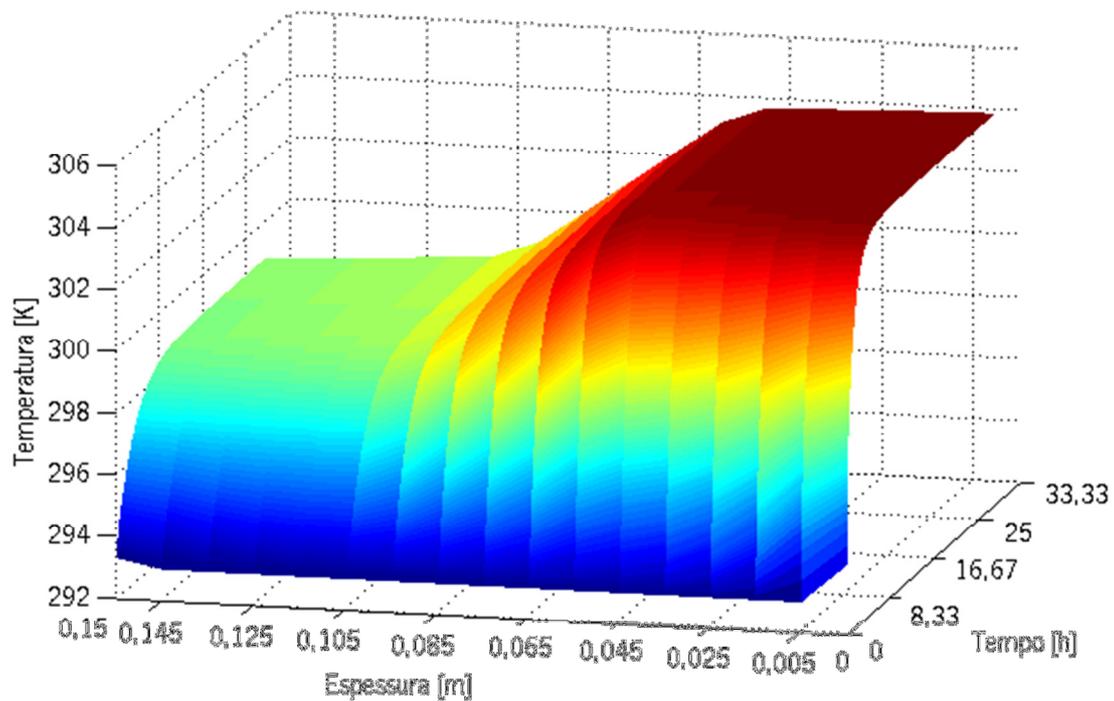


Figura 4.15 – Variação da temperatura na parede ao longo do tempo.

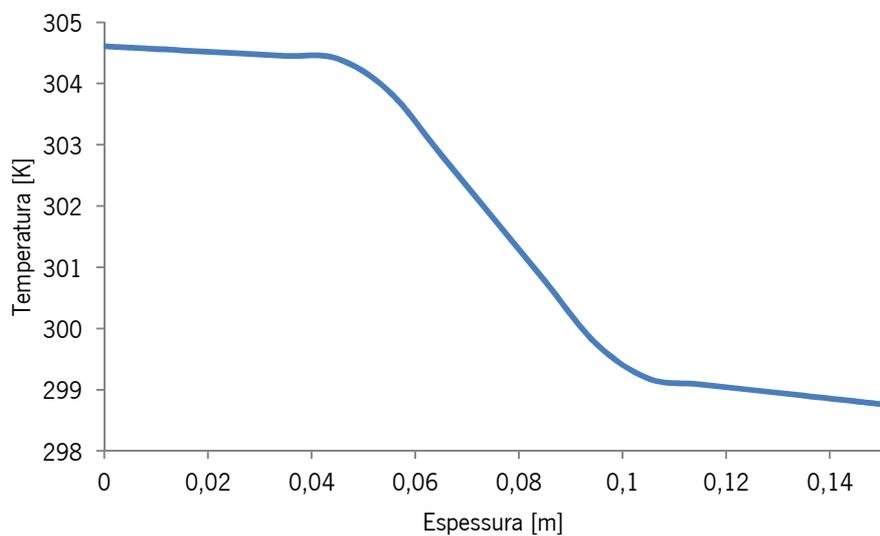


Figura 4.16 – Temperaturas finais.

**Caso 4:**

Torna-se necessário a verificação quando se considera o efeito da radiação. Aqui, verifica-se duas situações:

- Radiação proveniente do céu, do solo e do ambiente interior;
- Radiação solar.

No caso da radiação proveniente do céu, do solo e do ambiente interior definiu-se o seguinte:

- Temperatura do céu inferior à temperatura ambiente;
- Temperatura do solo superior à temperatura ambiente;
- Temperatura média interior diferente da temperatura ambiente interior.

Para a temperatura do céu considerou-se ser inferior em 5 °C à temperatura ambiente exterior, e a temperatura do solo ser superior em 5 °C. As condições para a comparação entre uma temperatura do céu e do solo diferentes da temperatura ambiente exterior são:

- 31,8 °C para a temperatura exterior;
- 36,8 °C para a temperatura do céu;
- 26,8 °C para a temperatura do solo;
- 25 °C para a temperatura interior;
- 20 °C para a temperatura inicial da parede;
- 60 s para o intervalo de tempo entre cada etapa de cálculo;
- 7 pontos (5 interiores e 1 em cada face);
- 0,04 m de distância entre os pontos interiores.

De notar que nesta comparação não foi considerado o efeito da convecção, e comparação foi efetuada para apenas um material, o betão.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos no *MatLab* para o caso 4

Temperatura do céu e do solo	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Pontos	Espessura [m]	Temperatura [k]	Coefficiente de radiação exterior [W/m <sup>2</sup> .K]	Coefficiente de radiação interior [W/m <sup>2</sup> .K]	Tempo [h]
Iguais à temperatura exterior	11,4624	1	0	302,7968	5,7226	5,4584	43,47
		2	0,02	302,5271			
		3	0,06	301,9876			
		4	0,10	301,4482			
		5	0,14	300,9088			
		6	0,18	300,3694			
		7	0,2	300,0998			
Diferentes da temperatura exterior	11,6740	1	0	302,8849	6,0964	5,4595	43,47
		2	0,02	302,6102			
		3	0,06	302,0608			
		4	0,10	301,5115			
		5	0,14	300,9621			
		6	0,18	300,4128			
		7	0,2	300,1381			

Através dos resultados obtidos verifica-se que a consideração de uma temperatura do céu e do solo diferente da temperatura exterior promove algumas alterações, embora estas alterações não sejam significativas.

No entanto, também se pode definir uma temperatura média interior diferente da temperatura interior. No entanto, esta consideração leva a um erro no cálculo, de forma que, o cálculo não é possível de ser efetuado até ao estado de equilíbrio. Isto pode ser entendido como uma limitação, no entanto, como se verifica para as temperaturas do céu e do solo, as alterações provocadas por essa diferença não serão de todo significativas. Esta consideração de uma temperatura média interior diferente da temperatura interior parte do princípio é igual ao somatório dos fatores de forma das restantes paredes em relação à parede que se pretende simular, multiplicado o fator pela temperatura da correspondente parede.

No caso de se considerar a radiação solar, pode-se afirmar que os resultados finais serão diferentes, pois, a radiação solar é um parâmetro que implica um acréscimo no fluxo de calor. Para tal foi considerado o seguinte:

- 31,8 °C para a temperatura exterior;
- 25 °C para a temperatura interior;
- 20 °C para a temperatura inicial da parede;
- 381 W/m<sup>2</sup> de radiação solar;
- 60 s para o intervalo de tempo entre cada etapa de cálculo;
- 7 pontos (5 interiores e 1 em cada face);
- 0,04 m para a distância entre os pontos.

Como se pode observar pela figura 4.17 e pela tabela 4.8, a inclusão da radiação solar tem grande influência no comportamento da parede. Neste caso, verifica-se um aumento considerável do fluxo de calor, e as temperaturas finais são diferentes.

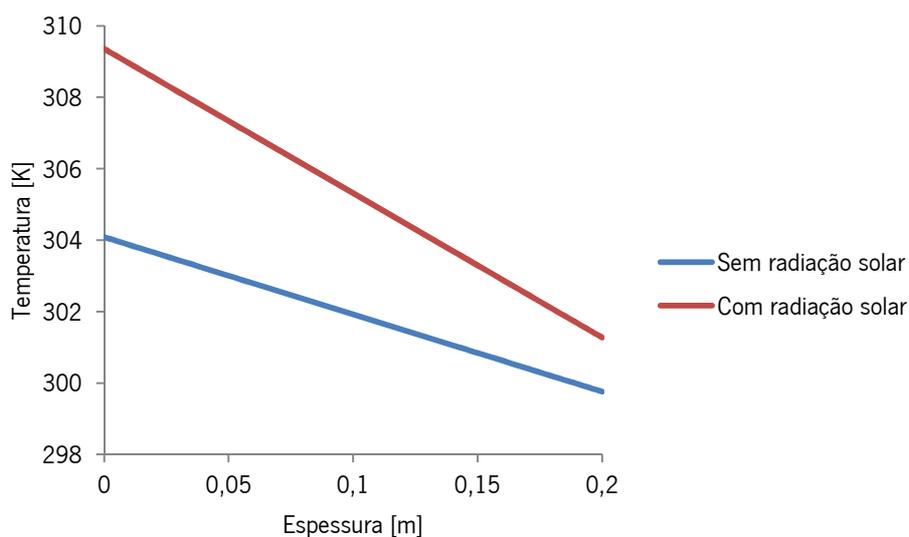


Figura 4.17 – Temperaturas finais ao longo da espessura com o efeito da radiação solar.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos em *MatLab*

Radiação solar	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Pontos	Espessura [m]	Temperatura [k]	Coeficiente		Tempo [h]
					de convecção e radiação exterior [W/m <sup>2</sup> .K]	de convecção e radiação interior [W/m <sup>2</sup> .K]	
Sem radiação solar	18,3875	1	0	304,0861	25,7590	10,4491	23,17
		2	0,02	303,6535			
		3	0,06	302,7881			
		4	0,10	301,9228			
		5	0,14	301,0575			
		6	0,18	300,1923			
		7	0,2	299,7596			
Com radiação solar	34,3485	1	0	309,3561	25,9102	10,4907	23,72
		2	0,02	308,5479			
		3	0,06	306,9315			
		4	0,10	305,3151			
		5	0,14	303,6987			
		6	0,18	302,0823			
		7	0,2	301,2741			

## 4.2. Estado não estacionário

O objetivo do programa criado é simular o comportamento térmico de paredes de um edifício ao longo do dia. Para isso, foram consideradas as condições climáticas de um determinado local, neste caso para a localidade de Guimarães, e para o interior as condições de conforto térmico previstas no RCCTE. Para os dados climatéricos recorreu-se à base de dados climática do SOLTERM, que para cada dia e a cada hora considera o seguinte:

- Mês
- Dia
- Hora
- Temperatura [°C×10]

- Precipitação [mm]
- Humidade relativa [%]
- Vento – magnitude [m/s×10]
- Vento – rumo [0°....359° (0°=N)]
- Pressão [hPa]
- Nebulosidade total [0....10 (limpo a coberto)]
- Nebulosidade opaca [0....10 (limpo a coberto)]
- Radiação solar – global [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – difusa [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical N [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical NW [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical W [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical SW [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical S [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical SE [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical E [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação solar – global vertical NE [W/m<sup>2</sup>]
- Radiação IV – celeste descendente [W/m<sup>2</sup>]
- Iluminância – global horizontal [lux]
- Iluminância – difusa horizontal [lux]
- Iluminância – direta normal [lux]
- Luminância zenital [Cd/m<sup>2</sup>]

Como se pode observar pela figura 4.18 retirada da base de dados climática para Guimarães, verifica-se que os valores para a radiação solar no quadrante oeste (coluna 16) não correspondem à realidade, bem como os valores para o quadrante este (coluna 20), isto porque os valores indicam que a radiação solar é mais intensa a oeste da parte da manhã e a este da parte da tarde. Como da parte da manhã, a radiação solar é mais intensa a este do que a oeste, os dados não parecem fiáveis.



Tabela 4.9 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 26 de janeiro

Mês	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Radiação solar – global vertical [W/m <sup>2</sup> ]		
				E	S	W
janeiro	26	1	3,7	0	0	0
		2	3,9	0	0	0
		3	4,1	0	0	0
		4	4,3	0	0	0
		5	4,4	0	0	0
		6	4,6	0	0	0
		7	4,8	0	0	0
		8	5,0	53	36	9
		9	5,4	34	31	13
		10	6,4	20	22	11
		11	7,5	40	50	25
		12	8,7	119	176	85
		13	9,7	71	145	100
		14	10,3	42	85	68
		15	10,4	37	80	73
		16	10,0	18	43	47
		17	9,3	9	38	58
		18	8,5	0	0	0
		19	7,9	0	0	0
		20	7,4	0	0	0
		21	6,9	0	0	0
		22	6,6	0	0	0
		23	6,3	0	0	0
		24	6,0	0	0	0

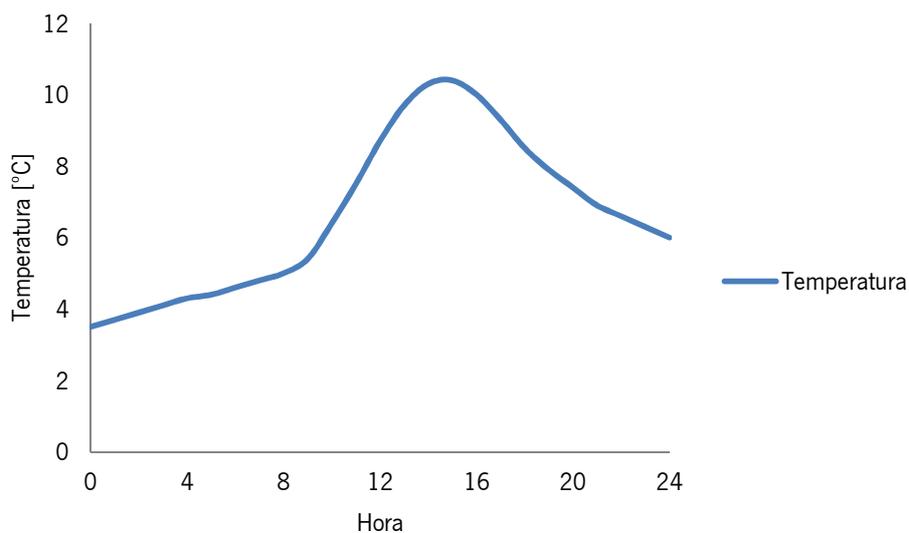


Figura 4.19 – Variação da temperatura ao longo do dia 26 de janeiro.

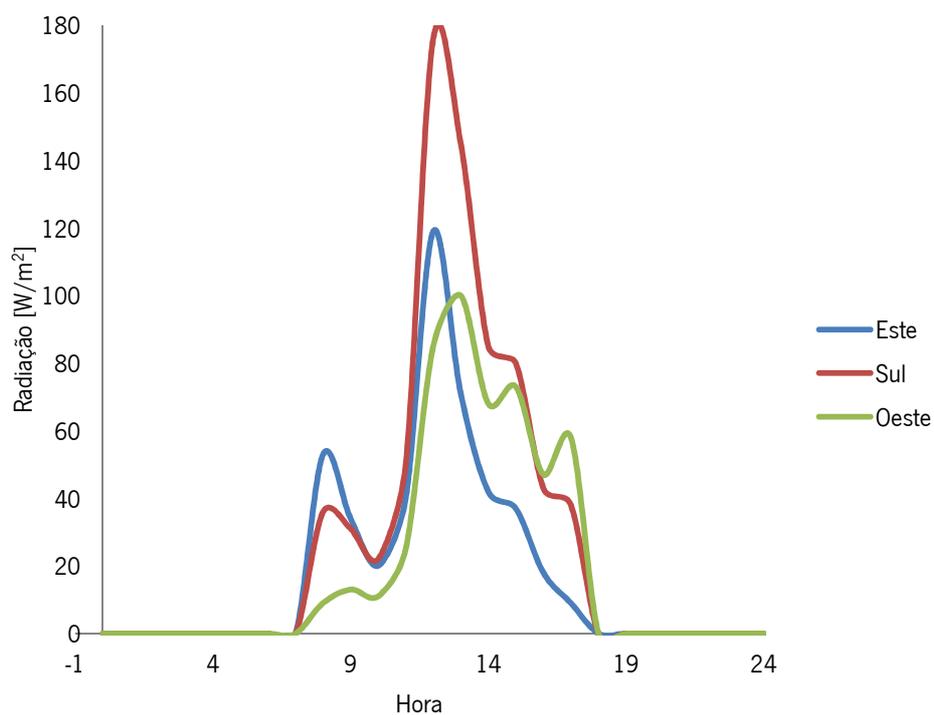


Figura 4.20 – Variação da radiação solar ao longo do dia 26 de janeiro.

Tabela 4.10 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 18 de fevereiro

Mês	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Radiação solar – global vertical [W/m²]		
				E	S	W
fevereiro	18	1	8,0	0	0	0
		2	7,1	0	0	0
		3	6,2	0	0	0
		4	5,2	0	0	0
		5	4,3	0	0	0
		6	3,3	0	0	0
		7	3,4	1	1	1
		8	4,0	438	225	39
		9	5,3	630	468	70
		10	7,4	589	648	91
		11	9,8	440	775	104
		12	12,3	229	841	109
		13	14,1	109	841	229
		14	15,4	104	775	440
		15	15,7	91	648	589
		16	15,1	70	468	630
		17	13,7	39	225	438
		18	11,8	1	1	1
		19	10,3	0	0	0
		20	9,1	0	0	0
		21	8,0	0	0	0
		22	7,2	0	0	0
		23	6,5	0	0	0
		24	5,9	0	0	0

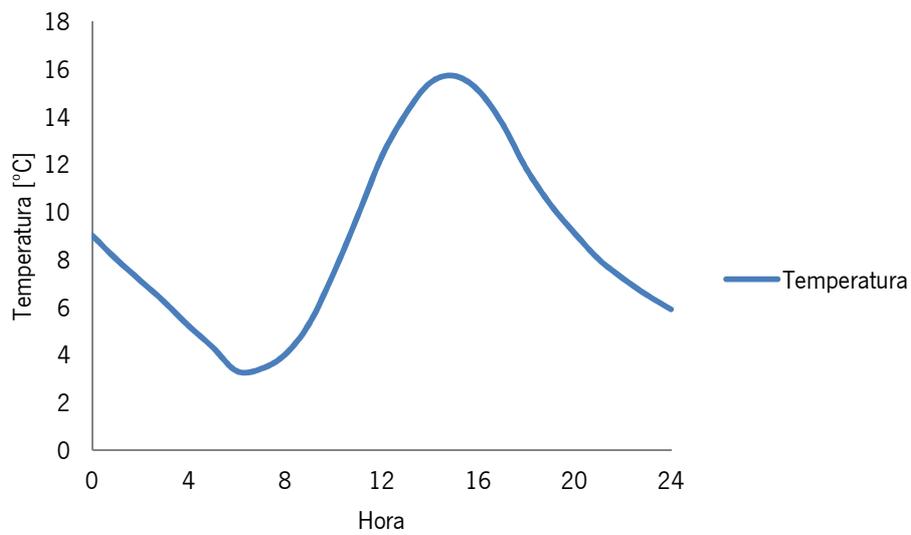


Figura 4.21 – Variação da temperatura ao longo do dia 18 de fevereiro.

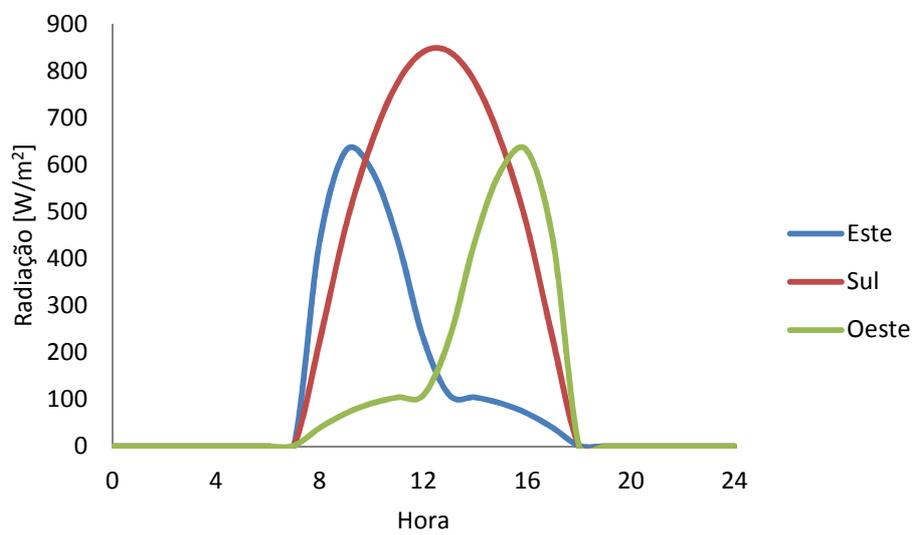


Figura 4.22 – Variação da radiação solar ao longo do dia 18 de fevereiro.

Tabela 4.11 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 31 de julho

Mês	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Radiação solar – global vertical [W/m <sup>2</sup> ]		
				E	S	W
julho	31	1	18,6	0	0	0
		2	18,3	0	0	0
		3	18,0	0	0	0
		4	17,7	0	0	0
		5	17,7	0	0	0
		6	18,1	45	40	40
		7	19,1	552	86	86
		8	20,8	743	139	116
		9	22,8	770	262	132
		10	25,0	674	381	139
		11	27,3	490	471	139
		12	29,2	256	520	138
		13	30,5	138	520	256
		14	31,5	139	471	490
		15	31,8	139	381	674
		16	31,4	132	262	770
		17	30,3	116	139	743
		18	28,6	86	86	552
		19	26,5	40	40	45
		20	24,5	0	0	0
		21	23,0	0	0	0
		22	21,8	0	0	0
		23	20,8	0	0	0
		24	20,1	0	0	0

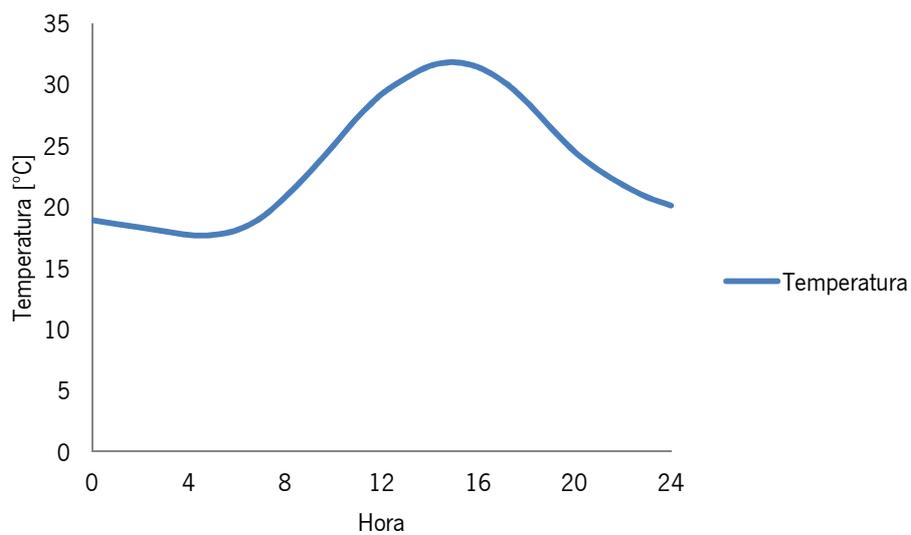


Figura 4.23 – Variação da temperatura ao longo do dia 31 de julho.

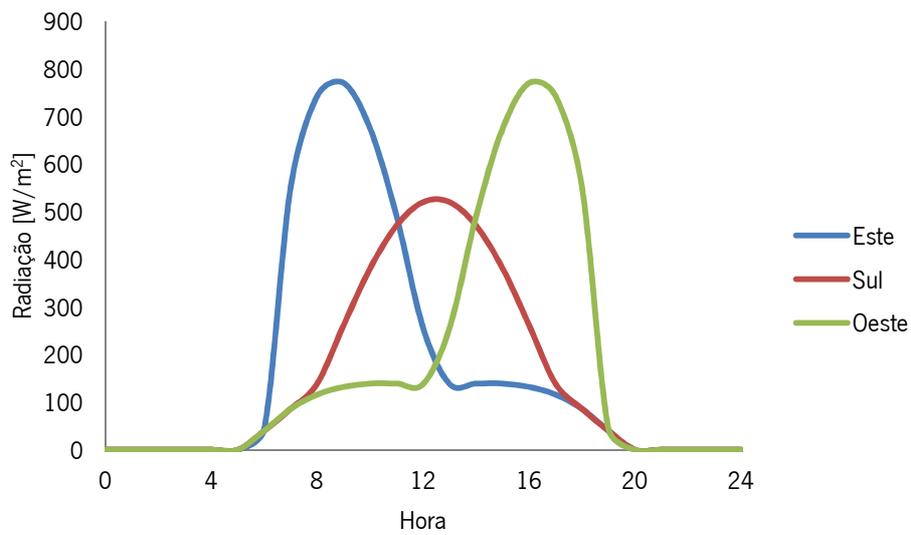


Figura 4.24 – Variação da radiação solar ao longo do dia 31 de julho.

Tabela 4.12 – Dados de temperatura e radiação solar para o dia 10 de agosto

Mês	Dia	Hora	Temperatura [°C]	Radiação solar – global vertical [W/m²]		
				E	S	W
agosto	10	1	17,4	0	0	0
		2	16,9	0	0	0
		3	16,4	0	0	0
		4	16,0	0	0	0
		5	15,5	0	0	0
		6	15,6	37	7	7
		7	16,2	55	21	21
		8	17,3	74	47	37
		9	18,7	82	66	47
		10	20,3	136	124	85
		11	21,9	123	123	84
		12	23,4	75	82	56
		13	24,5	51	74	68
		14	25,2	37	54	54
		15	25,3	2	3	4
		16	24,9	14	19	24
		17	24,1	20	26	40
		18	22,9	11	11	27
		19	21,4	3	3	14
		20	20,1	0	0	0
		21	19,1	0	0	0
		22	18,3	0	0	0
		23	17,7	0	0	0
		24	17,2	0	0	0

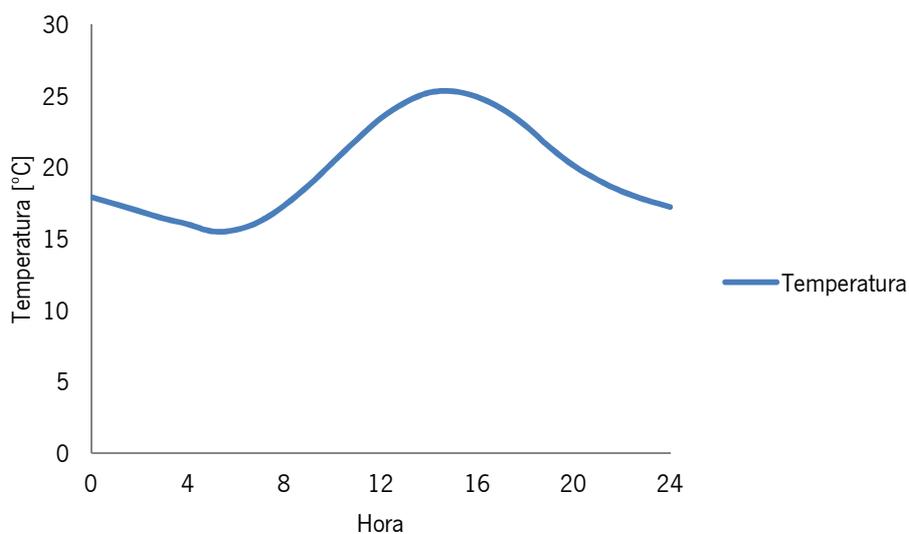


Figura 4.25 – Variação da temperatura ao longo do dia 10 de agosto.

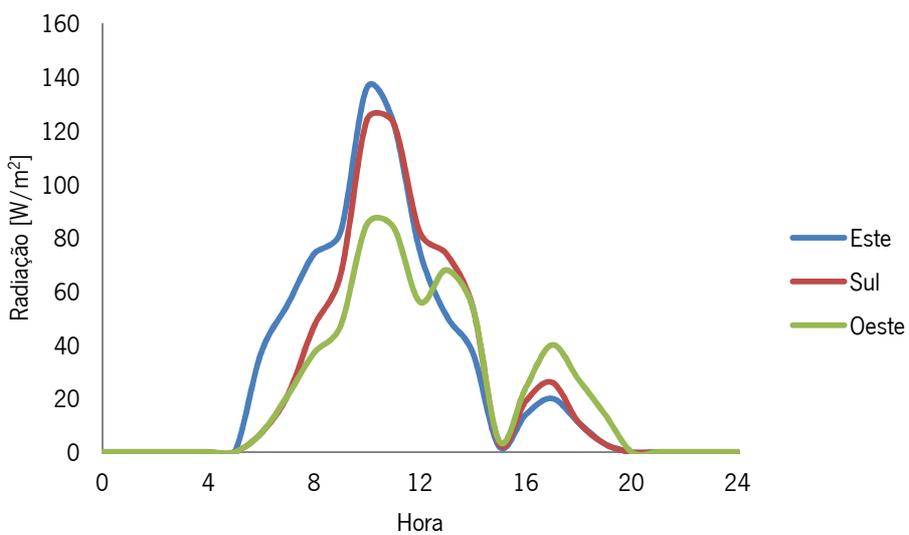


Figura 4.26 – Variação da radiação solar ao longo do dia 10 de agosto.

Com o objetivo de comparar o comportamento térmico de uma parede em diferentes dias e orientações, foram efetuadas as seguintes simulações:

- Uma parede em dois dias com nebulosidades diferentes no inverno;
- Uma parede num dia de inverno e num dia de verão;
- Uma parede nas três orientações consideradas num mesmo dia;

- Influência da cor da parede;
- Influência da localização isolante.

A parede considerada para a simulação tem as características apresentadas na tabela 4.13. Esta parede apenas serve de exemplo representativo para as simulações efetuadas. Para analisar o comportamento da parede em diferentes situações, na simulação, os dados de temperatura e radiação solar são repetidos por 5 vezes, ou seja, admite-se que um dia é repetido 5 vezes, de forma a verificar a estabilidade da parede. Os dias considerados nestas comparações são os dias 26 de janeiro, 18 de fevereiro e 31 de julho. Para as simulações efetuadas o  $\Delta x$  é de 0,01 m, o intervalo de tempo de 60 s, a emissividade é 0,9 e a cor da parede é branca, com um coeficiente de absorção de 0,4.

Tabela 4.13 – Constituição da parede

Material	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor Específico [J/kg.K]	Espessura [m]
Reboco	1,3	1800	1046	0.02
Tijolo	0,41	1000	920	0.15
Estuque	0,25	750	1250	0.02

### **Uma parede em dois dias com nebulosidade diferente no inverno:**

Com esta simulação pretende-se avaliar o comportamento de uma parede em dois dias com nebulosidade diferente, de modo a avaliar o efeito da radiação solar na parede. Os dias escolhidos são o dia 18 de fevereiro e o dia 26 de janeiro, ambos dias de inverno (figuras 4.27 a 4.34).

Na figura 4.27 e figura 4.31 observa-se de que forma a temperatura nas faces exterior e interior da parede variam ao longo do dia; na figura 4.29 e figura 4.33 observa-se a variação do fluxo ao longo do dia. Assim, optou-se por mostrar apenas a variação em dois dias consecutivos para se determinar o fluxo médio, que é mais elevado no dia 18 de fevereiro. O sinal negativo no valor do fluxo significa que o ambiente interior está a perder calor para o ambiente exterior.

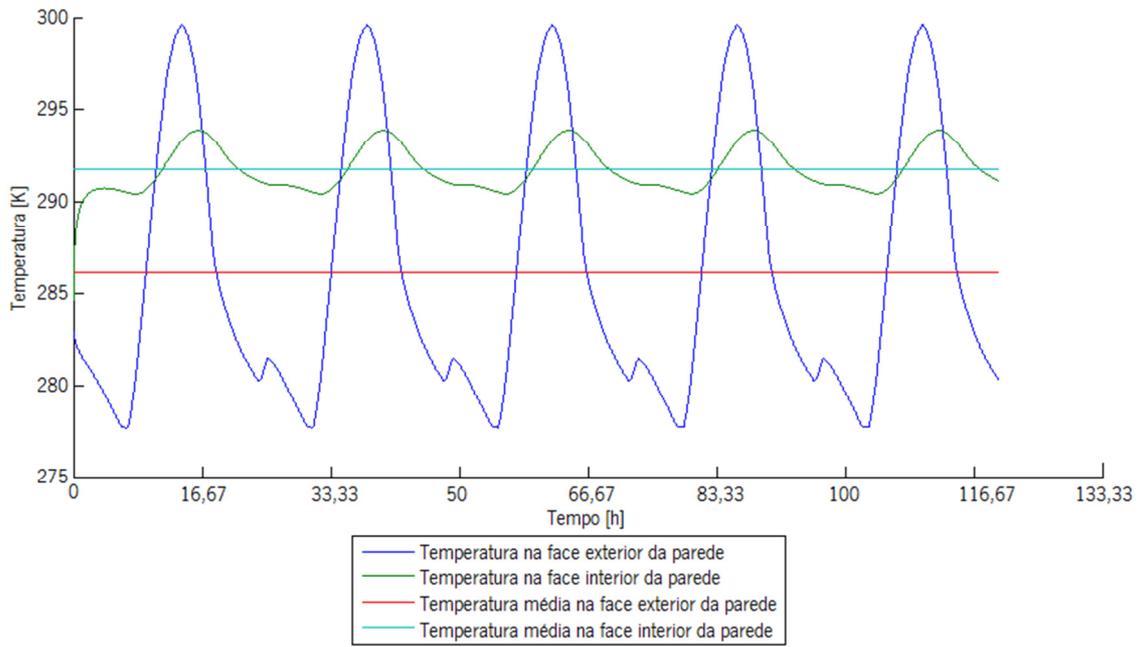


Figura 4.27 – Variação da temperatura nas faces ao longo do tempo (18 de fevereiro).

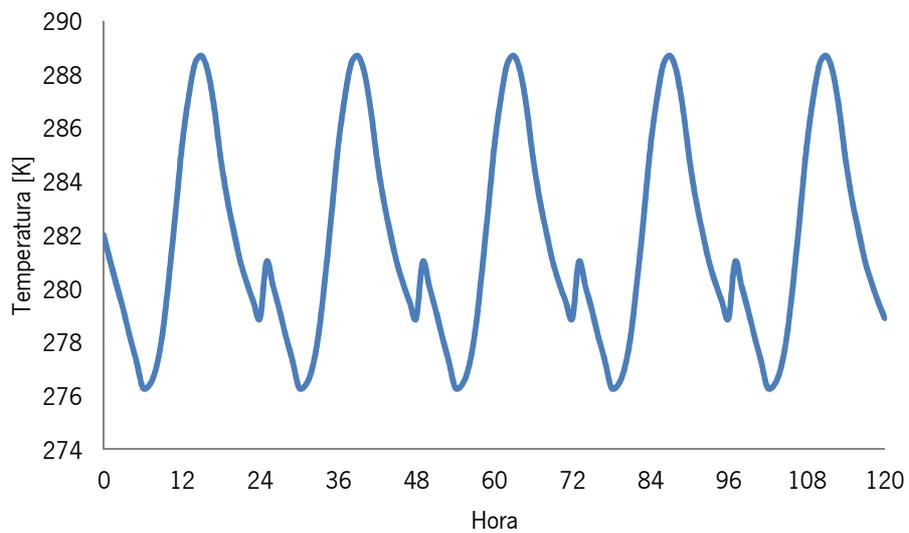


Figura 4.28 – Variação da temperatura exterior ao longo do tempo (18 de fevereiro).

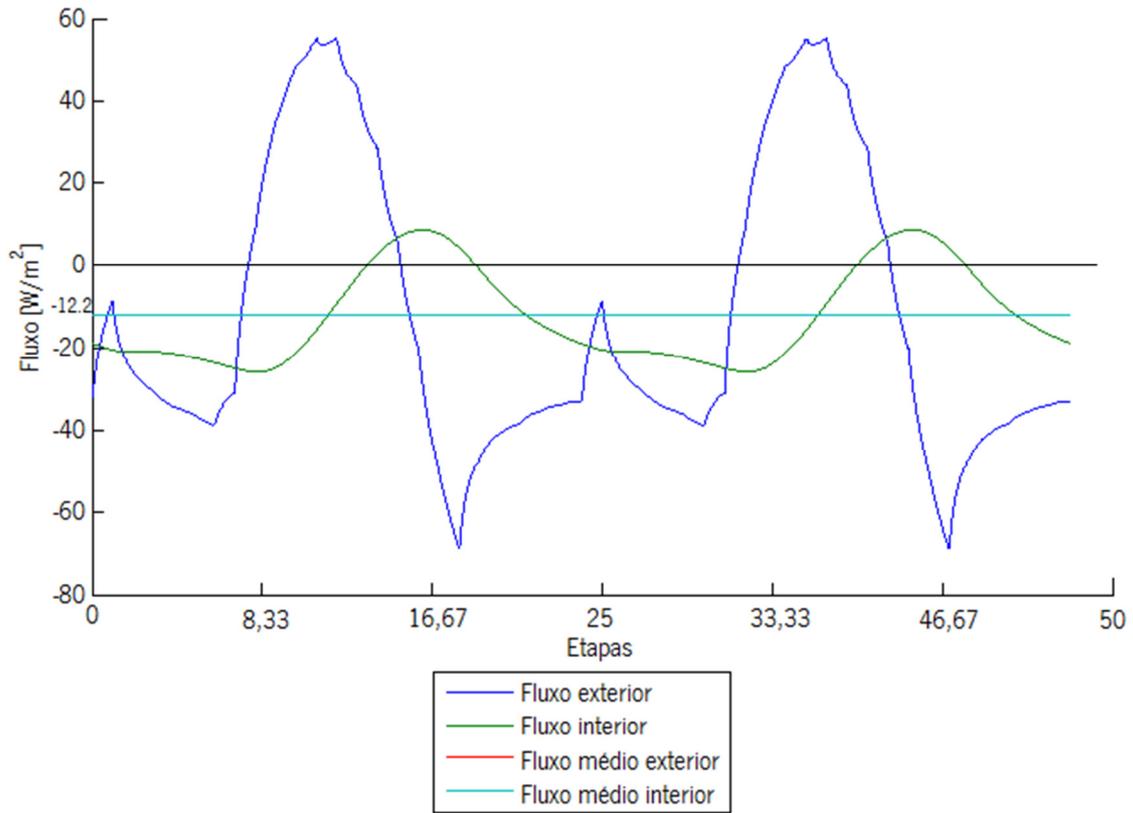


Figura 4.29 – Variação do fluxo (18 de Fevereiro)

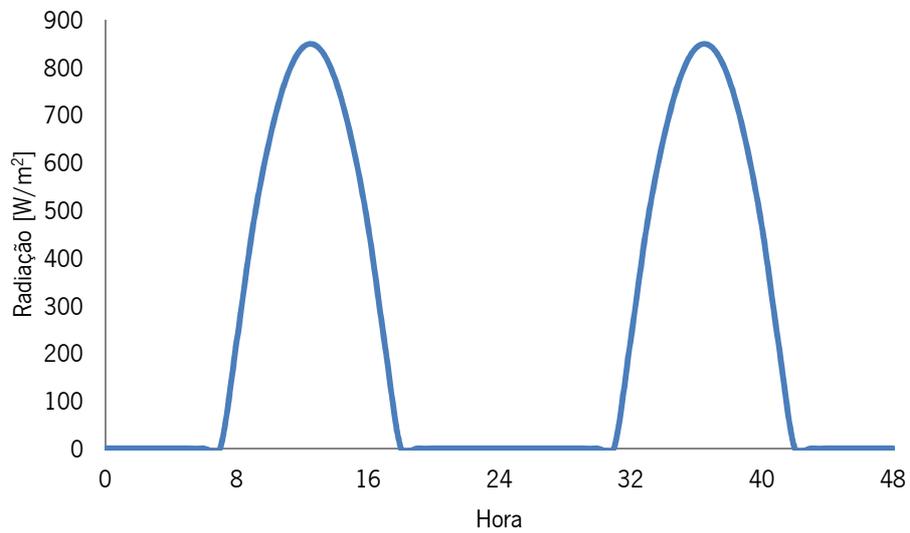


Figura 4.30 – Variação de radiação solar (18 de fevereiro).

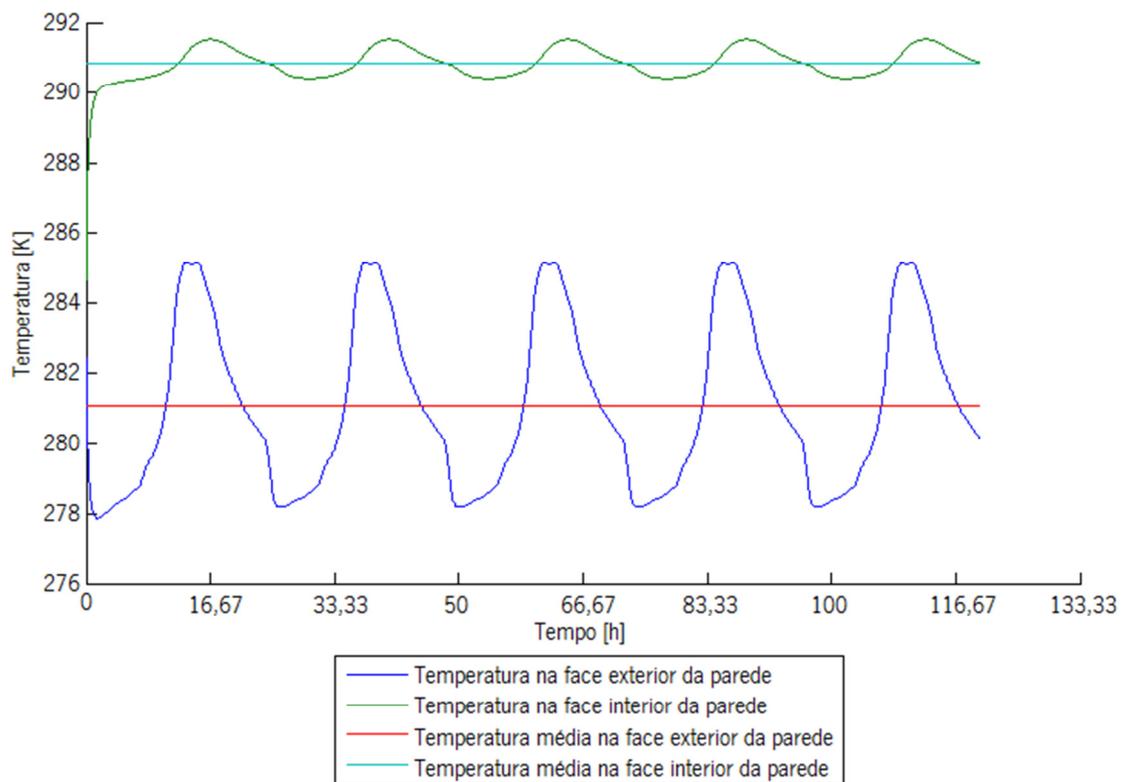


Figura 4.31 – Variação da temperatura nas faces ao longo do tempo (26 de janeiro).

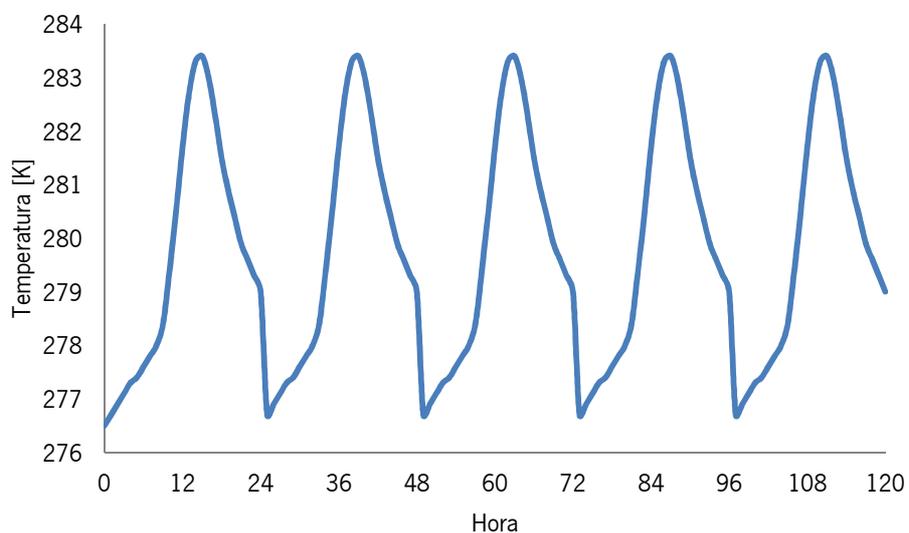


Figura 4.32 – Variação da temperatura exterior ao longo do tempo (26 de janeiro).

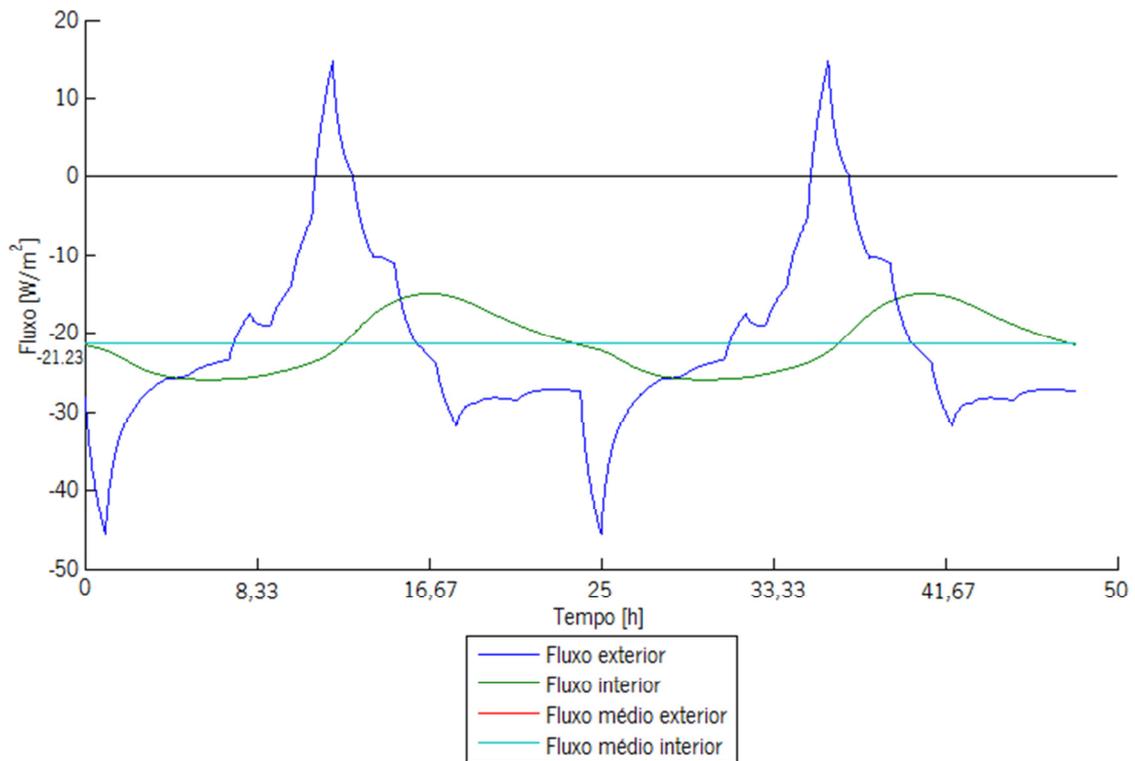


Figura 4.33 – Variação do fluxo (26 de janeiro).

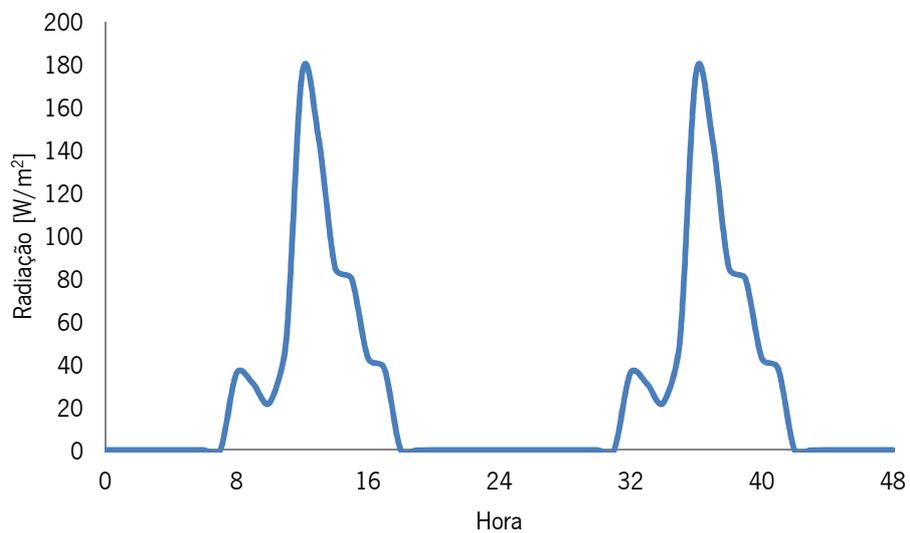


Figura 4.34 – Variação da radiação solar (26 de janeiro).

Na tabela 4.14 está descrito o parâmetro desfasamento, que significa a diferença de tempo onde se verifica o valor máximo de fluxo de calor no interior e exterior.

Tabela 4.14 – Resultados obtidos para os dias 18 de fevereiro e 26 de janeiro

	Fluxo médio [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura média interior [K]	Temperatura média exterior [K]	Desfasamento [h]
18 de fevereiro	-12,2	291,8	286,2	4,22
26 de janeiro	-21,23	290,9	281,1	4,67

De notar que de 24 em 24 h, tanto nas temperaturas como no fluxo, não se verifica uma certa continuidade no gráfico, ou seja, a variação das temperaturas e do fluxo deveria ser sinusoidal, isto deve-se a que ao se considerar que as condições verificadas para um dia e repeti-las durante 5 dias.

**Uma parede num dia de inverno e num dia de verão:**

Com esta simulação pretende-se comparar o comportamento da parede em dois dias de estações diferentes, neste caso, considerou-se o dia 18 de fevereiro para o dia de inverno o dia 31 de julho para o dia de verão. As figuras 4.35 e 4.37 mostram a variação da temperatura nas faces da parede e do fluxo para o dia 31 de julho, e as figuras 3.36 e 3.38 representam a variação da temperatura exterior e da radiação solar na orientação Sul.

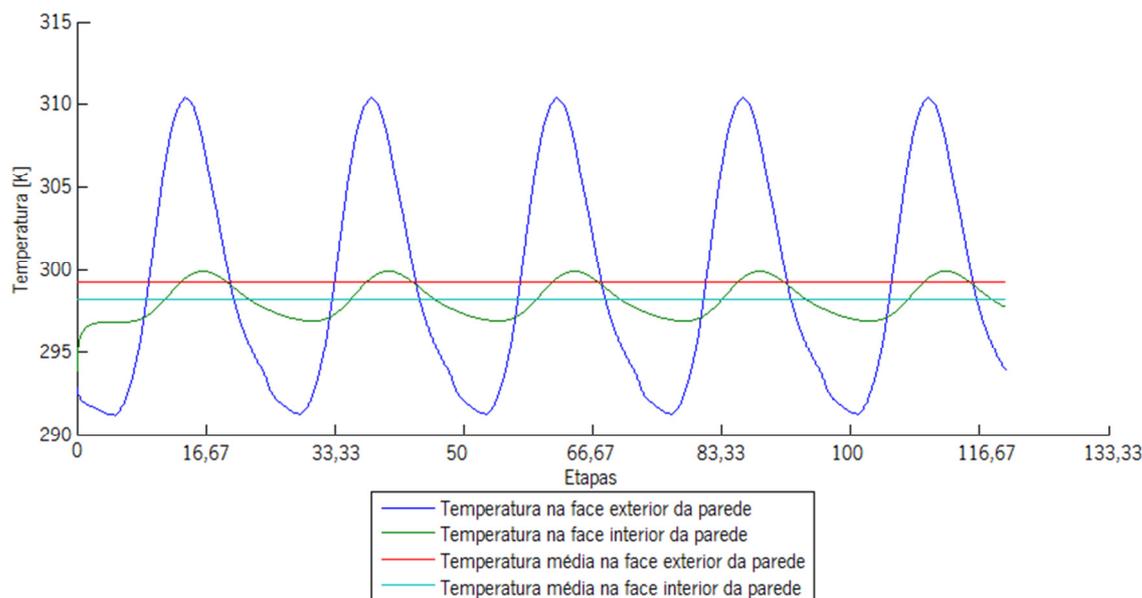


Figura 4.35 – Variação da temperatura ao longo do tempo (31 de julho).

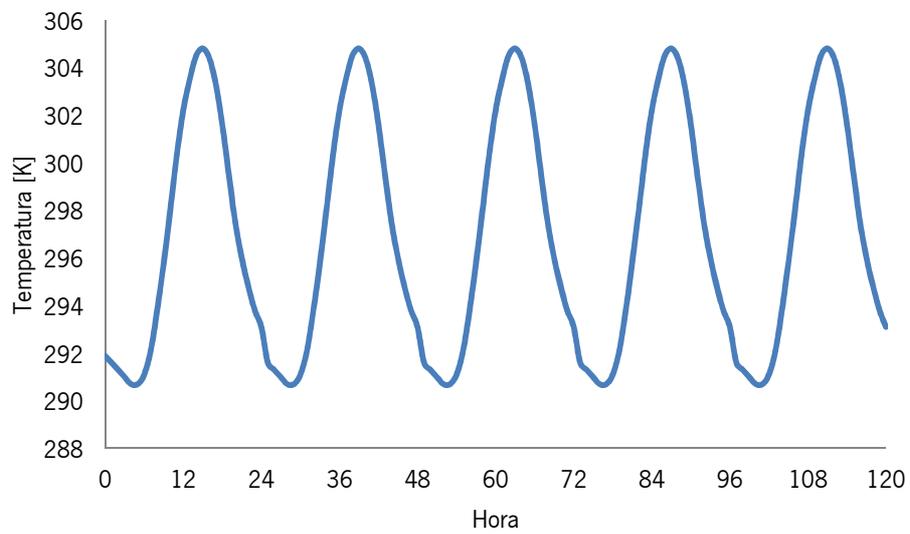


Figura 4.36 – Variação da temperatura exterior ao longo do tempo (31 de julho).

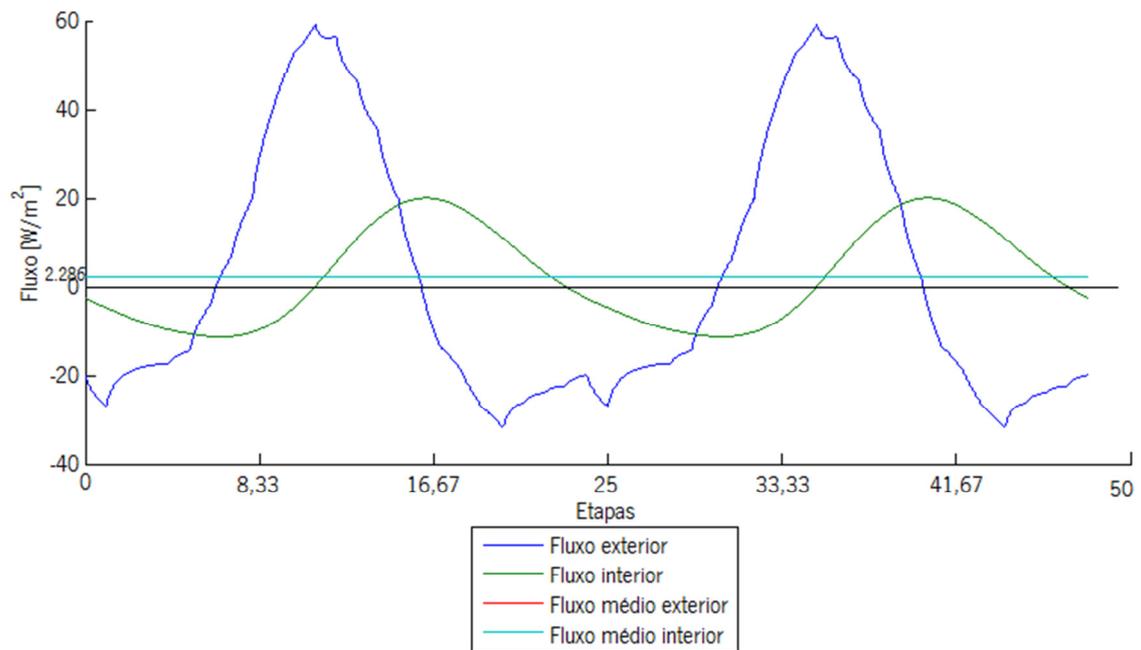


Figura 4.37 – Variação do fluxo (31 de julho).

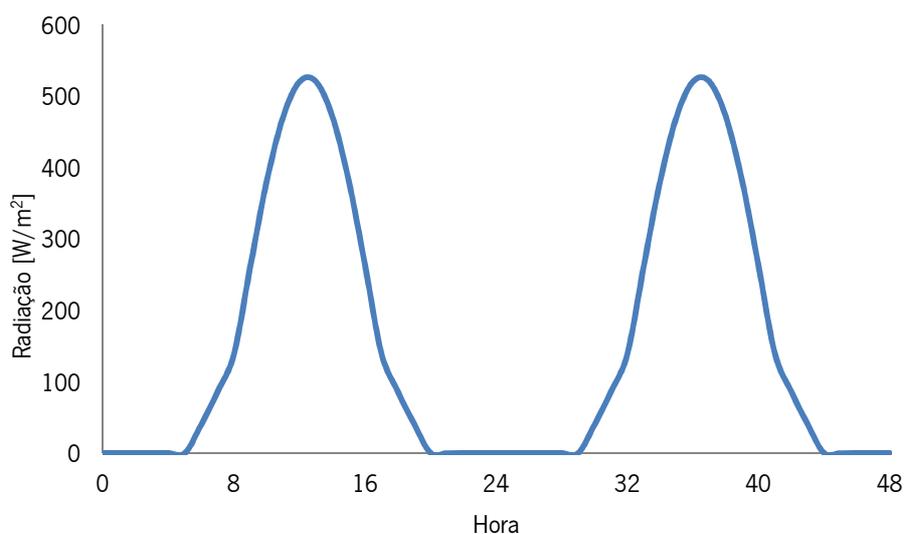


Figura 4.38 – Variação da radiação solar ao longo do tempo (dia 31 de julho).

Tabela 4.15 – Resultados obtidos para o dia 18 de fevereiro e 31 de julho

	Fluxo médio [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura média interior [K]	Temperatura média exterior [K]	Desfasamento [h]
18 de fevereiro	-12,2	291,8	286,2	4,22
31 de julho	2,286	298,2	299,3	5,33

Como seria espectável, o fluxo médio no dia 31 de julho é maior do que no dia 18 de fevereiro, isto porque as temperaturas do ambiente exterior são mais elevadas no dia 31 de julho, assim, considera-se que no dia 31 de julho o ambiente interior está a ganhar calor. Tal como no caso acima, neste também existe um desfasamento em relação à hora em que se verifica o valor máximo de fluxo de calor.

**Uma parede nas três orientações consideradas no mesmo dia:**

Para este caso foi considerado o dia 18 de fevereiro, e pretende-se avaliar de que forma a orientação da parede influencia o fluxo de calor. As figuras 4.39 a 4.44 representam a variação temperatura nas faces da parede, o fluxo de calor e a radiação solar nas orientações Este e Oeste. Nas figuras 4.40 e 4.43 observa-se um desfasamento em relação à hora em que se verifica o máximo de fluxo de calor. Isto deve-se ao facto de na parte da manhã a radiação solar ser mais intensa a Este e na parte da tarde ser mais intensa a Oeste.

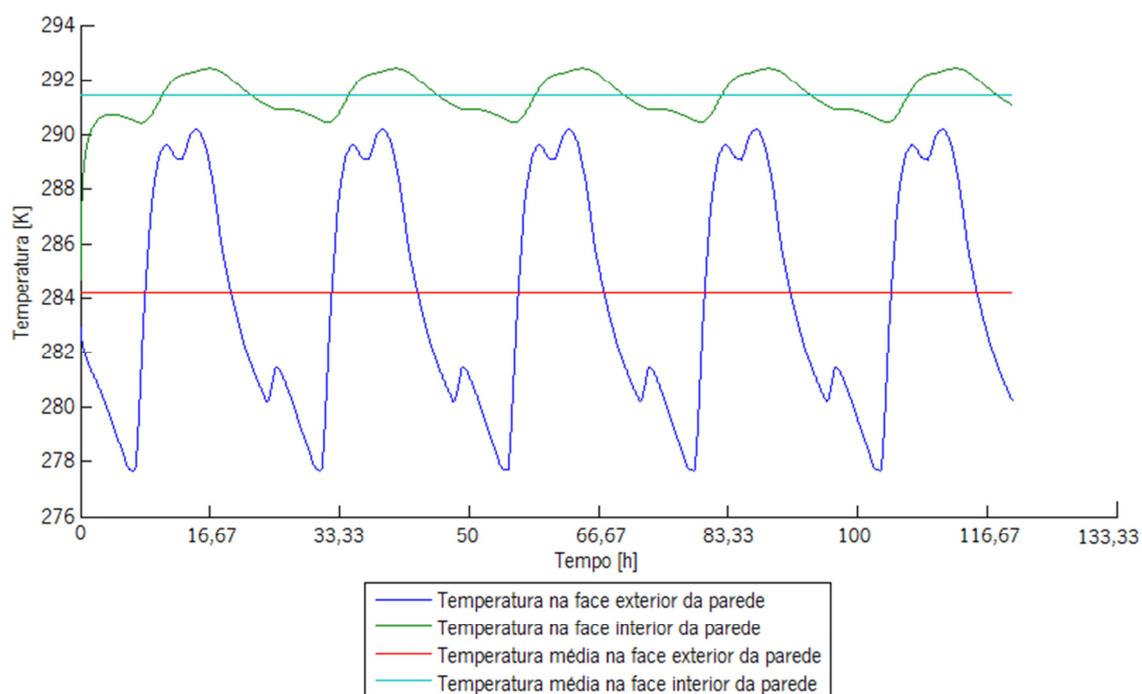


Figura 4.39 – Variação da temperatura nas faces da parede a Este.

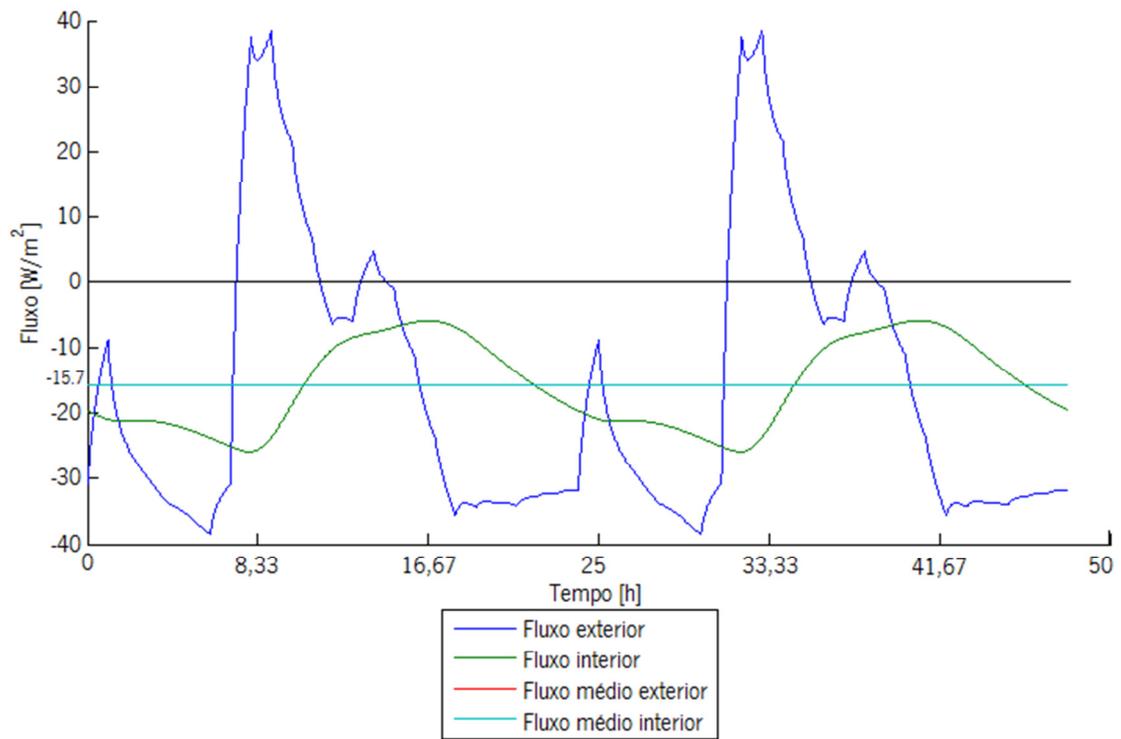


Figura 4.40 – Variação do fluxo a Este.

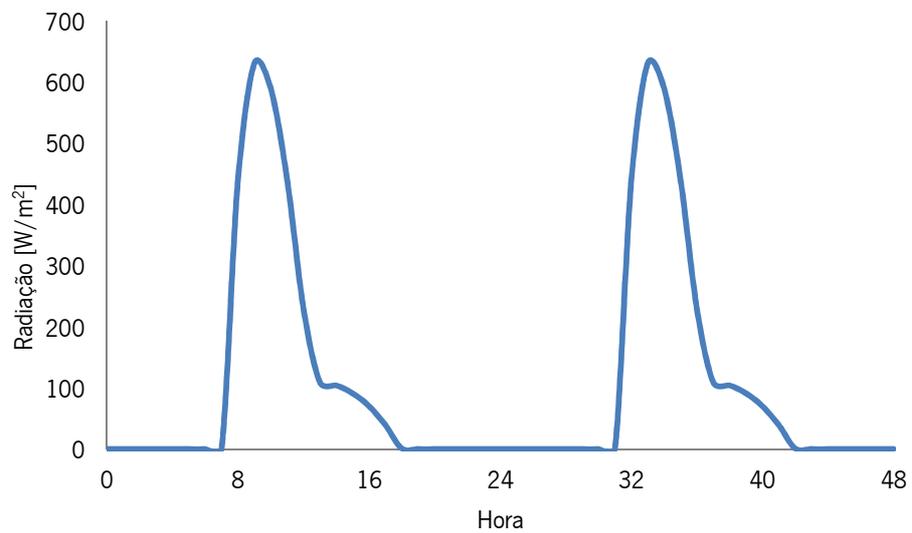


Figura 4.41 – Variação da radiação solar a Este.

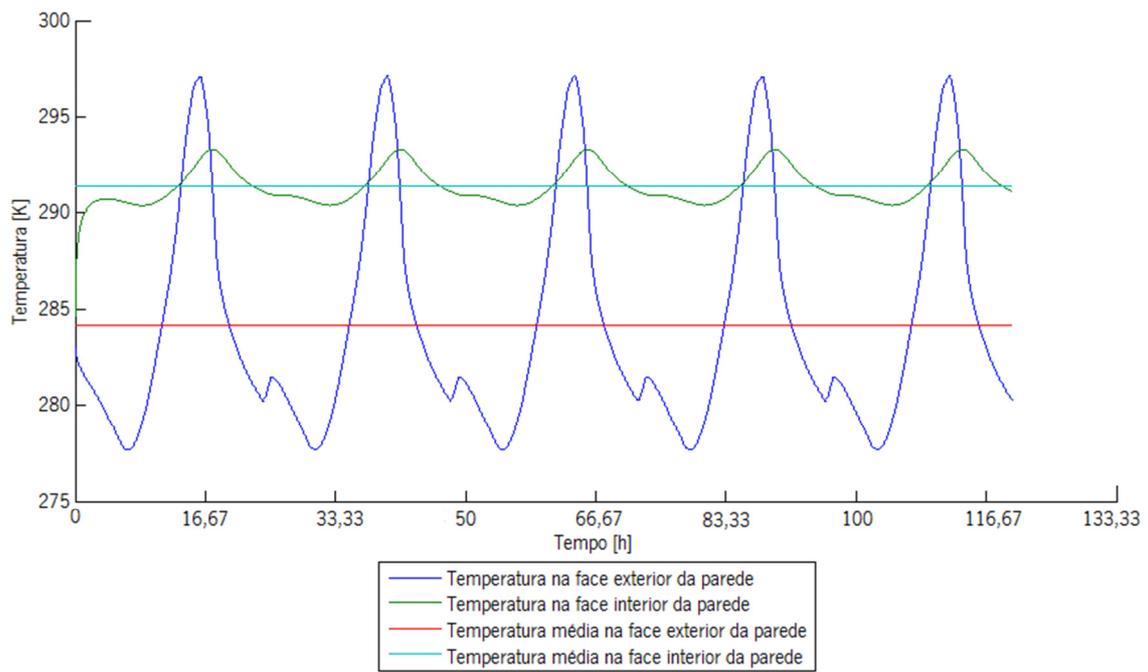


Figura 4.42 – Variação da temperatura nas faces da parede a Oeste.

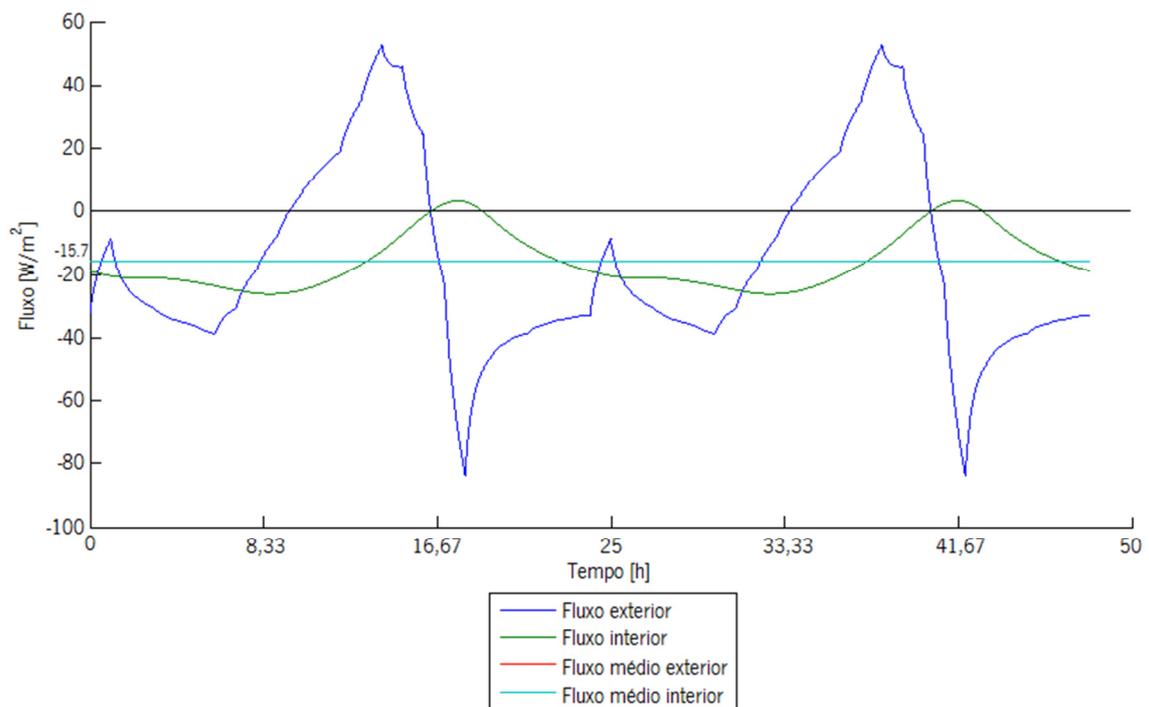


Figura 4.43 – Variação do fluxo a Oeste.

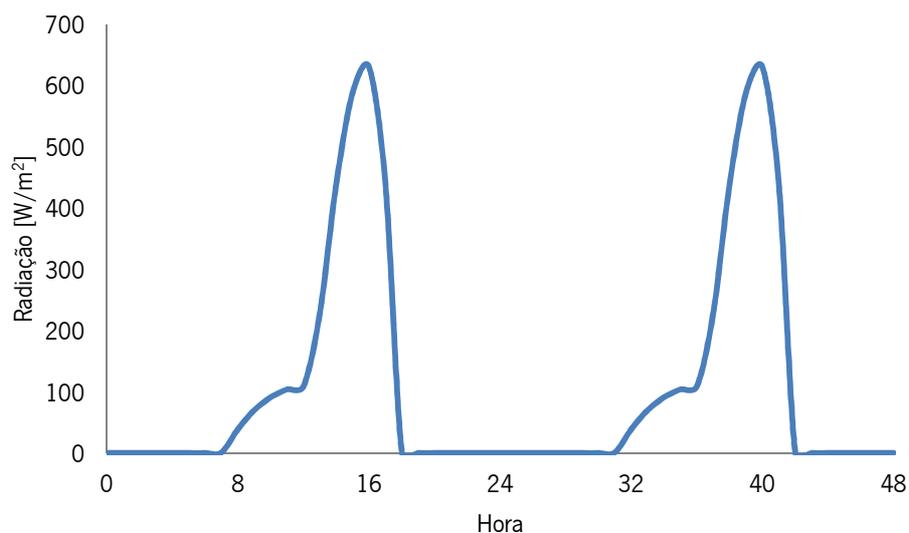


Figura 4.44 – Variação da radiação solar a Oeste.

A tabela 4.16 é referente aos resultados obtidos na simulação da parede no dia 18 de fevereiro nas três orientações consideradas.

Tabela 4.16 – Resultados obtidos para as orientações consideradas

Orientação	Fluxo médio [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura média interior [K]	Temperatura média exterior [K]	Desfasamento [h]
Este	-15,7	291,4	284,2	7,67
Sul	-12,2	291,8	286,2	4,22
Oeste	-15,7	291,4	284,2	3,78

Como se pode observar, o fluxo que atravessa a parede é maior se a parede estiver orientada a Sul, isto porque, os valores de radiação solar para o dia 18 de fevereiro são mais elevados do que nas orientações Este e Oeste.

**Influência da cor da parede:**

Nesta situação irá analisar-se a influência da cor da parede. Para isso foi considerada uma parede de cor branca e uma parede de cor escura. A simulação foi efetuada para o dia 31 de julho. As figuras 4.45 e 4.46 representam a variação da temperatura nas faces da parede e do fluxo.

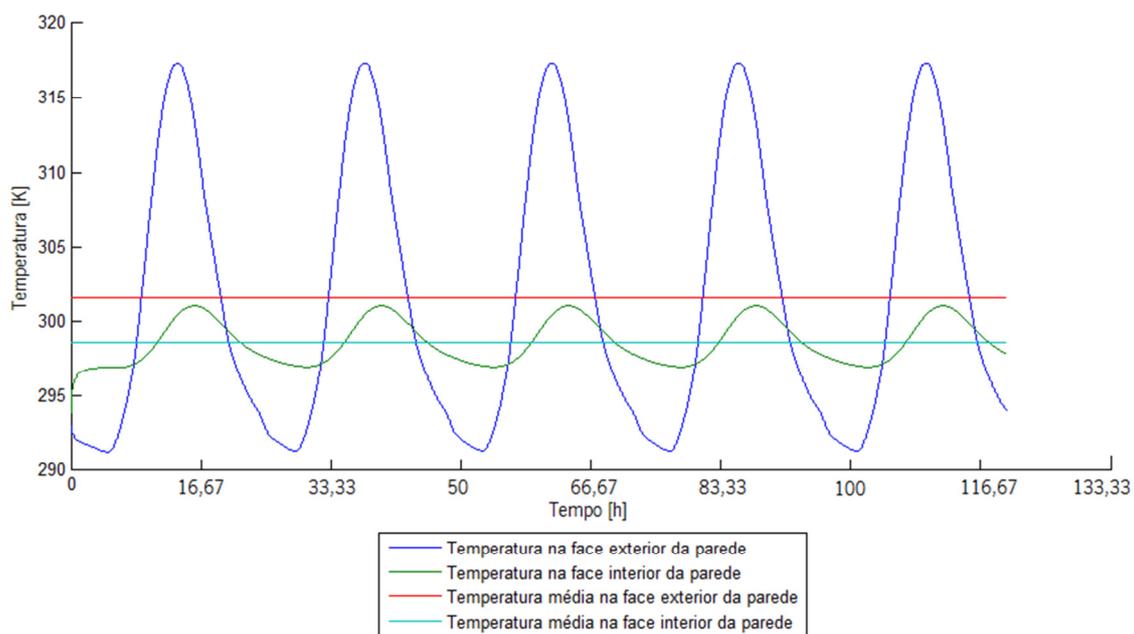


Figura 4.45 – Variação da temperatura na parede escura.

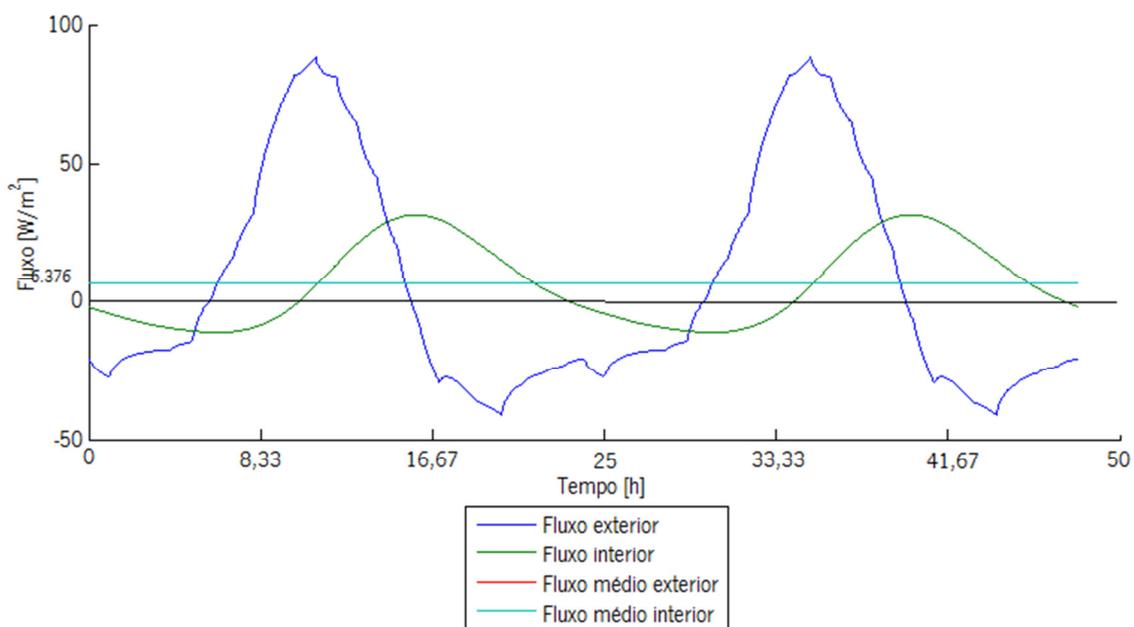


Figura 4.46 – Variação do fluxo na parede escura.

Analisando a tabela 4.17, verifica-se que a parede de cor escura é a que apresenta um maior fluxo de calor, devendo-se a que o coeficiente de absorção da parede escura é superior, logo, absorverá mais radiação solar.

Tabela 4.17 – Resultados obtidos para uma parede escura e clara

Cor	Fluxo médio [W/m²]	Temperatura média interior [K]	Temperatura média exterior [K]	Desfasamento [h]
Escura	6,376	298,6	301,5	5
Clara	2,286	298,2	299,3	5,33

### Influência do isolante:

A inclusão do isolante numa parede tem grande importância, uma vez que, este permite que o fluxo de calor que atravessa a parede seja menor. Para tal, neste caso, realizou-se uma avaliação da posição do isolante na parede, de modo a verificar se é mais benéfico o isolante ficar do lado exterior, ou do lado interior. As paredes consideradas para esta comparação são apresentadas na tabela 4.18:

Tabela 4.18 – Constituição das paredes

	Material	Espessura [m]	Coefficiente de absorção	Emissividade
Parede_1	Reboco	0,02	0,4	0,9
	Betão	0,15		
	Isolante	0,03		
	Estuque	0,02		
Parede_2	Reboco	0,02	0,4	0,9
	Isolante	0,03		
	Betão	0,15		
	Estuque	0,02		

Na figura 4.47 estão representadas as distribuições dos materiais nas duas paredes.

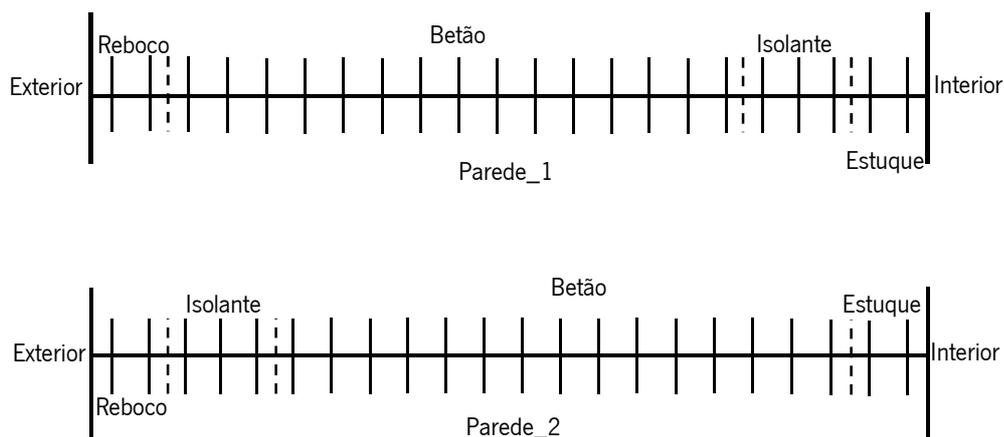


Figura 4.47 – Esquema da parede\_1 e parede\_2.

Os dias selecionados para esta comparação foram os dias 18 de fevereiro e o dia 31 de julho, pois são de diferentes estações, e a nebulosidade era baixa, o que permite uma maior intensidade da radiação solar. Esta simulação não foi efetuada ao longo do dia, pois o objetivo era verificar a influência da posição do isolante, para tal, dos dias referidos acima foram selecionadas as condições apresentadas na tabela 4.19:

Tabela 4.19 – Condições para a simulação

Mês	Dia	Hora	Temperatura exterior [°C]	Radiação solar – S [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura interior [°C]	Temperatura inicial da parede [°C]
fevereiro	18	15	15,7	648	20	10
julho	31	15	31,8	381	25	20

Através da análise das tabelas 4.20 e 4.21 verifica-se que para uma mesma parede em dias diferentes ela atinge o estado de equilíbrio praticamente ao mesmo tempo, no entanto, a posição do isolante influencia o tempo que a parede demora a estabilizar.

Tabela 4.20 – Resultados obtidos para parede\_1

Pontos	Espessura [m]	31 de Julho			18 de Fevereiro		
		Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [h]	Temperatura [K]	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [h]	Temperatura [K]
	1			310,2742			298,8009
	2			310,2342			298,7820
	3			310,1540			298,7442
	4			310,1140			298,7254
	5			310,0527			298,6964
	6			309,9302			298,6386
	7			309,8076			298,5809
	8			309,6851			298,5231
	9			309,5626			298,4653
	10			309,4400			298,4075
	11			309,3175			298,3497
	12			309,1950			298,2919
	13			309,0725			298,2342
Parede_1	14	10,4146	34,97	308,9499	4,9110	35,08	298,1764
	15			308,8274			298,1186
	16			308,7049			298,0608
	17			308,5823			298,0030
	18			308,4598			297,9453
	19			308,3373			297,8875
	20			308,2762			297,8587
	21			306,8687			297,1950
	22			304,0539			295,8677
	23			301,2392			294,5405
	24			299,8319			293,8769
	25			299,6235			293,7786
	26			299,2070			293,5822
	27			298,9987			293,4840

Tabela 4.21 – Resultados obtidos para parede\_2

Pontos	Espessura [m]	31 de Julho			2 de Fevereiro		
		Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [s]	Temperatura [K]	Fluxo [W/m <sup>2</sup> ]	Tempo [s]	Temperatura [K]
1	0			310,2743			298,8009
2	0,005			310,2342			298,7820
3	0,015			310,1541			298,7442
4	0,02			310,1140			298,7254
5	0,025			308,7066			298,0617
6	0,035			305,8918			296,7343
7	0,045			303,0769			295,4070
8	0,050			301,6697			294,7435
9	0,055			301,6082			294,7144
10	0,065			301,4857			294,6566
11	0,075			301,3632			294,5988
12	0,085			301,2407			294,5411
13	0,095			301,1181			294,4833
Parede_2	0,105	10,4146	54,63	300,9956	4,9110	57,1	294,4255
	0,115			300,8731			294,3677
	0,125			300,7506			294,3100
	0,135			300,6280			294,2522
	0,145			300,5055			294,1944
	0,155			300,3830			294,1367
	0,165			300,2605			294,0789
	0,175			300,1380			294,0211
	0,185			300,0155			293,9634
	0,195			299,8929			293,9056
	0,2			299,8319			293,8769
	0,205			299,6234			293,7785
	0,215			299,2069			293,5821
	0,22			298,9986			293,4839

Como já referido, a posição do isolante influencia o tempo que a parede demora a atingir o estado de equilíbrio, como se pode verificar pelas figuras 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51. Observa-se que na parede\_2 (a parede em que o isolante está no exterior) o tempo é consideravelmente maior do que na parede\_1. Na figura 4.52 observa-se a variação das temperaturas no estado de equilíbrio, em ambas as paredes para os dois dias, e verifica-se que independentemente da posição do material isolante, as temperaturas finais serão idênticas.

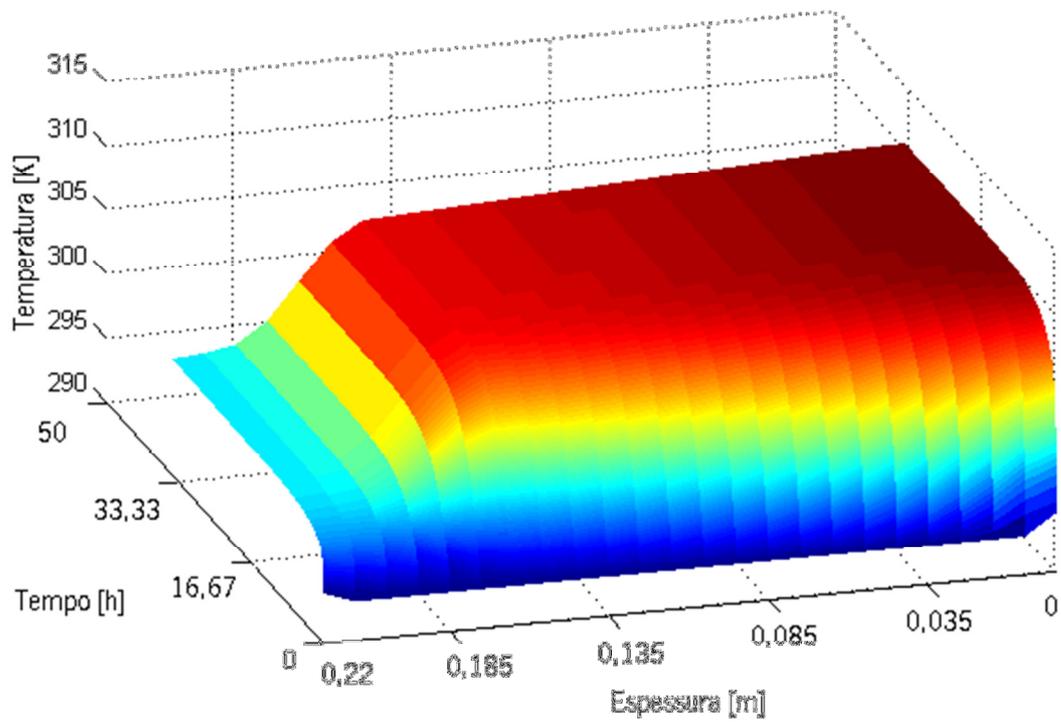


Figura 4.48 – Variação da temperatura na parede\_1 (31 de julho).

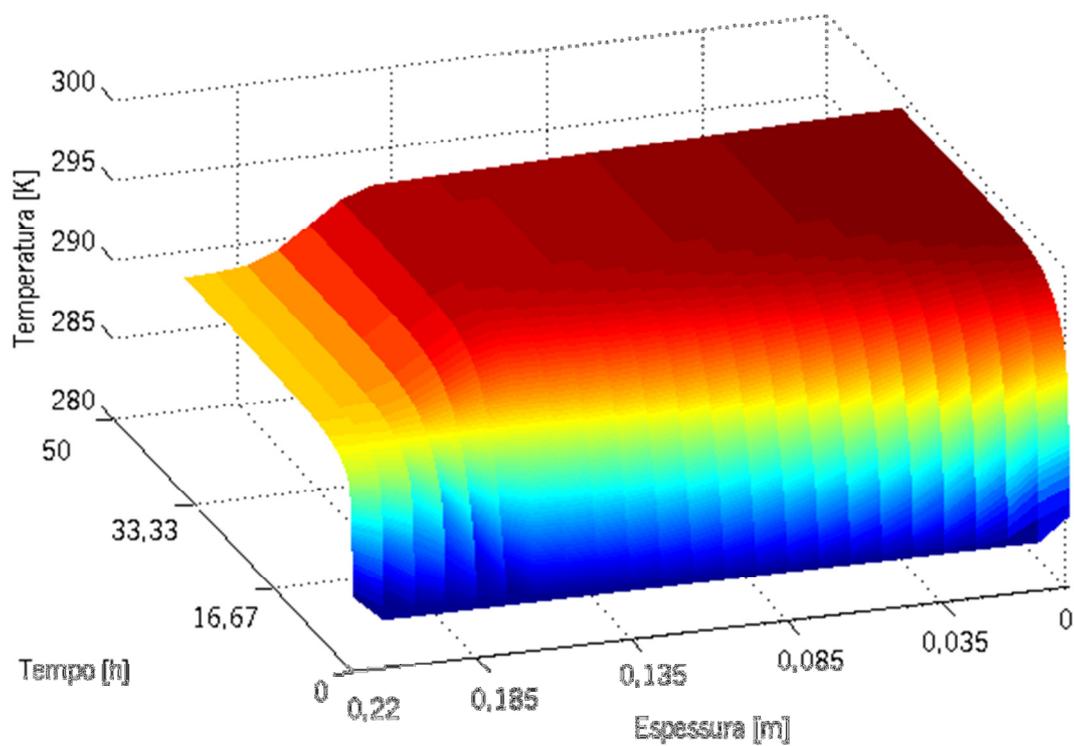


Figura 4.49 – Variação da temperatura na parede\_1 (18 de fevereiro).

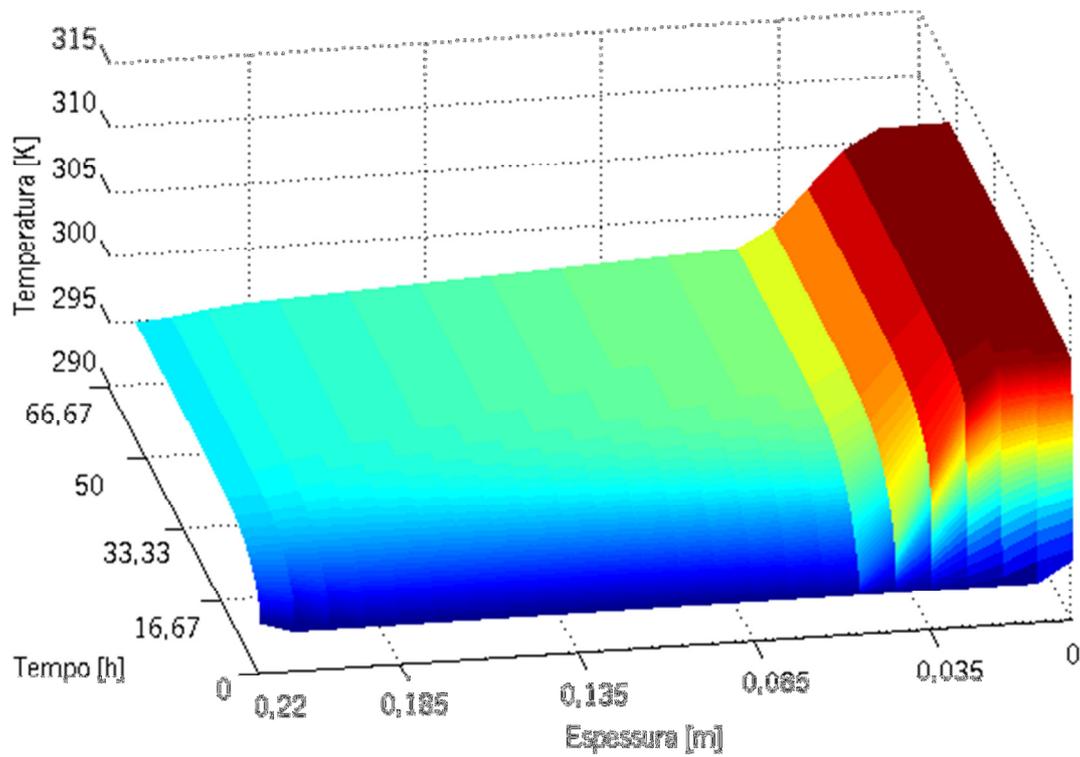


Figura 4.50 – Variação da temperatura na parede\_2 (31 de julho).

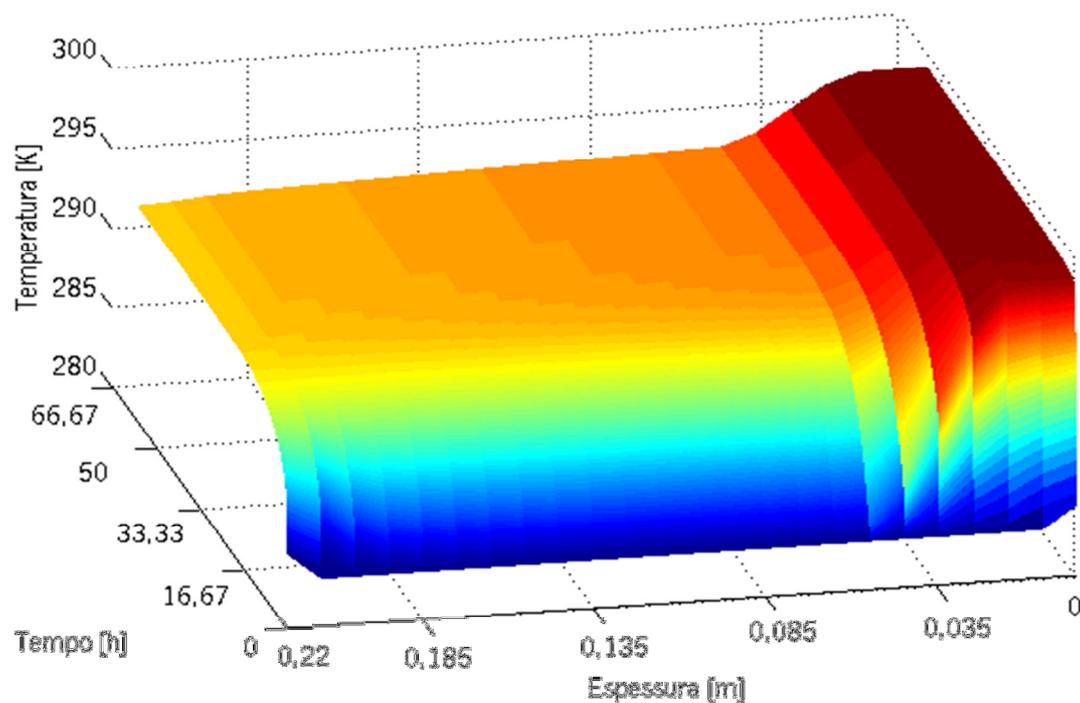


Figura 4.51 – Variação da temperatura na parede\_2 (18 de fevereiro)

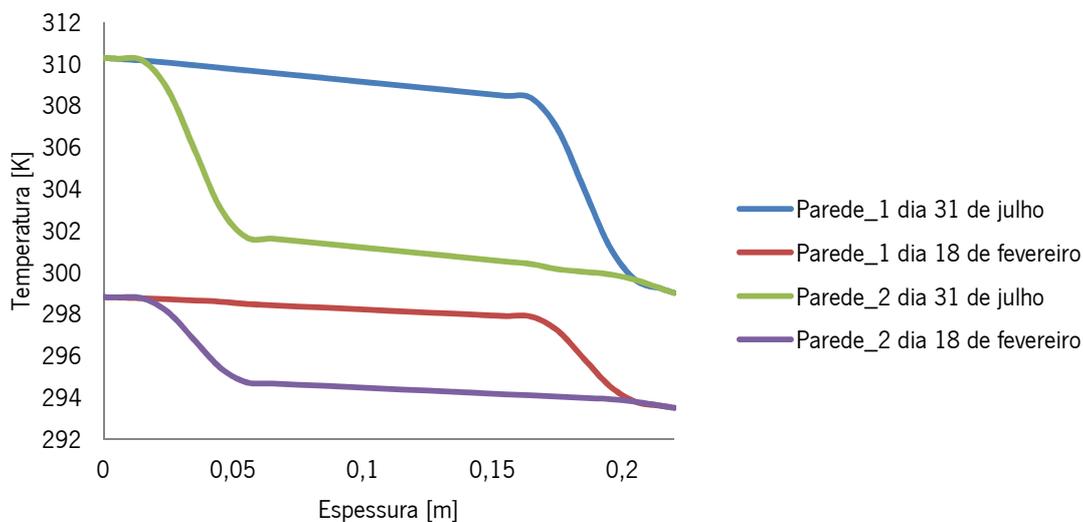


Figura 4.52 – Temperaturas finais.

Nos Anexos C, D, E e F está simulada uma parede nos 4 dias considerados. Esta parede é constituída pelos materiais apresentados na tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Constituição da parede

Materiais	Condutibilidade [W/m.K]	Massa Volúmica [kg/m³]	Calor Específico [J/kg.K]	Espessura [m]	Coefficiente de absorção	Emissividade
Reboco	1,3	1800	1046	0,02	0,4	0,9
Betão	0,85	1600	840	0,15		
Isolante	0,037	40	1550	0,03		
Estuque	0,25	750	1250	0,02		

Com a simulação da parede pode-se observar como varia a temperatura e o fluxo na parede ao longo do dia.

## 5. Conclusões

O estudo da simulação térmica de edifícios é um assunto bastante atual e muito complexo, gerando diversas formas de determinar a eficiência energética de um edifício. Um dos parâmetros que deve ser considerado na simulação térmica de edifícios é a análise do comportamento térmico das paredes de um edifício, assim, torna-se necessário avaliar o processo de transferência de calor numa parede. Deste modo, torna-se pertinente a realização de um estudo que interprete este mesmo processo.

O presente estudo assenta na elaboração de um algoritmo capaz de analisar este mesmo comportamento térmico, tendo em conta diversos fatores, tais como: as temperaturas de ambiente interior, os dados climáticos para um determinado local, bem como, os materiais constituintes da parede. Assim, foram analisadas diversas situações: a influência da posição do material isolante na parede, a influência da radiação solar na parede e o processo de absorção da mesma pela parede, as diferenças entre dias com diferentes níveis de radiação solar, e as diferenças entre a estação de aquecimento e arrefecimento.

Relativamente ao estudo da influência da posição do material isolante, efetuou-se uma avaliação do comportamento térmico da parede, verificando que se o material isolante estiver do lado interior a parede estabiliza mais rapidamente que se estiver do lado exterior, concluindo assim que efetivamente a posição do material isolante exerce influência no tempo necessário para que a parede atinja o estado de equilíbrio térmico.

Estudando a influência da radiação solar na parede e analisando o efeito da radiação solar incidente na parede, e a relação entre a orientação da parede e a radiação solar incidente na mesma, concluiu-se que a radiação solar tem efeito nas temperaturas da parede, pois aumenta o fluxo de calor que atravessa a parede e devido ao facto de se verificarem picos de fluxos de calor desfasados durante o dia, dependendo se a parede está orientada a Este, Sul ou Oeste. Assim, verificou-se que a Este o pico de fluxo de calor ocorre durante a manhã, a Sul durante o meio dia solar, e a Oeste durante a tarde.

Ao interpretar o resultado do estudo das diferenças entre dias com diferentes níveis de radiação solar verificou-se que nos dias com maior nebulosidade a radiação solar incidente é menor, logo, verifica-se uma redução na absorção da radiação solar por parte da parede

implicando assim uma redução no fluxo de calor. Comparando os dias com pouca nebulosidade e de diferentes estações, o programa permite verificar que apesar de a radiação solar ser mais elevada na estação de aquecimento, é na estação de aquecimento que se regista um fluxo de calor mais elevado.

Através da análise dos gráficos obtidos percebe-se que a parede tem uma característica ondulatória, o que provoca um amortecimento das temperaturas no interior.

A consideração de uma temperatura média interior diferente da temperatura de conforto térmico para o interior conduz a um erro de cálculo, sendo considerado uma limitação do programa criado. Esta limitação poderá servir de base para um melhoramento do programa. Em termos de estudo futuro, aplicar o programa a um edifício monozona, sem sistema de climatização, para se verificar de que forma a temperatura ambiente exterior afeta a temperatura ambiente interior

## Referências Bibliográficas

- Almeida, M. M. G. (1987). “Caracterização da inércia térmica de paredes maciças”, Tese de Mestrado em Engenharia Térmica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Alves, P. A. M. (2011). “Simulação térmica multizona de um edifício escolar: uma comparação de programas comerciais no âmbito do RSECE”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Universidade do Minho, Guimarães
- ASHRAE (2004). “Standard Method of Test for Evaluation of Buildings Energy Analysis Computer Programs”, Atlanta
- ASHRAE (2005). “*Nonresidential cooling and heating load calculation. In ASHRAE Handbook – Fundamentals – SI Units*”, 30 (15 - 20)
- Carrier (2012). “Hourly Analysis Program (HAP)”, obtido através do site [www.commercial.carrier.com](http://www.commercial.carrier.com) em 13 de novembro de 2012
- Diário da República, Decreto-Lei 78/2006 de 4 de abril
- Diário da República, Decreto-Lei 79/2006 de 4 de abril
- Diário da República, Decreto-Lei 80/2006 de 4 de abril
- Department of Mechanical Engineering of University of Strathclyde (2012). “ESP-r overview”, United Kingdom
- Diretiva 2002/11/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 2002
- Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010
- Equa Simulation AB (2010). “Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 build 4 with respect to ANSI/ASHRAE Standard 140-2004”
- Holman, J.P. (1989). “*Heat Transfer*”, Singapore, McGraw-Hill
- ITE 50 (2006) – “Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios”, Lisboa

- Lobarinhas, P. A. M. (2003). “Estudo e Modelação do Arrefecimento de Extrudidos em Calibradores”, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica na Universidade do Minho, Guimarães
- Lobão, R. (2004). “Modelo simplificado de previsão do comportamento térmico de edifícios”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade do Minho, Guimarães
- Martins, J. G. S. (2008). “Auditorias Energéticas – Certificação Energética de Edifícios”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica
- Mendonça, P. (2005). “Habitar sob uma segunda pele: estratégias para redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na Universidade do Minho, Guimarães
- Mitalas, G. P. (1978). “Comments on the z-transfer function method for calculating heat transfer in buildings”. ASHRAE Transactions, Vol 84, Part I, pp 667 – 678, OTTAWA, web.mit.edu/parnstr/Public acedido em 25/10/2012
- Sastre, R. (2000). “Proprietats dels materials, elements de construcció”, Edicions UPC, Barcelona
- Silva, P. C. P. (2006). “Análise do Comportamento Térmico de Construções não convencionais através da simulação em VisualDOE”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade do Minho, Guimarães
- Spitler, J. , Fisher, D. & Pederson, C. (1997). “The Radiant Time Series Cooling Load Calculation Procedure”, ASHRAE, em [www.hvac.okstate.edu/research/documents](http://www.hvac.okstate.edu/research/documents) acedido em 25/10/2012
- Solar Energy Laboratory & University of Wisconsin – Madison (2009). “TRNSYS 17 a Transient System simulation program – Getting started”
- Trane inc. (2012). “TRACE 700: HVAC Load design e analysis software”, obtido através: [www.trane.com/comercial/uploads/pdf/1136/TRAC-new.pdf](http://www.trane.com/comercial/uploads/pdf/1136/TRAC-new.pdf), em 13 de novembro de 2012

United States Department of Energy (2012). "Getting Started With EnergyPlus: Basic Concepts Manual – Essential Information you need about running EnergyPlus"

Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (1995). "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*", Harlow, Longman Scientific & Technical

Wray, C. (2003). "Duct Thermal performance models for large commercial buildings", Environmental Technologies Division Indoor Environment Department Lawrence Berkley National Laboratory, Berkley



## **Anexos**



## Anexo A – Resolução do modelo matemático

### Apenas condução

$$T_0^n = T_{ext} \quad (A.1)$$

$$T_L^n = T_{int} \quad (A.2)$$

Para  $i = 1$

$$\rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_1) \right] - \left[ \frac{2k}{\Delta x} (T_1 - T_{ext}) \right] \quad (A.3)$$

$$T_1 - T_1^0 = r(T_2 - T_1) - 2r(T_1 - T_{ext}) \quad (A.4)$$

$$(1 + 3r)T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + 2rT_{ext} \quad (A.5)$$

Para  $i = L-1$

$$\rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{2k}{\Delta x} (T_{int} - T_{L-1}) \right] - \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_{L-1} - T_{L-2}) \right] \quad (A.6)$$

$$T_{L-1} - T_{L-1}^0 = 2r(T_{int} - T_{L-1}) - r(T_{L-1} - T_{L-2}) \quad (A.7)$$

$$-rT_{L-2}^{n+1} + (1 + 3r)T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + 2rT_{int} \quad (A.8)$$

Para  $1 < i < L-1$

$$\rho C_p \frac{T_i - T_i^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_{i+1} - T_i) \right] - \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_i - T_{i-1}) \right] \quad (A.9)$$

$$T_i - T_i^0 = r(T_{i+1} - T_i) - r(T_i - T_{i-1}) \quad (A.10)$$

$$-rT_{i-1}^{n+1} + (1 + 2r)T_i^{n+1} - rT_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad (A.11)$$

**Fronteiras sofrerem convecção:**

Para  $i = 1$

$$-\frac{2k}{\Delta x}(T_P - T_0) = h_{ext\ conv}(T_{ext} - T_0) \quad (A.12)$$

$$\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)T_0 = \frac{2k}{\Delta x}T_P + h_{ext\ conv}T_{ext} \quad (A.13)$$

$$T_0 = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)}T_P + \frac{h_{ext\ conv}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)}T_{ext} \quad (A.14)$$

$$\rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_1) \right] - \left[ \frac{2k}{\Delta x} (T_1 - T_0) \right] \quad (A.15)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x &= \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_1) \right] \\ &- \left[ \frac{2k}{\Delta x} \left( T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)} T_1 - \frac{h_{ext\ conv}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)} T_{ext} \right) \right] \end{aligned} \quad (A.16)$$

$$\begin{aligned} T_1 - T_1^0 &= r(T_2 - T_1) \\ &- 2r \left( T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)} T_1 - \frac{h_{ext\ conv}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv}\right)} T_{ext} \right) \end{aligned} \quad (A.17)$$

$$\begin{aligned} & \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv} \right)} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} \\ & = T_1^n + \frac{2rh_{ext\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ conv} \right)} T_{ext} \end{aligned} \quad (A.18)$$

Para  $i = L-1$

$$\frac{2k}{\Delta x} (T_L - T_P) = h_{int\ conv} (T_{int} - T_L) \quad (A.19)$$

$$\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right) T_L = \frac{2k}{\Delta x} T_P + h_{int\ conv} T_{int} \quad (A.20)$$

$$T_L = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_P + \frac{h_{int\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{int} \quad (A.21)$$

$$\rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{2k}{\Delta x} (T_L - T_{L-1}) \right] - \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_{L-1} - T_{L-2}) \right] \quad (A.22)$$

$$\begin{aligned} & \rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x \\ & = \left[ \frac{2k}{\Delta x} \left( \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{L-1} + \frac{h_{int\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{int} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - T_{L-1} \right) \right] - \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_{L-1} - T_{L-2}) \right] \end{aligned} \quad (A.23)$$

$$\begin{aligned} T_{L-1} - T_{L-1}^0 & = 2r \left( \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{L-1} + \frac{h_{int\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{int} \right. \\ & \quad \left. - T_{L-1} \right) - r(T_{L-1} - T_{L-2}) \end{aligned} \quad (A.24)$$

$$\begin{aligned}
 -rT_{L-2}^{n+1} + \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} \right) T_{L-1}^{n+1} \\
 = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int\ conv}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int\ conv} \right)} T_{int}
 \end{aligned} \tag{A.25}$$

### Fronteiras sofrerem radiação:

Para  $i = 1$

$$-\frac{2k}{\Delta x} (T_P - T_0) = \varepsilon\sigma \left( \frac{T_{céu}^4 + T_{chão}^4}{2} - T_0^4 \right) \tag{A.26}$$

$$q = \varepsilon\sigma \left( \frac{T_{céu}^4 + T_{chão}^4}{2} - T_0^4 \right) \tag{A.27}$$

$$q = \frac{\varepsilon\sigma}{2} (T_{céu}^4 - T_0^4) + \frac{\varepsilon\sigma}{2} (T_{chão}^4 - T_0^4) \tag{A.28}$$

$$q = \frac{\varepsilon\sigma}{2} [(T_{céu}^2 + T_0^2)(T_{céu}^2 - T_0^2)] + \frac{\varepsilon\sigma}{2} [(T_{chão}^2 + T_0^2)(T_{chão}^2 - T_0^2)] \tag{A.29}$$

$$\begin{aligned}
 q = \frac{\varepsilon\sigma}{2} [(T_{céu}^2 + T_0^2)(T_{céu} + T_0)(T_{céu} - T_0)] \\
 + \frac{\varepsilon\sigma}{2} [(T_{chão}^2 + T_0^2)(T_{chão} + T_0)(T_{chão} - T_0)]
 \end{aligned} \tag{A.30}$$

$$h_{ext\ rad\ céu} = \frac{\varepsilon\sigma}{2} [(T_{céu}^2 + T_0^2)(T_{céu} + T_0)] \tag{A.31}$$

$$h_{ext\ rad\ chão} = \frac{\varepsilon\sigma}{2} [(T_{chão}^2 + T_0^2)(T_{chão} + T_0)] \tag{A.32}$$

$$h_{ext\ rad\ céu_{corr}} = h_{ext\ rad\ céu} \left( \frac{T_0 - T_{céu}}{T_0 - T_{ext}} \right) \tag{A.33}$$

$$h_{ext\ rad\ chão_{corr}} = h_{ext\ rad\ chão} \left( \frac{T_0 - T_{chão}}{T_0 - T_{ext}} \right) \tag{A.34}$$

$$h_{ext\ rad} = h_{ext\ rad\ céu_{corr}} + h_{ext\ rad\ chão_{corr}} \tag{A.35}$$

$$q = h_{ext\ rad} (T_{ext} - T_0) \tag{A.36}$$

$$-\frac{2k}{\Delta x}(T_P - T_0) = h_{ext\ rad}(T_{ext} - T_0) \quad (A.37)$$

$$\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad}\right)T_0 = \frac{2k}{\Delta x}T_P + h_{ext\ rad}T_{ext} \quad (A.38)$$

$$T_0 = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad}\right)}T_P + \frac{h_{ext\ rad}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad}\right)}T_{ext} \quad (A.39)$$

$$\rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x = \left[\frac{k}{\Delta x}(T_2 - T_1)\right] - \left[\frac{2k}{\Delta x}(T_1 - T_0)\right] \quad (A.40)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x &= \left[ \frac{k}{\Delta x}(T_2 - T_1) \right. \\ &\quad \left. - \left[ \frac{2k}{\Delta x} \left( T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_1 \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - \frac{h_{ext\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_{ext} \right) \right] \right] \quad (A.41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1 - T_1^0 &= r(T_2 - T_1) \\ &\quad - 2r \left( T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_1 - \frac{h_{ext\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_{ext} \right) \quad (A.42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} \right) T_1^{n+1} - r T_2^{n+1} \\ &= T_1^n + \frac{2rh_{ext\ rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext\ rad} \right)} T_{ext} \quad (A.43) \end{aligned}$$

Para  $i = L-1$

$$\frac{2k}{\Delta x}(T_L - T_P) = \varepsilon\sigma(T_{med}^4 - T_L^4) \quad (A.44)$$

$$q = \varepsilon\sigma(T_{med}^4 - T_L^4) \quad (A.45)$$

$$q = \varepsilon\sigma[(T_{med}^2 + T_L^2)(T_{med}^2 - T_L^2)] \quad (A.46)$$

$$q = \varepsilon\sigma[(T_{med}^2 + T_L^2)(T_{med} + T_L)(T_{med} - T_L)] \quad (A.47)$$

$$h_{int rad} = \varepsilon\sigma[(T_{med}^2 + T_L^2)(T_{med} + T_L)] \quad (A.48)$$

$$h_{int rad} = h_{int rad} \left( \frac{T_L - T_{med}}{T_L - T_{int}} \right) \quad (A.49)$$

$$q = h_{int rad}(T_{int} - T_L) \quad (A.50)$$

$$\frac{2k}{\Delta x}(T_L - T_P) = h_{int rad}(T_{int} - T_L) \quad (A.51)$$

$$\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right) T_L = \frac{2k}{\Delta x} T_P + h_{int rad} T_{int} \quad (A.52)$$

$$T_L = \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_P + \frac{h_{int rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_{int} \quad (A.53)$$

$$\rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{2k}{\Delta x} (T_L - T_{L-1}) \right] - \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_{L-1} - T_{L-2}) \right] \quad (A.54)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x &= \left[ \frac{2k}{\Delta x} \left( \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_{L-1} + \frac{h_{int rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_{int} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - T_{L-1} \right) \right] - \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_{L-1} - T_{L-2}) \right] \end{aligned} \quad (A.55)$$

$$\begin{aligned} T_{L-1} - T_{L-1}^0 &= 2r \left( \frac{2k}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_{L-1} + \frac{h_{int rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_{int} \right. \\ &\quad \left. - T_{L-1} \right) - r(T_{L-1} - T_{L-2}) \end{aligned} \quad (A.56)$$

$$\begin{aligned} -rT_{L-2}^{n+1} + \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} \right) T_{L-1}^{n+1} \\ = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{int rad} \right)} T_{int} \end{aligned} \quad (A.57)$$

**Fronteiras sofrerem convecção e radiação:**

 Para  $i = 1$ 

$$-\frac{2k}{\Delta x}(T_P - T_0) = h_{ext\ conv}(T_{ext} - T_0) + h_{ext\ rad}(T_{ext} - T_0) \quad (A.58)$$

$$h_{ext} = h_{ext\ conv} + h_{ext\ rad} \quad (A.59)$$

$$-\frac{2k}{\Delta x}(T_P - T_0) = h_{ext}(T_{ext} - T_0) \quad (A.60)$$

$$\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)T_0 = \frac{2k}{\Delta x}T_P + h_{ext}T_{ext} \quad (A.61)$$

$$T_0 = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_P + \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_{ext} \quad (A.62)$$

$$\rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x = \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_1) \right] - \left[ \frac{2k}{\Delta x} (T_1 - T_0) \right] \quad (A.63)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x &= \left[ \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_1) \right] \\ &- \left[ \frac{2k}{\Delta x} \left( T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_1 - \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_{ext} \right) \right] \end{aligned} \quad (A.64)$$

$$T_1 - T_1^0 = r(T_2 - T_1) - 2r \left( T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_1 - \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_{ext} \right) \quad (A.65)$$

$$\left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = T_1^n + \frac{2rh_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} T_{ext} \quad (A.66)$$

Para  $i = L-1$

$$\frac{2k}{\Delta x}(T_L - T_P) = h_{int\ conv}(T_{int} - T_L) + h_{int\ rad}(T_{int} - T_L) \quad (A.67)$$

$$h_{int} = h_{int\ conv} + h_{int\ rad} \quad (A.68)$$

$$\frac{2k}{\Delta x}(T_L - T_P) = h_{int}(T_{int} - T_L) \quad (A.69)$$

$$\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)T_L = \frac{2k}{\Delta x}T_P + h_{int}T_{int} \quad (A.70)$$

$$T_L = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_P + \frac{h_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_{int} \quad (A.71)$$

$$\rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x = \left[\frac{2k}{\Delta x}(T_L - T_{L-1})\right] - \left[\frac{k}{\Delta x}(T_{L-1} - T_{L-2})\right] \quad (A.72)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{T_{L-1} - T_{L-1}^0}{\Delta t} \Delta x &= \left[ \frac{2k}{\Delta x} \left( \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_{L-1} + \frac{h_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_{int} - T_{L-1} \right) \right] \\ &\quad - \left[ \frac{k}{\Delta x}(T_{L-1} - T_{L-2}) \right] \end{aligned} \quad (A.73)$$

$$\begin{aligned} T_{L-1} - T_{L-1}^0 &= 2r \left( \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_{L-1} + \frac{h_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_{int} - T_{L-1} \right) \\ &\quad - r(T_{L-1} - T_{L-2}) \end{aligned} \quad (A.74)$$

$$-rT_{L-2}^{n+1} + \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)} \right) T_{L-1}^{n+1} = T_{L-1}^n + \frac{2rh_{int}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{int}\right)}T_{int} \quad (A.75)$$

**Fronteiras sofrem convecção, radiação e radiação solar:**

 Para  $i = 1$ 

$$-\frac{2k}{\Delta x}(T_P - T_0) = h_{ext}(T_{ext} - T_0) + \alpha_{abs}I_{rad} \quad (A.76)$$

$$\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)T_0 = \frac{2k}{\Delta x}T_P + h_{ext}T_{ext} + \alpha_{abs}I_{rad} \quad (A.77)$$

$$T_0 = \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_P + \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_{ext} + \frac{\alpha_{abs}I_{rad}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)} \quad (A.78)$$

$$\rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x = \left[\frac{k}{\Delta x}(T_2 - T_1)\right] - \left[\frac{2k}{\Delta x}(T_1 - T_0)\right] \quad (A.79)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \Delta x &= \left[\frac{k}{\Delta x}(T_2 - T_1)\right] \\ &- \left[\frac{2k}{\Delta x} \left(T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_1 - \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_{ext} - \frac{\alpha_{abs}I_{rad}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}\right)\right] \end{aligned} \quad (A.80)$$

$$\begin{aligned} T_1 - T_1^0 &= r(T_2 - T_1) \\ &- 2r \left(T_1 - \frac{2k}{\Delta x \left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_1 - \frac{h_{ext}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}T_{ext} - \frac{\alpha_{abs}I_{rad}}{\left(\frac{2k}{\Delta x} + h_{ext}\right)}\right) \end{aligned} \quad (A.81)$$

$$\begin{aligned} & \left( 1 + 3r - \frac{4rk}{\Delta x \left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} \\ & = T_1^n + \frac{2rh_{ext}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} T_{ext} + \frac{2r\alpha_{abs}I_{rad}}{\left( \frac{2k}{\Delta x} + h_{ext} \right)} \end{aligned} \tag{A.82}$$

## **Anexo B – Funcionamento do programa**

A figura 3.6 representa como está estruturado o programa criado. Aqui vai ser apresentado como é apresentado os menus de escolha para a situação pretendida. Quando se inicio o programa, irá aparecer um menu inicial (figura B.1) onde se pode escolher o estudo que se pretende fazer na parede. Após a escolha do estudo é apresentado um submenu (figura B.2) em que se poderá optar pela consideração de uma temperatura constante, ou um perfil de temperaturas. Seguidamente é apresentado outro submenu (figura B.3) em que se poderá escolher entre um material, ou vários materiais.

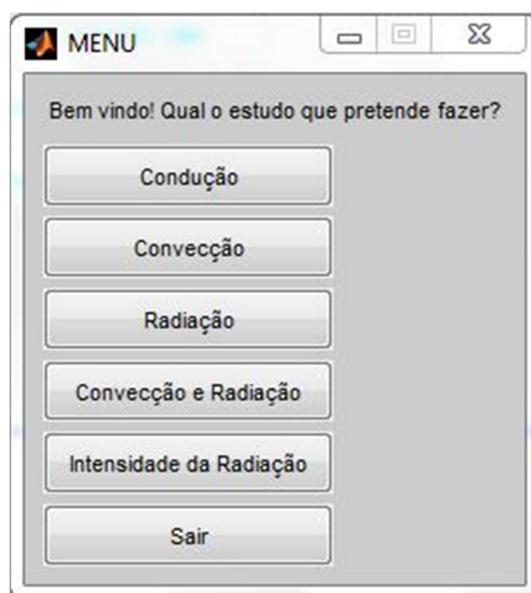


Figura B.1 – Menu inicial.



Figura B.2 – Menu de escolha das temperaturas.

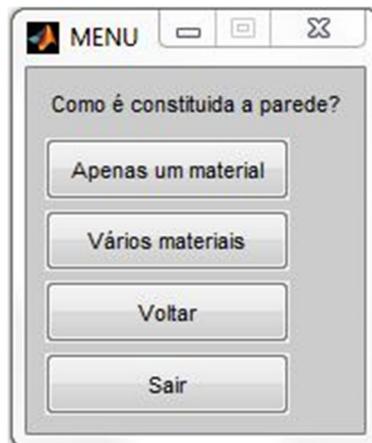


Figura B.3 – Menu de escolha dos materiais.

Após a escolha do estudo, das temperaturas e da quantidade de materiais, precede-se à definição dos materiais constituintes da parede, bem como as suas características (figura B.4). Seguidamente é escolhido o em que se pretende simular a parede (figura B.5).

```

Quantos materiais constituem a parede? 4
Qual a condutividade do material 1[W/m.K]? 1.3
Qual a massa volúmica do material 1[kg/m^3]? 1800
Qual o calor específico do material 1[J/kg.K]? 1046
Qual a espessura do material 1[m]? 0.02
Qual a condutividade do material 2[W/m.K]? 0.85
Qual a massa volúmica do material 2[kg/m^3]? 1600
Qual o calor específico do material 2[J/kg.K]? 840
Qual a espessura do material 2[m]? 0.15
Qual a condutividade do material 3[W/m.K]? 0.037
Qual a massa volúmica do material 3[kg/m^3]? 40
Qual o calor específico do material 3[J/kg.K]? 1550
Qual a espessura do material 3[m]? 0.03
Qual a condutividade do material 4[W/m.K]? 0.25
Qual a massa volúmica do material 4[kg/m^3]? 750
Qual o calor específico do material 4[J/kg.K]? 1250
Qual a espessura do material 4[m]? 0.02
Qual o intervalo de tempo que pretende [s]? 60

parede =

      n_mat: 4
      propriedade_k: [1.3000 0.8500 0.0370 0.2500]
      propriedade_rho: [1800 1600 40 750]
      propriedade_Cp: [1046 840 1550 1250]
      propriedade_alfa: [6.9046e-007 6.3244e-007 5.9677e-007 2.6667e-007]
      propriedade_r: [0.4143 0.3795 0.3581 0.1600]
      espessura: 0.2200
      pontos_interiores_material: [2 15 3 2]
      pontos_interiores: 22
      pontos: 24
      deltat: 60
  
```

Figura B.4 – Defenição das materiais e suas características.

```
Valor de emissividade do material exterior = 0.9
Valor de emissividade do material interior = 0.9
Situação de Verão - 1
Situação de Inverno - 2
Qual a situação que pretende? 2
Dia com céu limpo - 1
Dia com céu nublado - 2
Dia típico - 3
Qual o dia que pretende? 1
Orientação Este - 1
Orientação Sul - 2
Orientação Oeste - 3
Qual a orientação que pretende? 2
Temperatura do céu e do chão diferentes da temperatura exterior?
Sim - 1
Não - 2
Qual a situação pretendida? 2
Cor clara - 1
Cor média - 2
Cor escura - 3
Qual a cor da parede? 1
Temperatura média é diferente da temperatura interior?
Sim - 1
Não - 2
Qual a situação pretendida? 2
```

Figura B.5 – Definição do dia.

## **Anexo C – Simulação para o dia 18 de fevereiro**

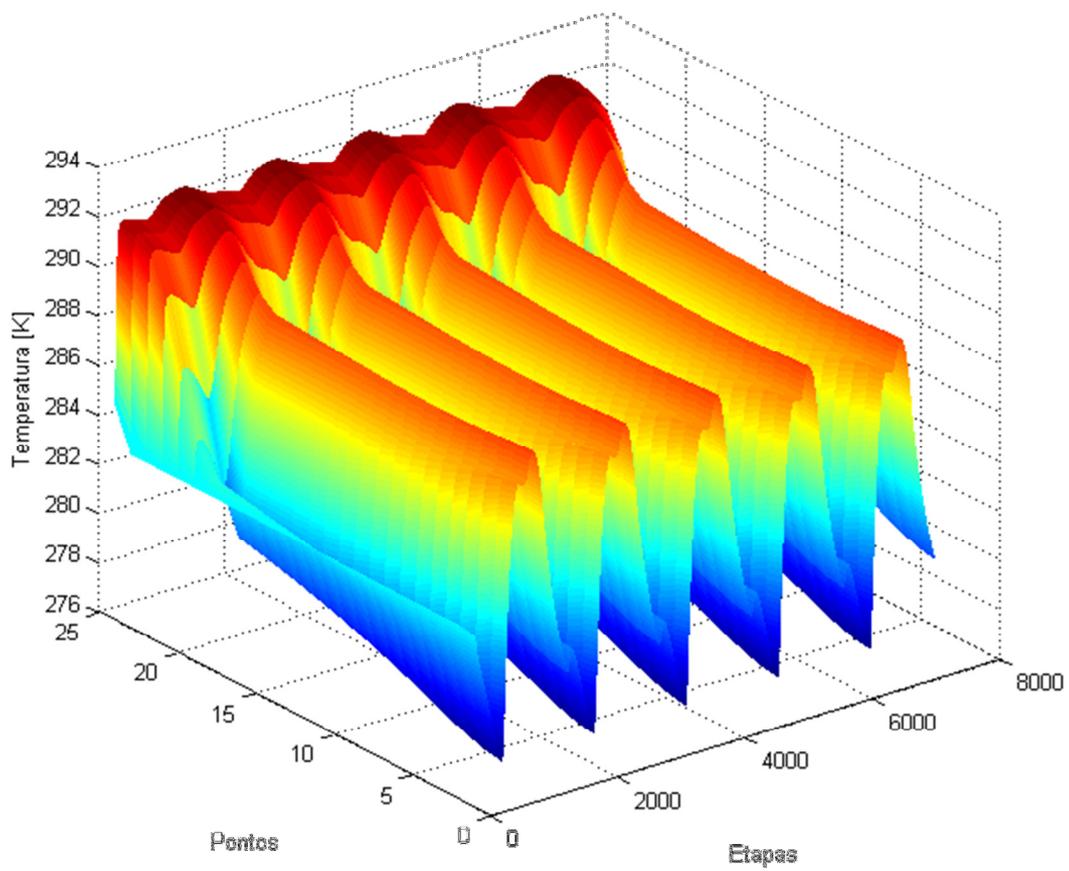


Figura C.1 – Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este).

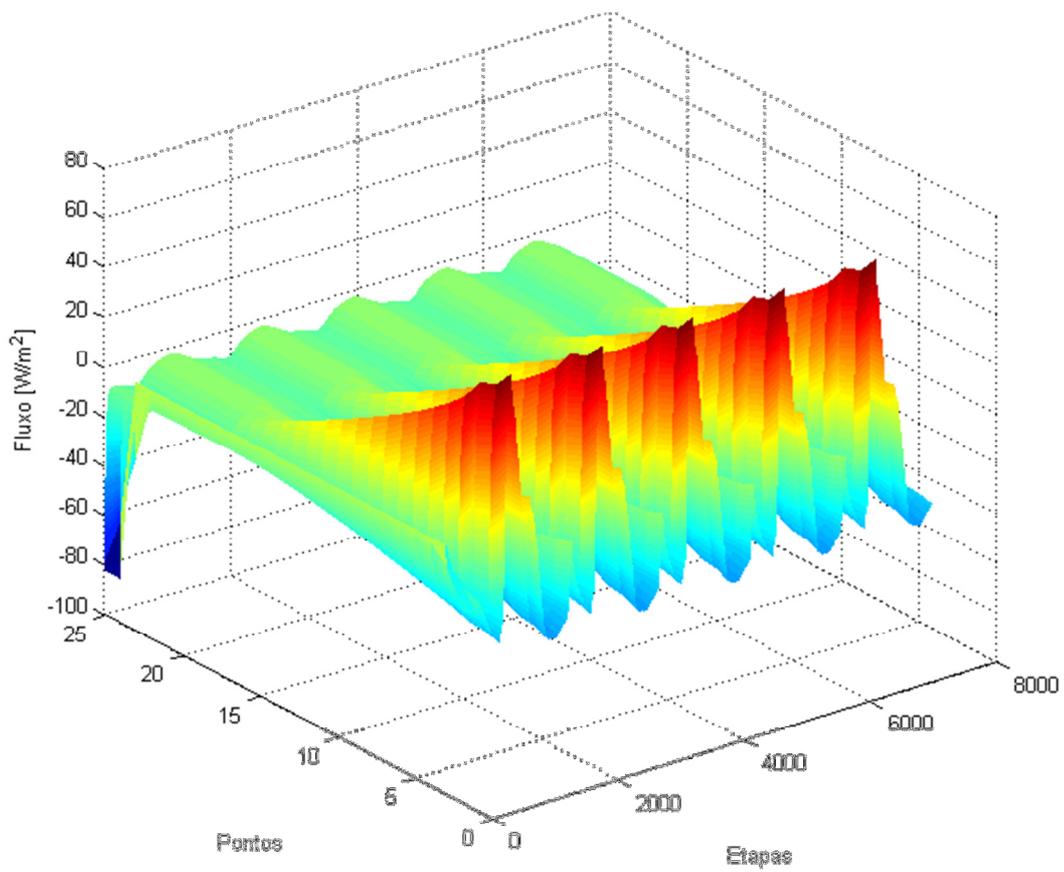


Figura C.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este).

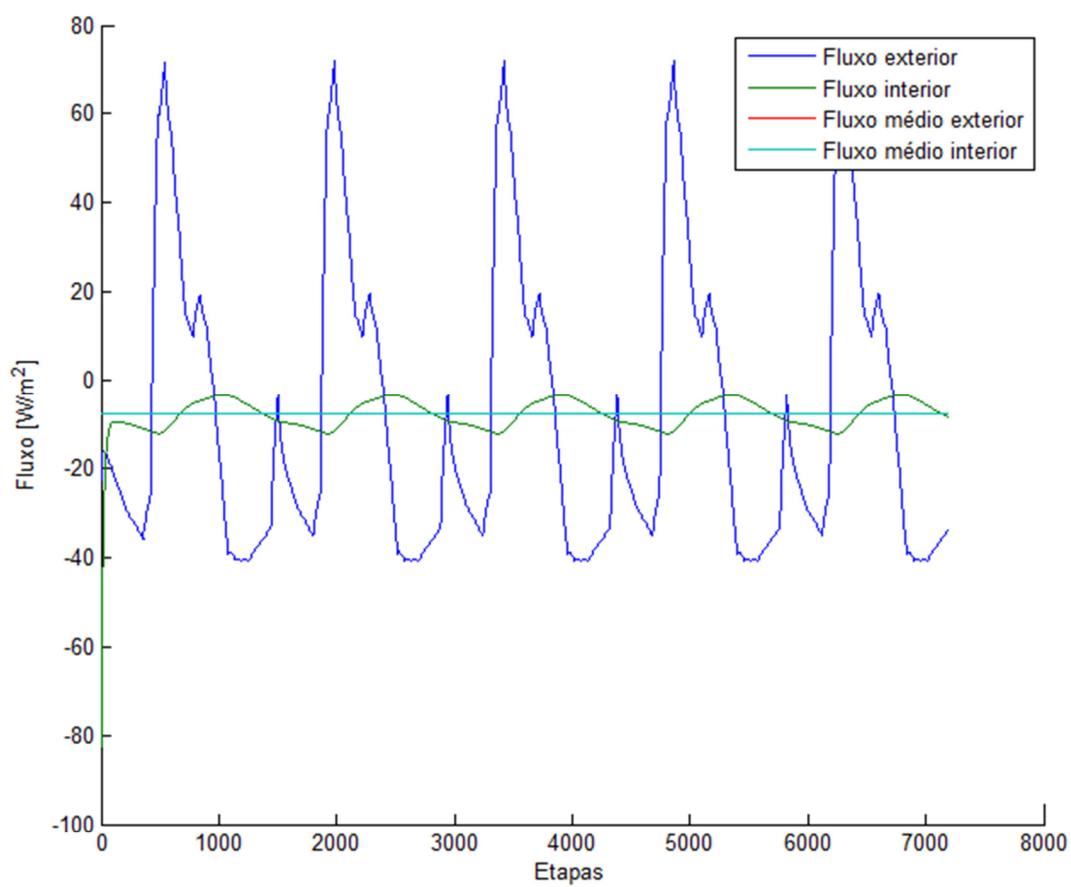


Figura C.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este).

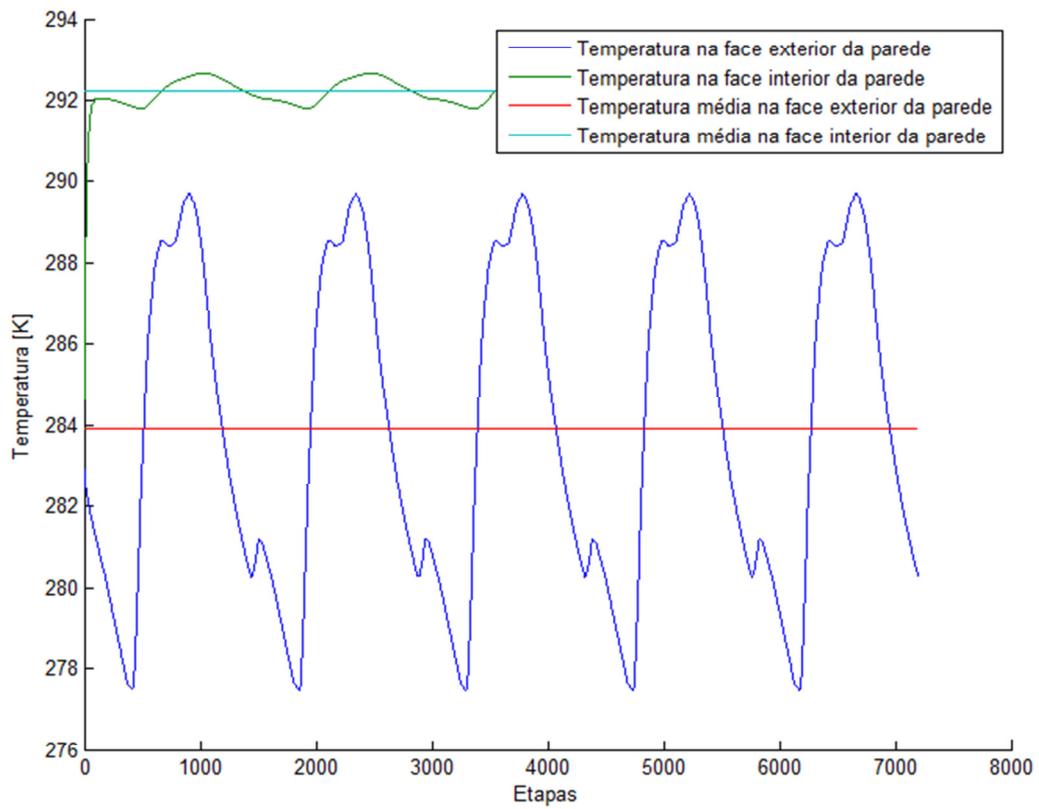


Figura C.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este).

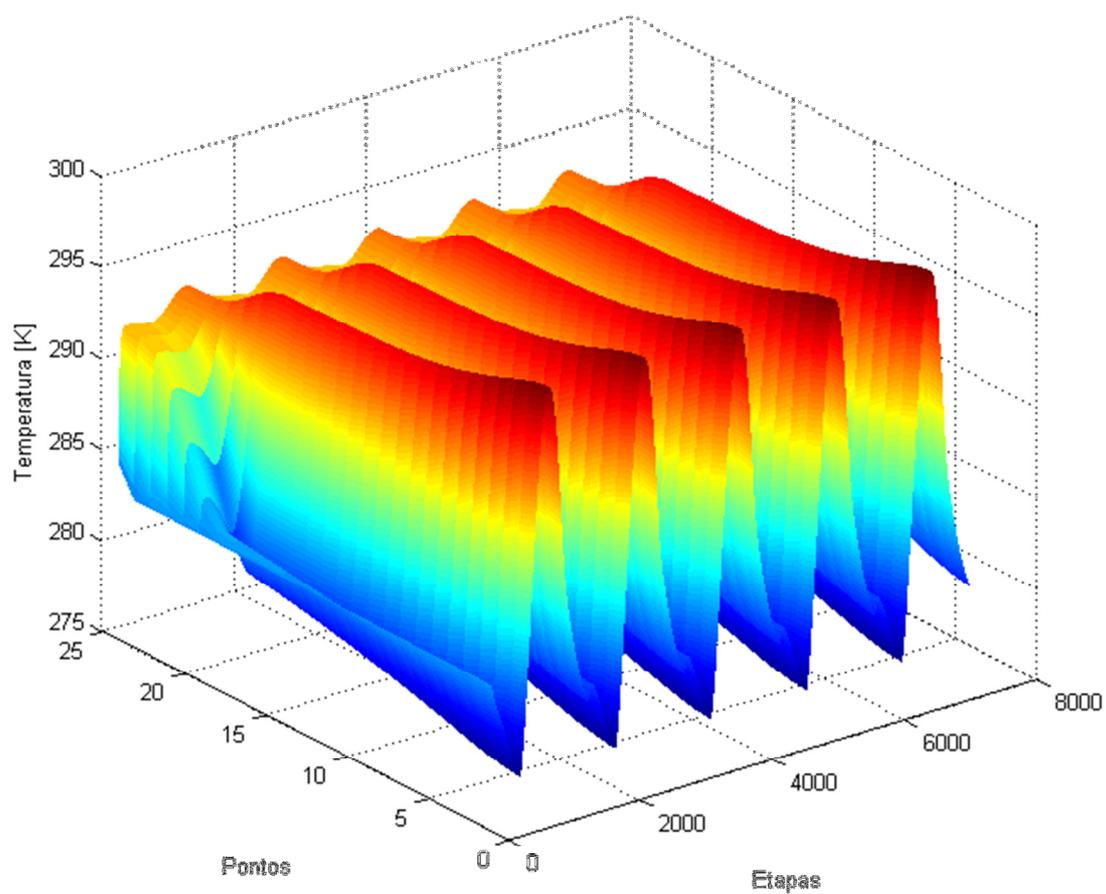


Figura C.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul).

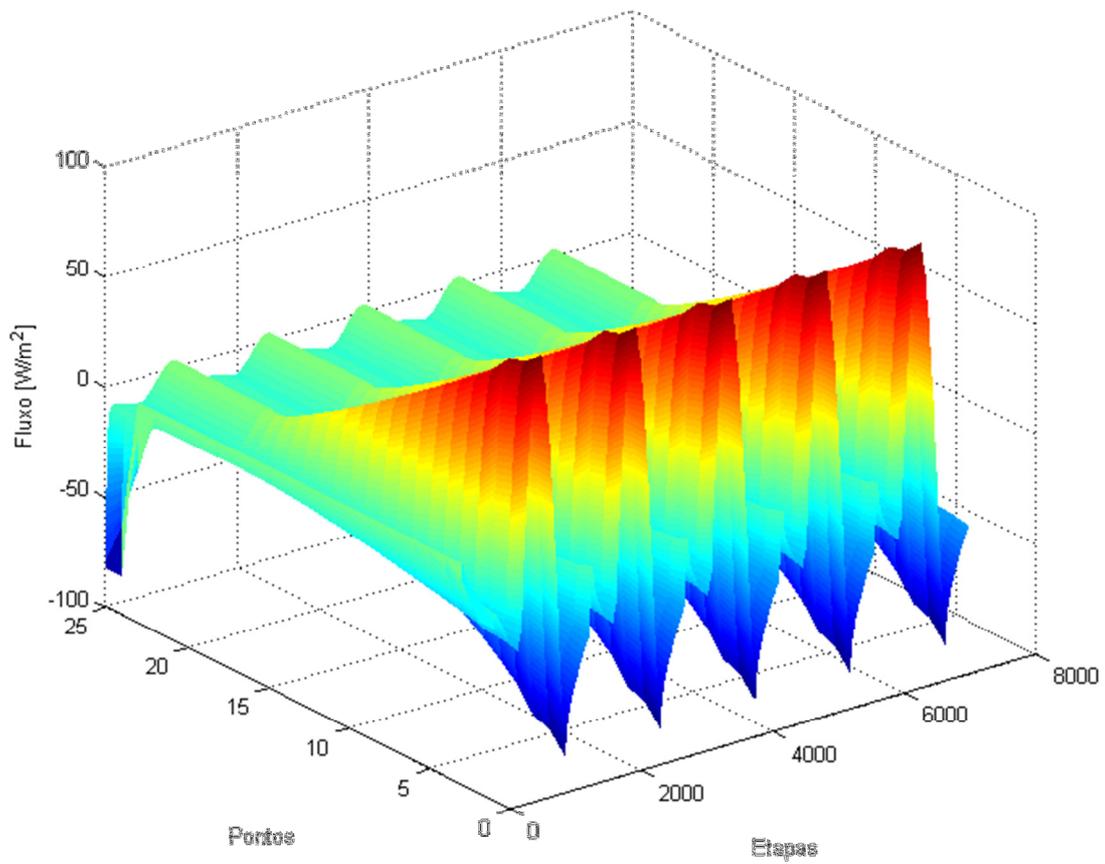


Figura C.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).

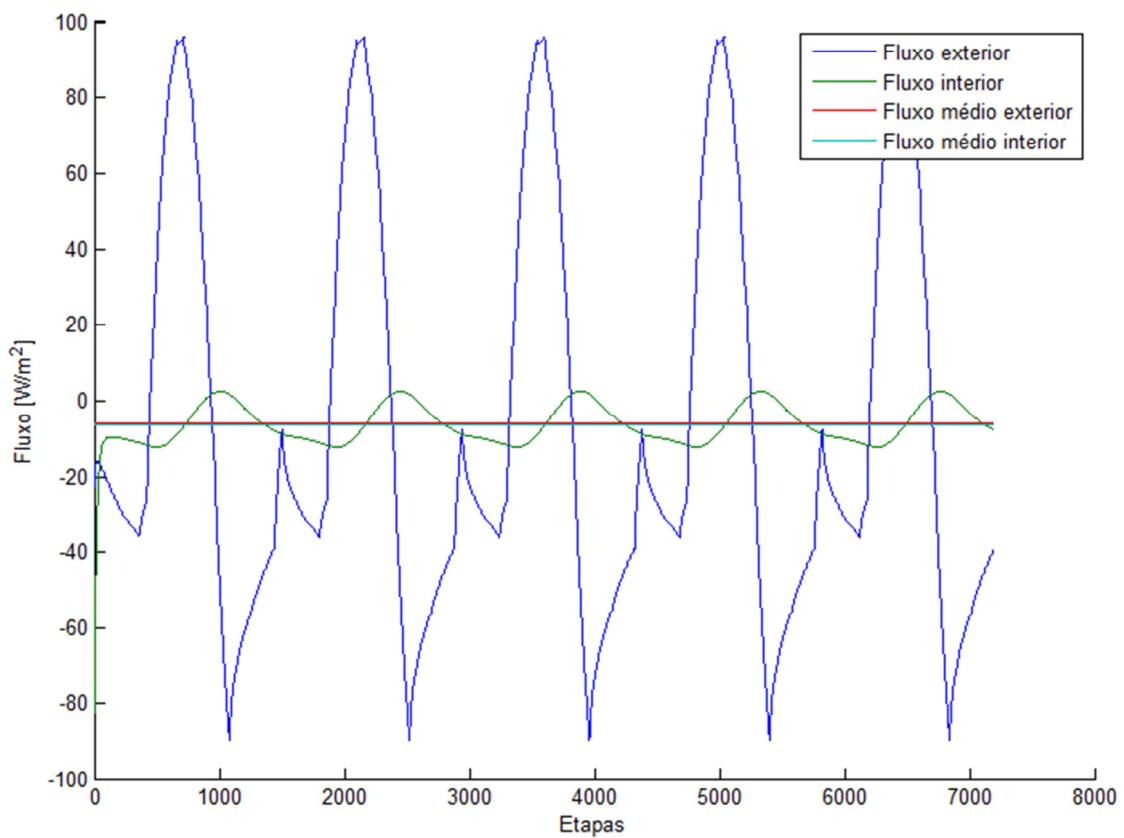


Figura C.7 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).

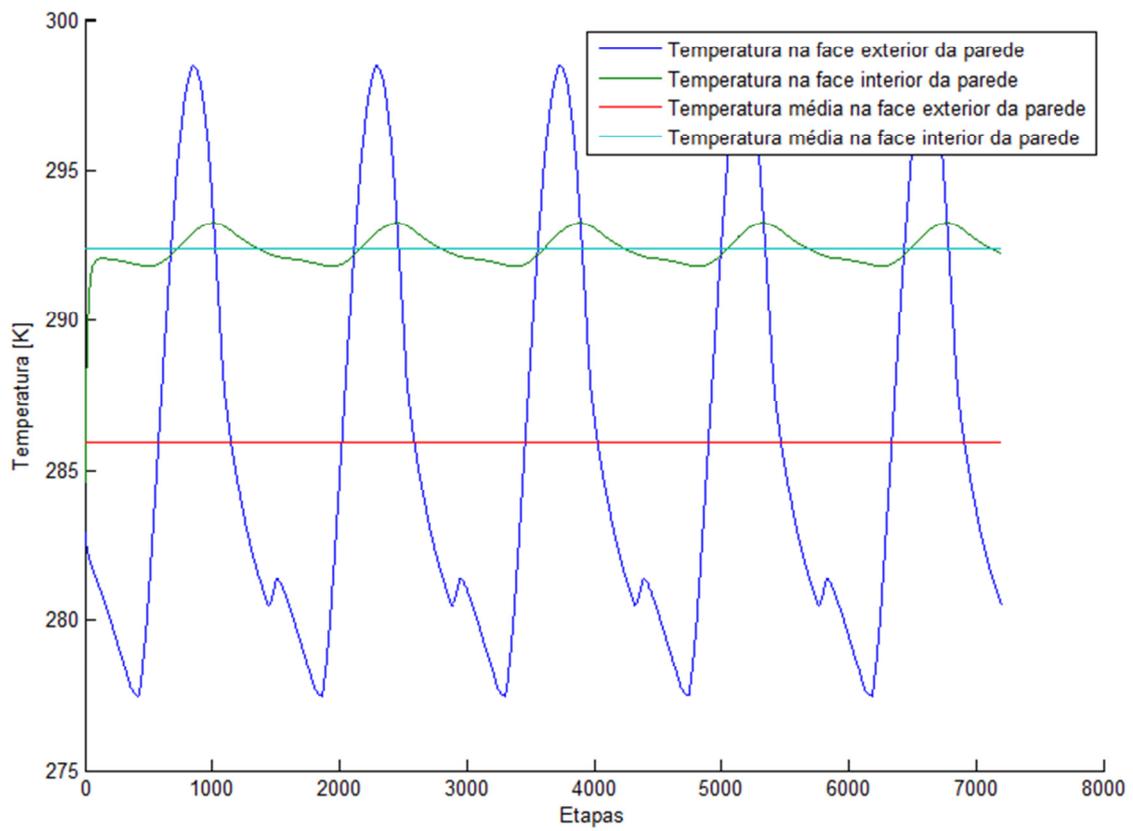


Figura C.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul).

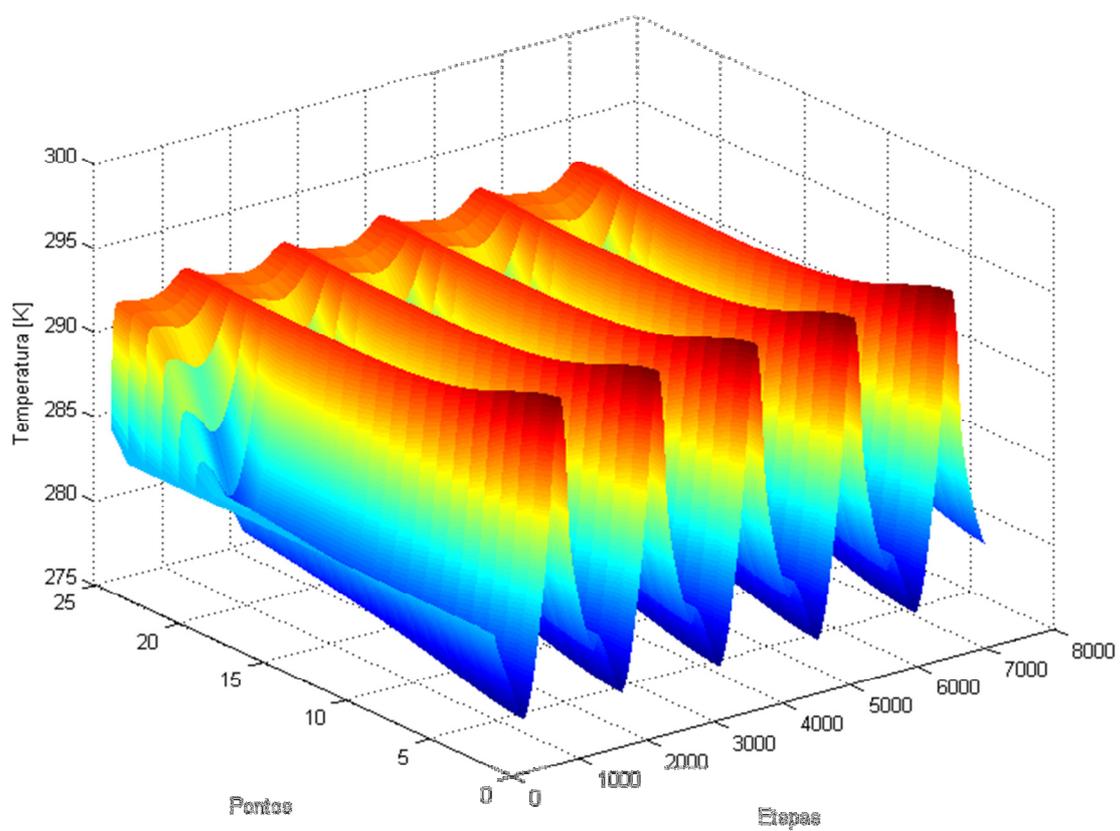


Figura C.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste).

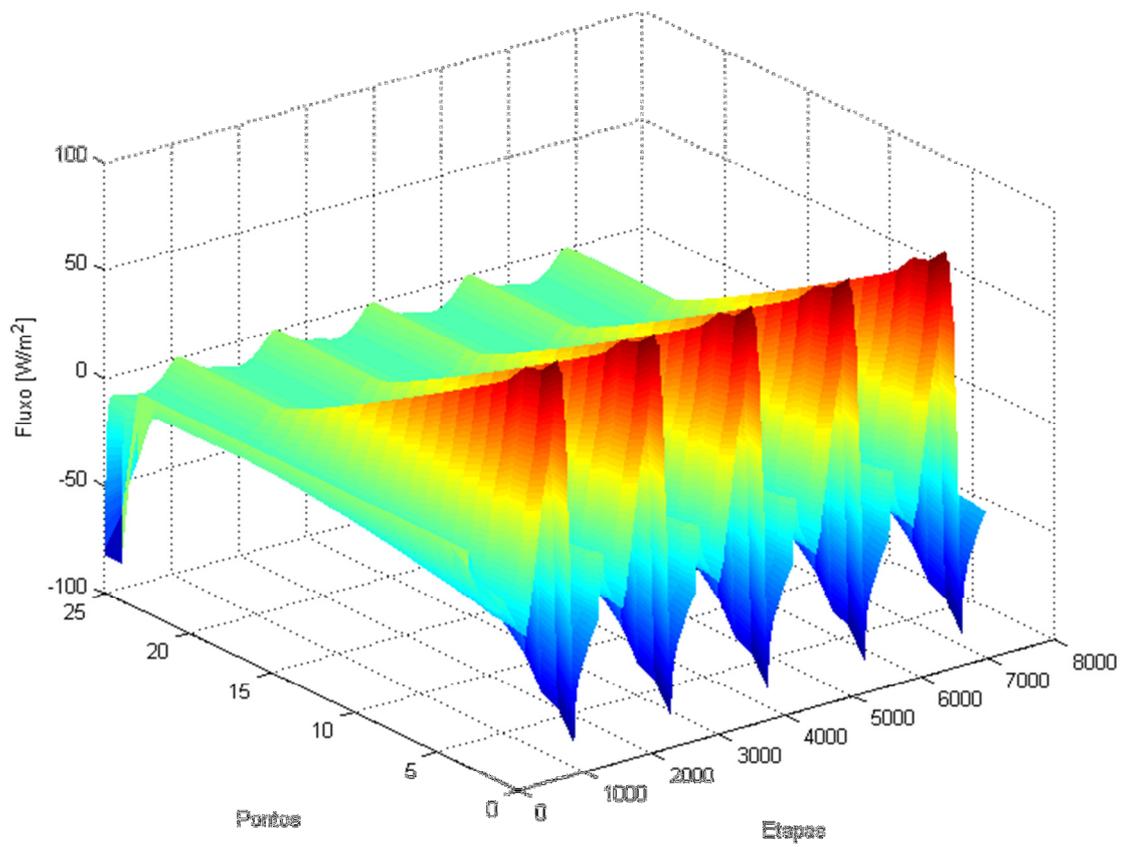


Figura C.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste).

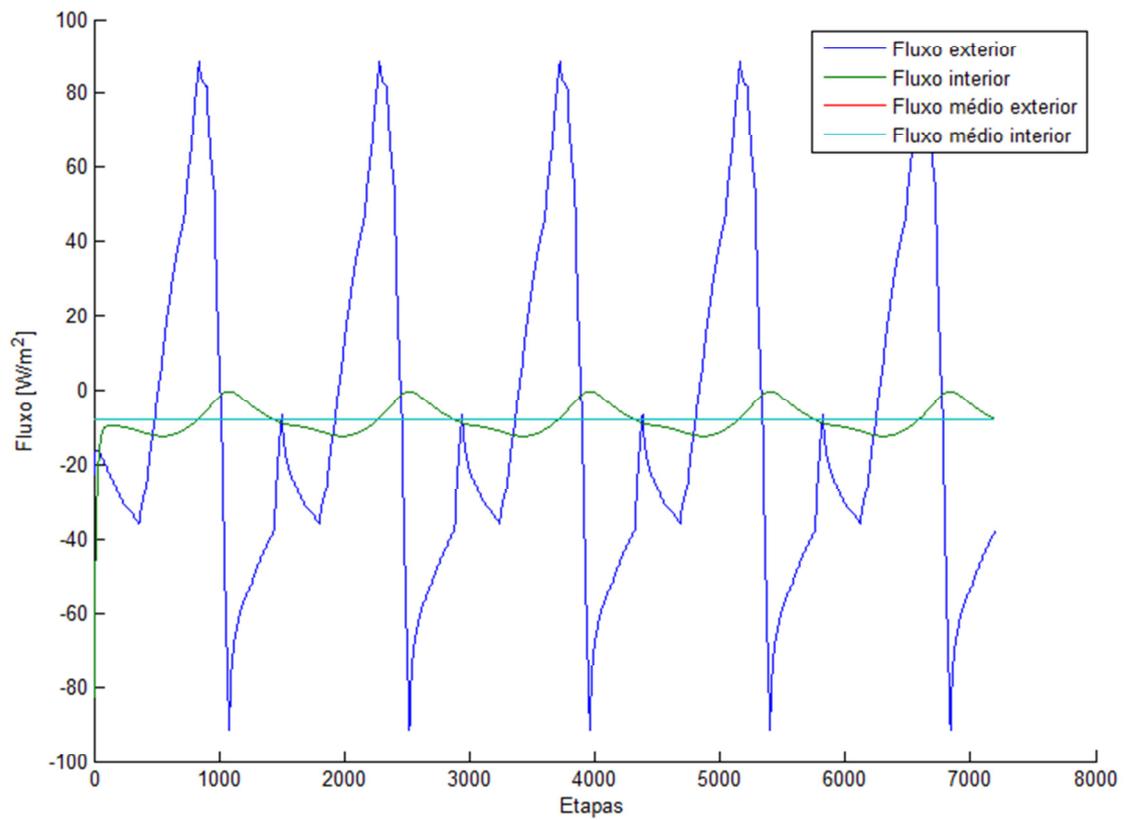


Figura C.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste).

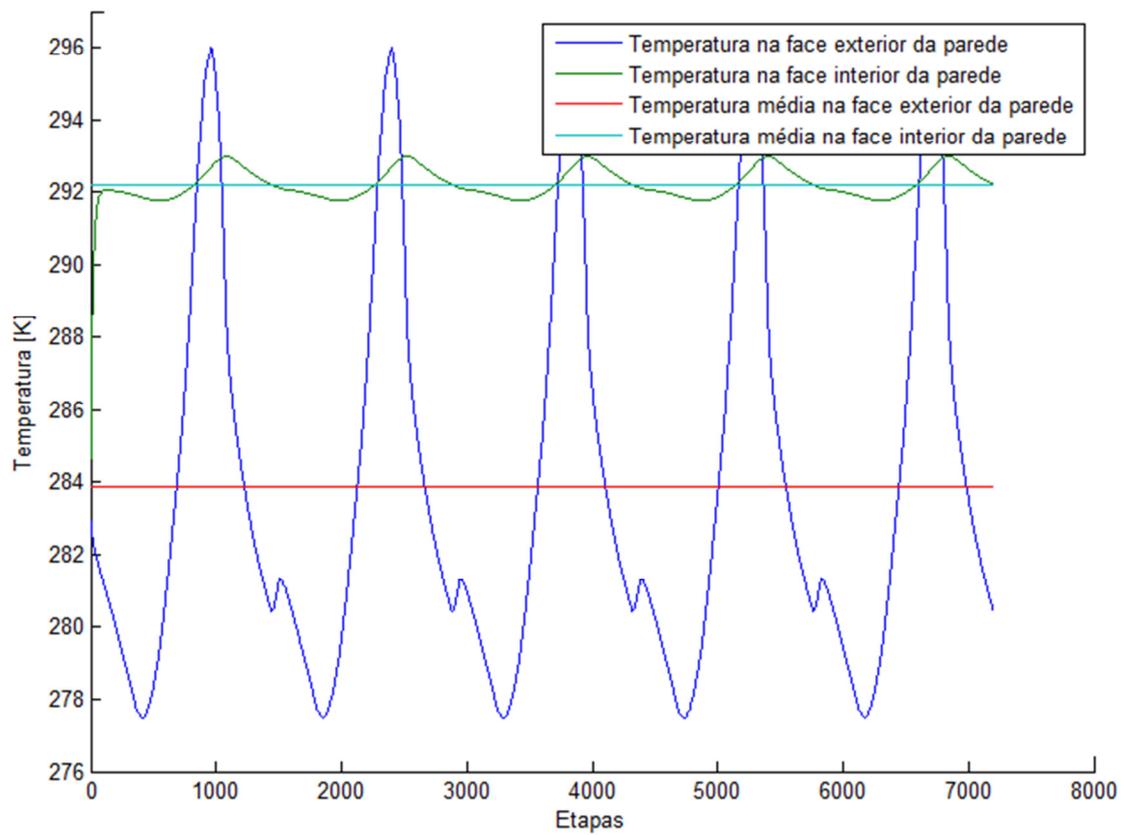


Figura C.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste).



## **Anexo D – Simulação para o dia 26 de janeiro**

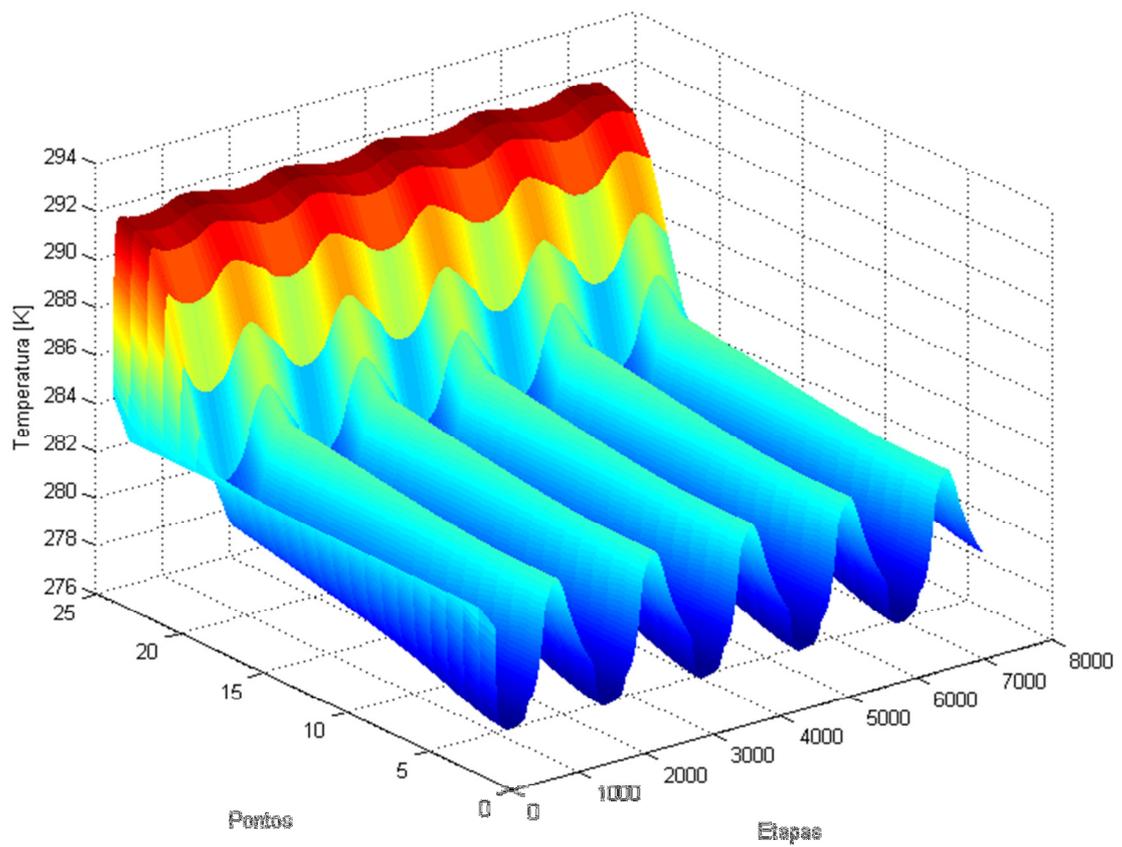


Figura D.1 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este).

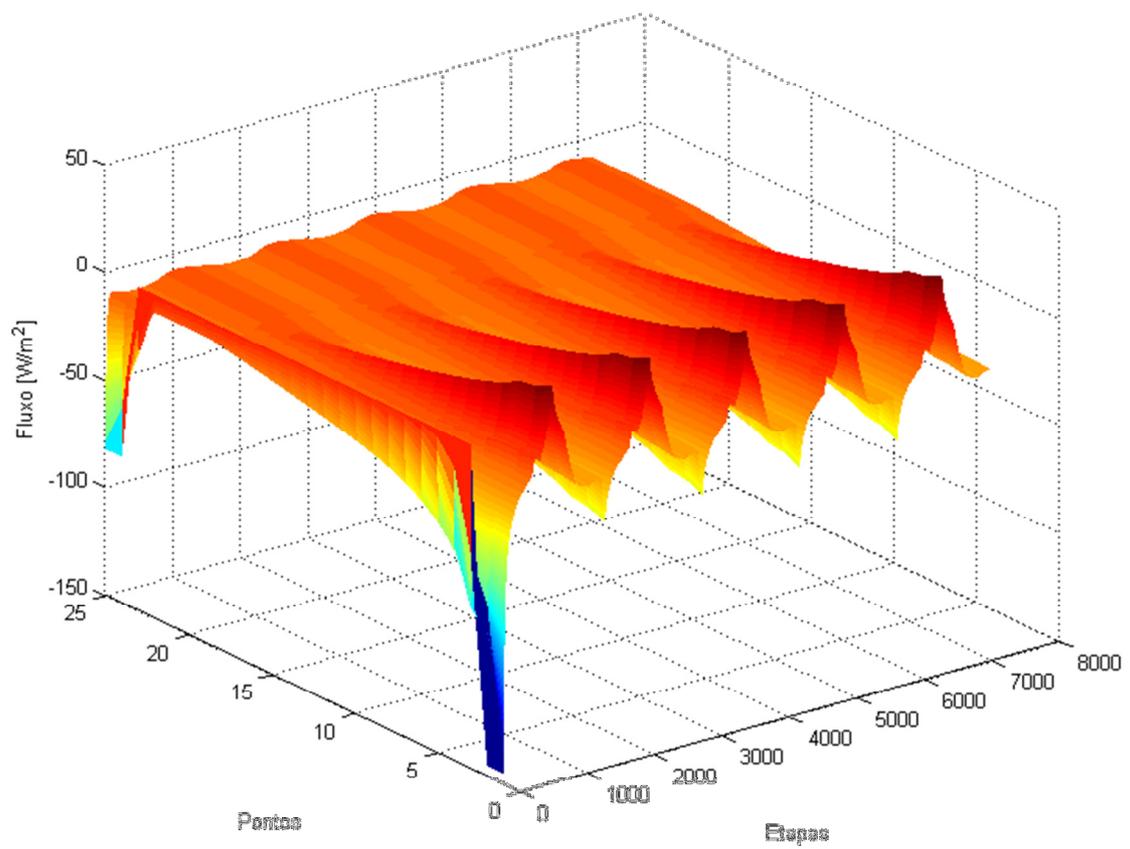


Figura D.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este)

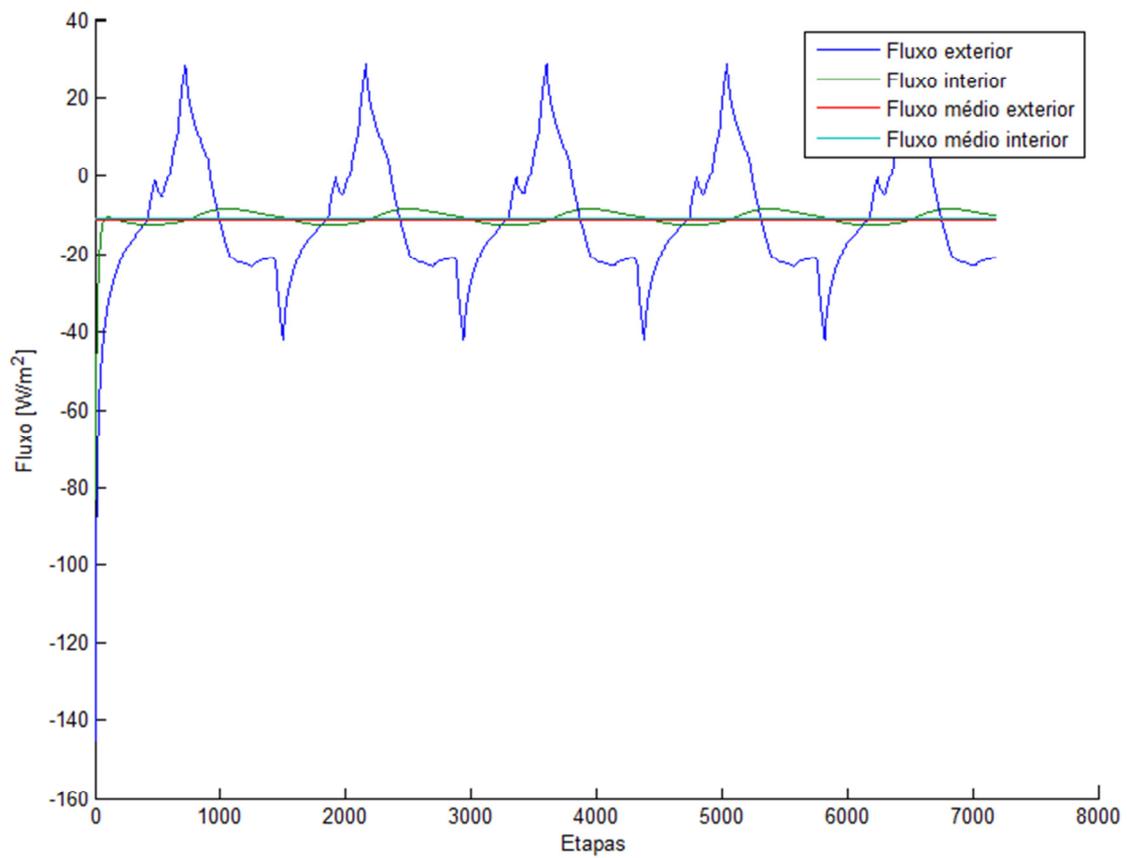


Figura D.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este).

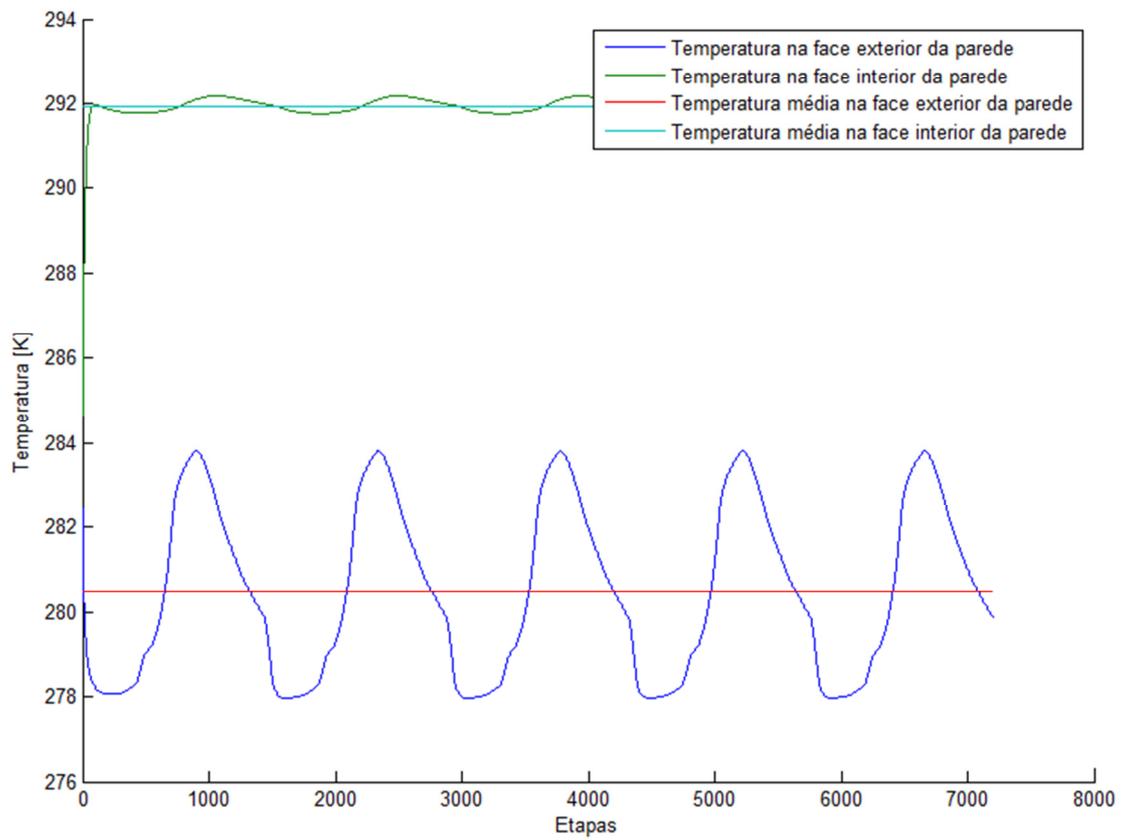


Figura D.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este).

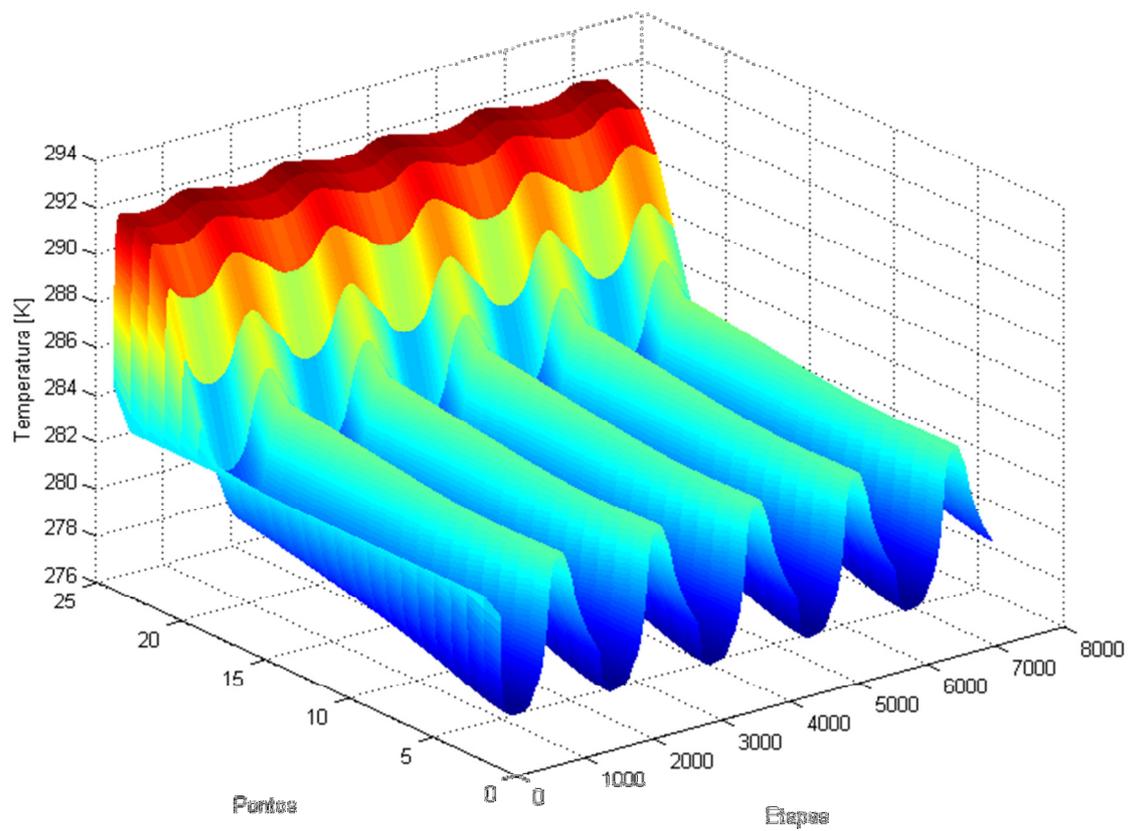


Figura D.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul).

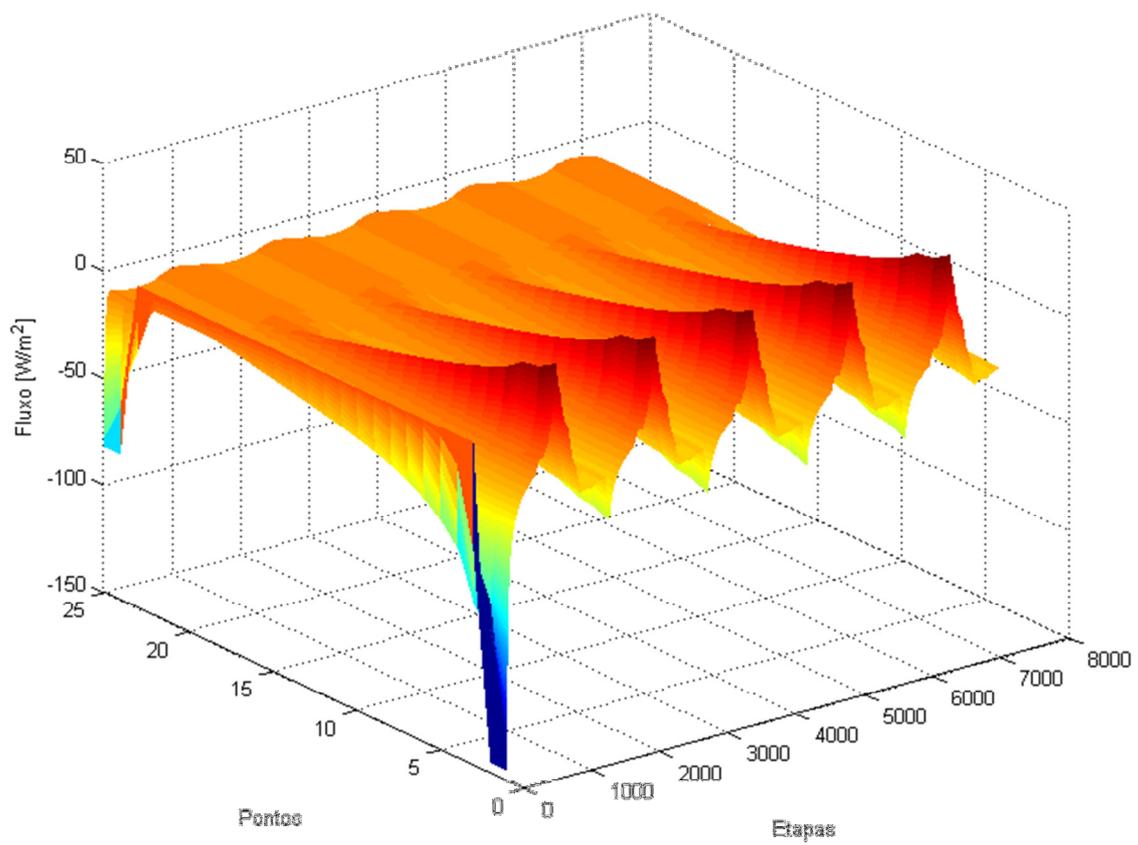


Figura D.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).

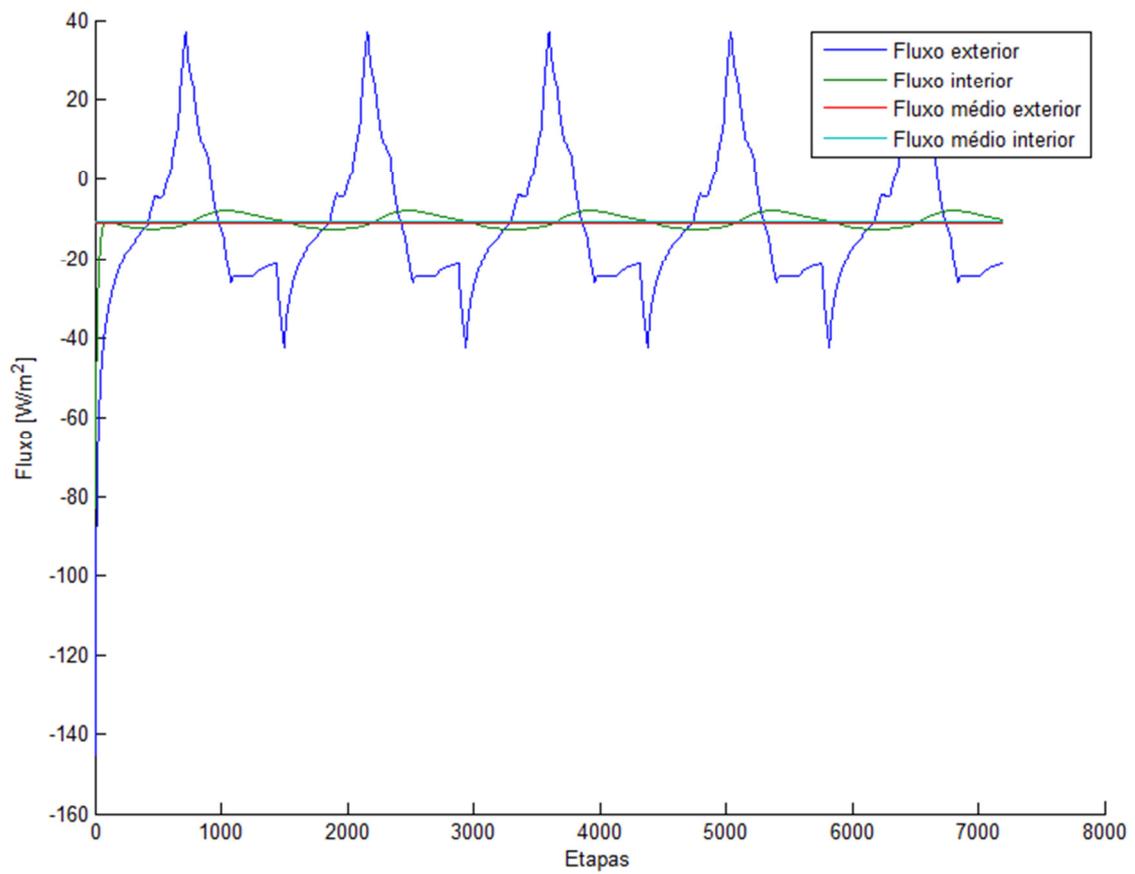


Figura D.7 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Sul).

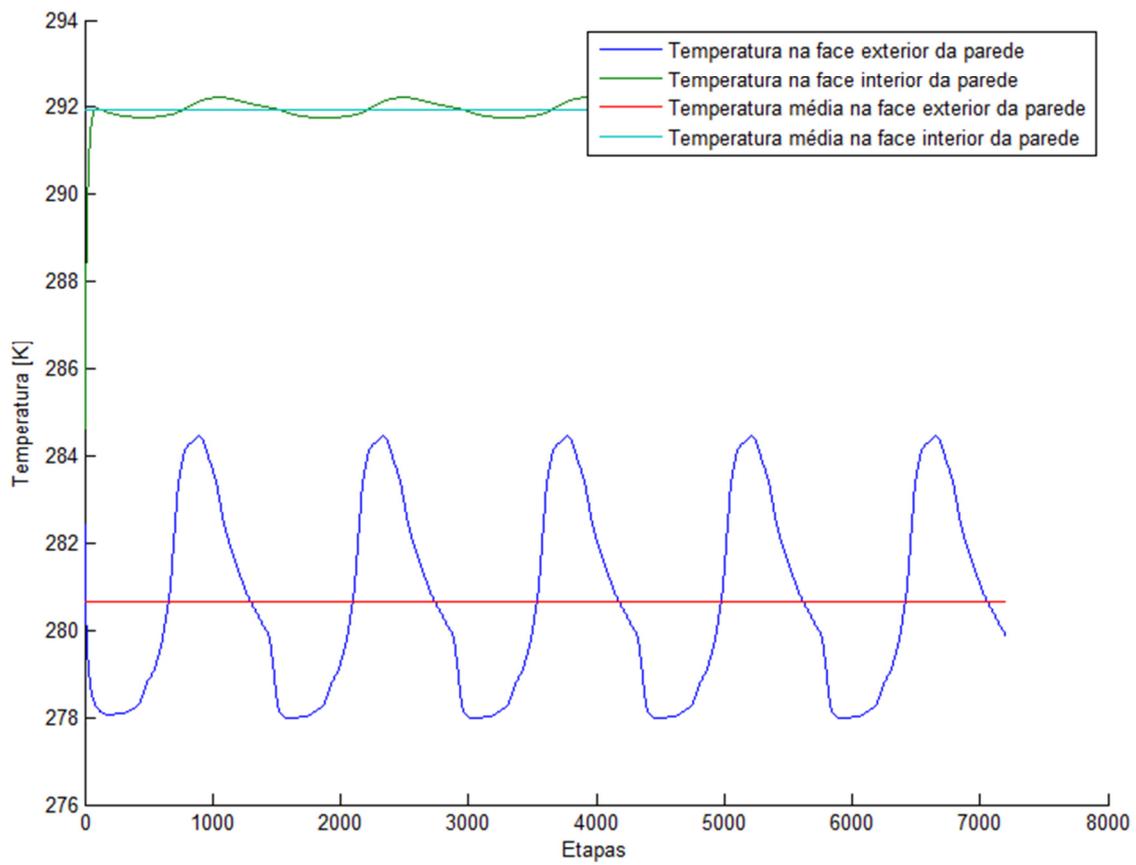


Figura D.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul).

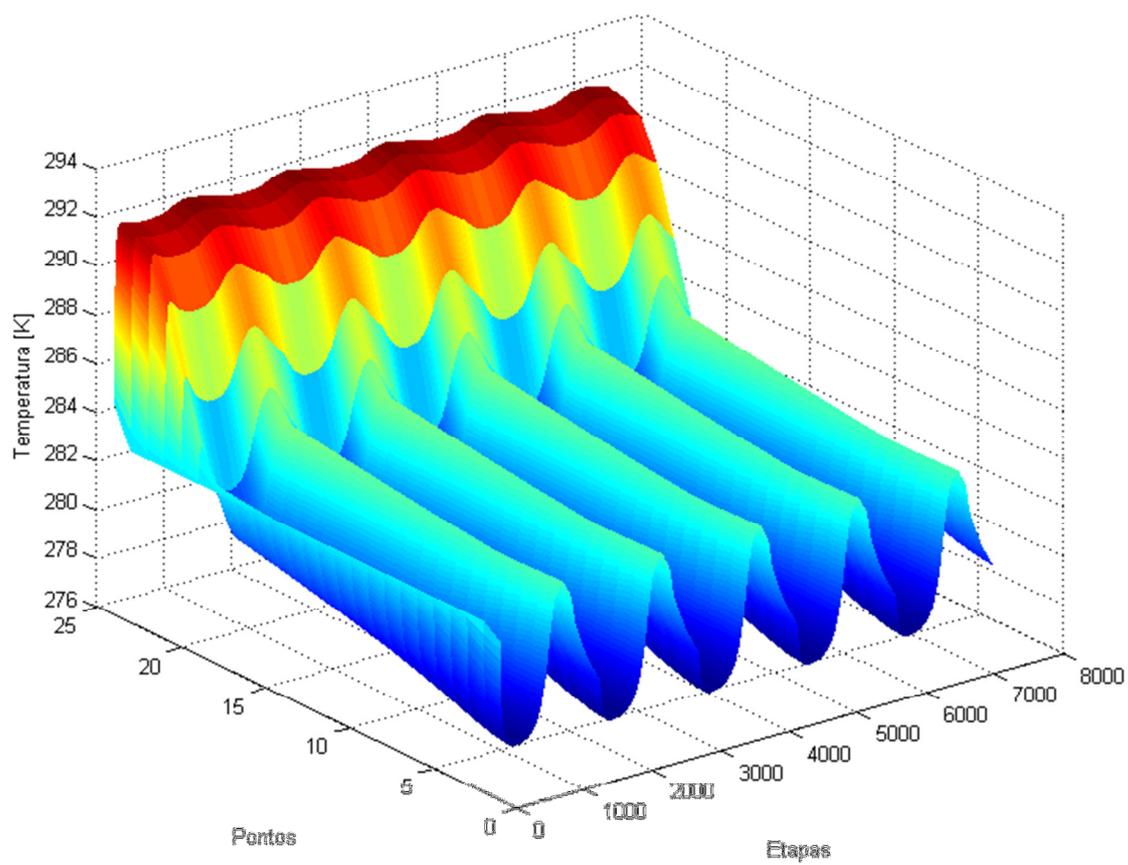


Figura D.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste).

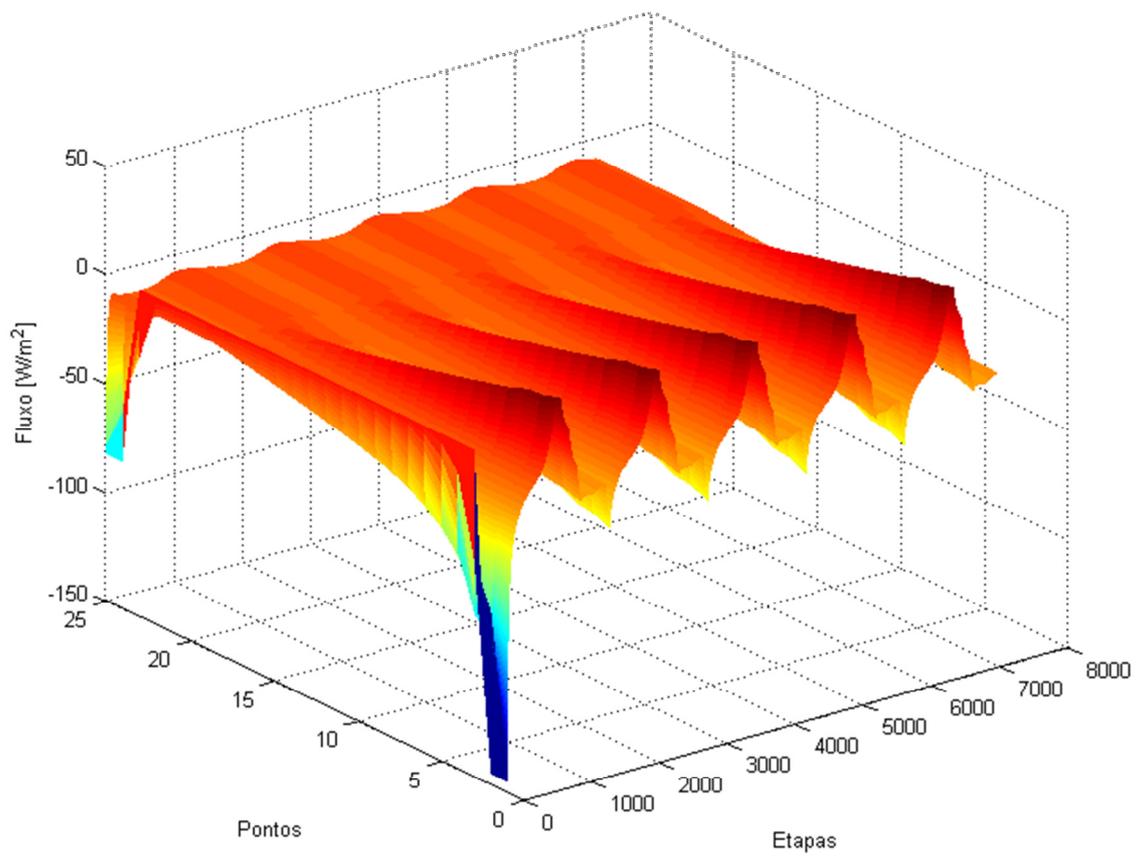


Figura D.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste).

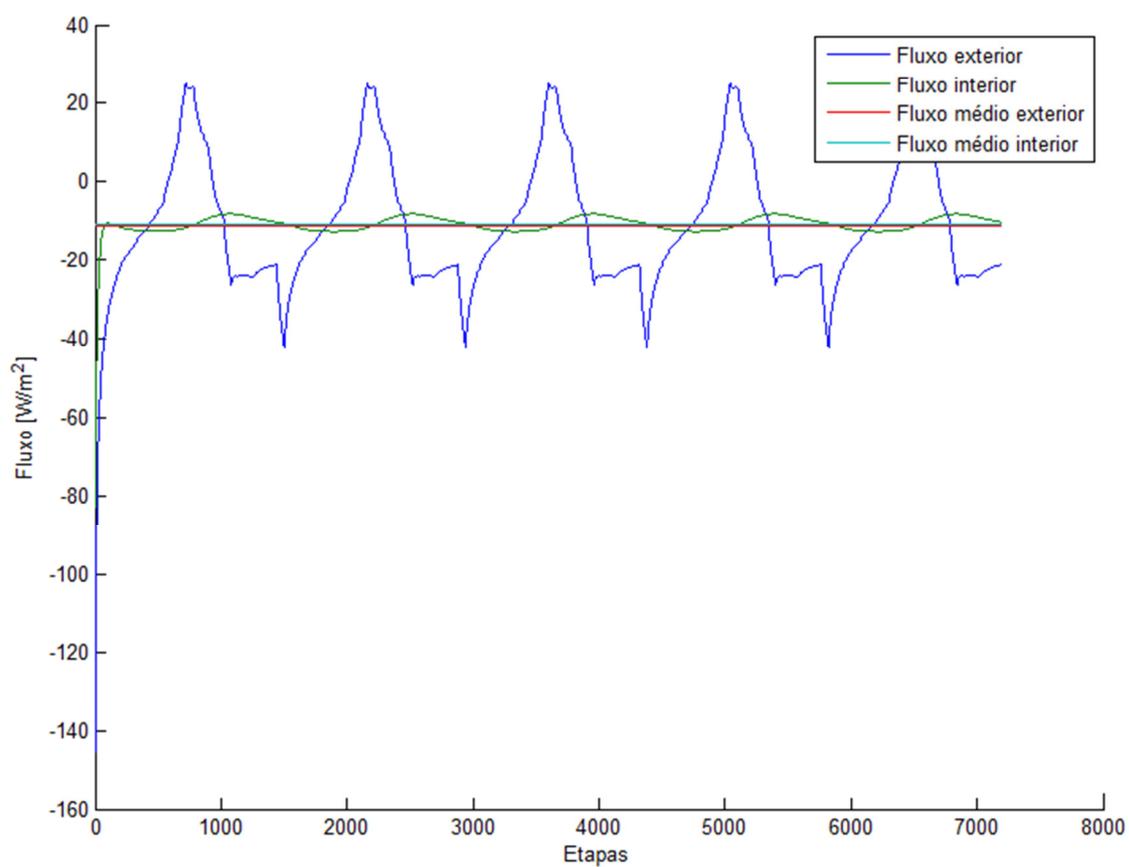


Figura D.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste).

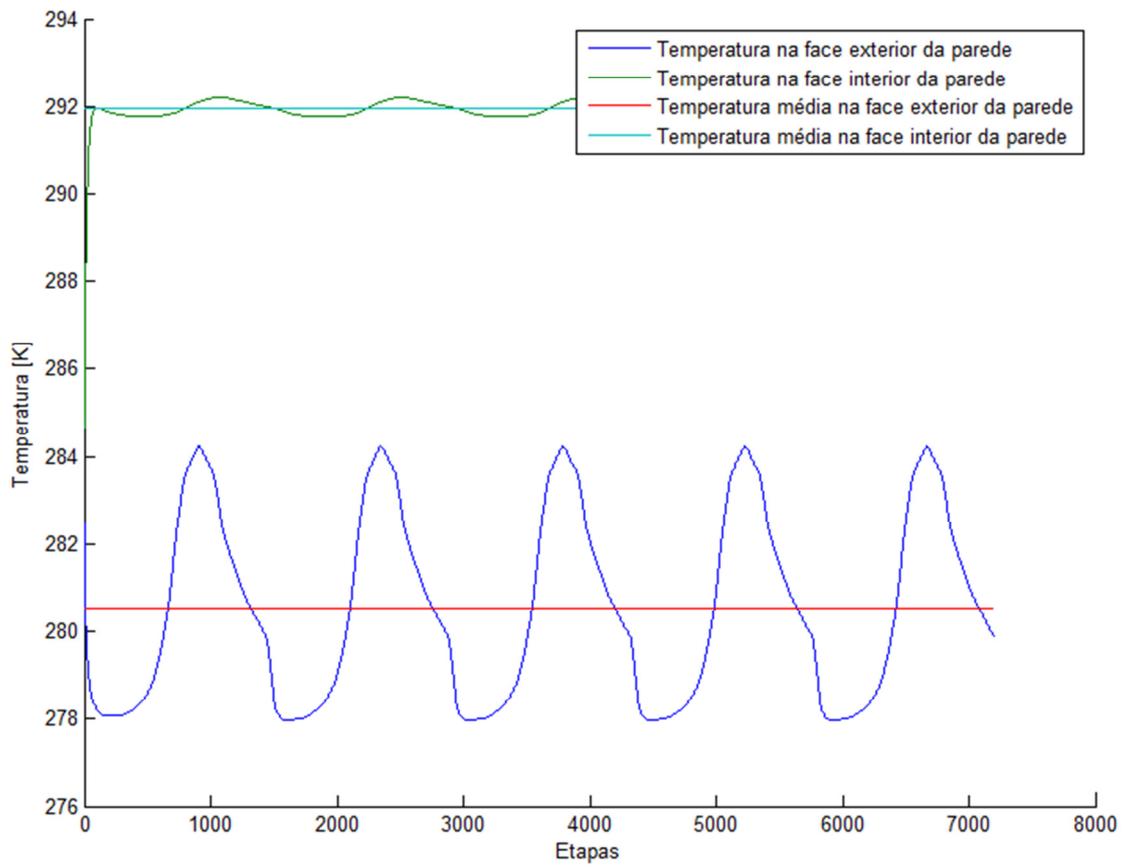


Figura D.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste).



## **Anexo E – Simulação para o dia 31 de julho**

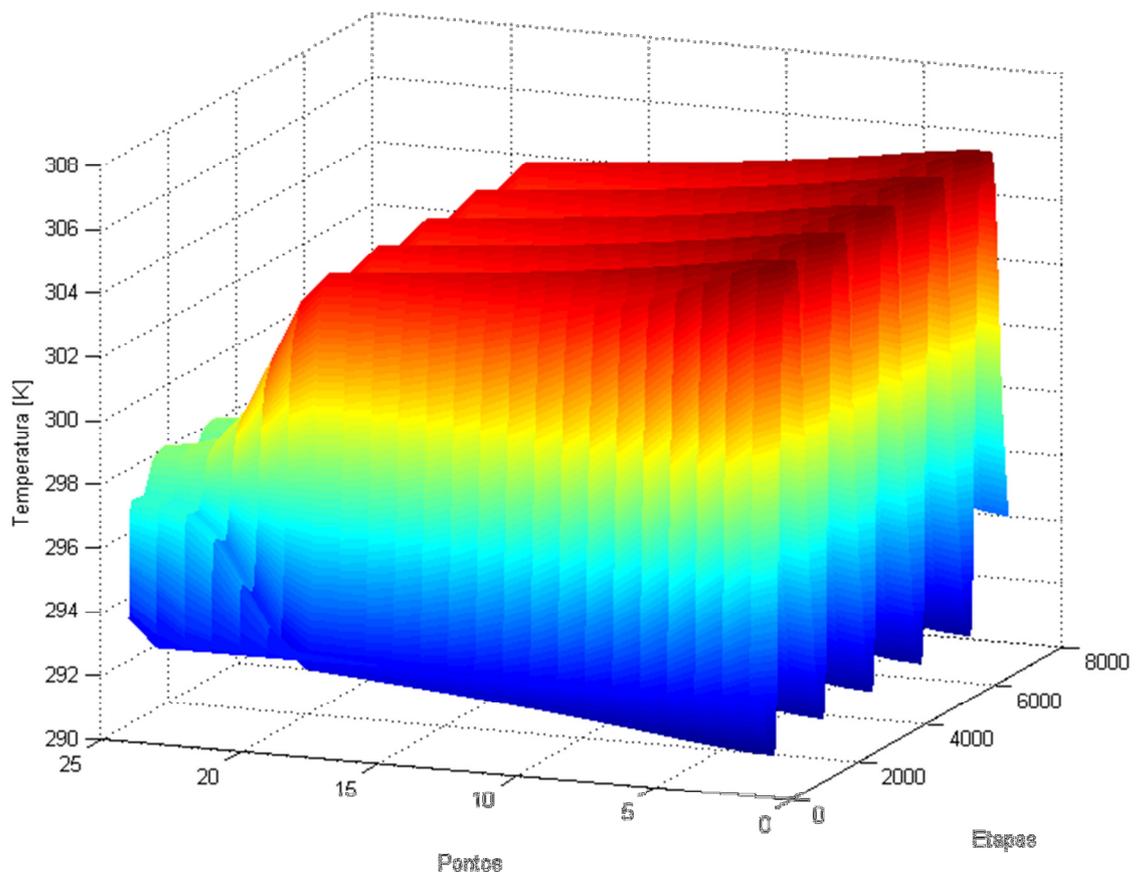


Figura E.1 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este).

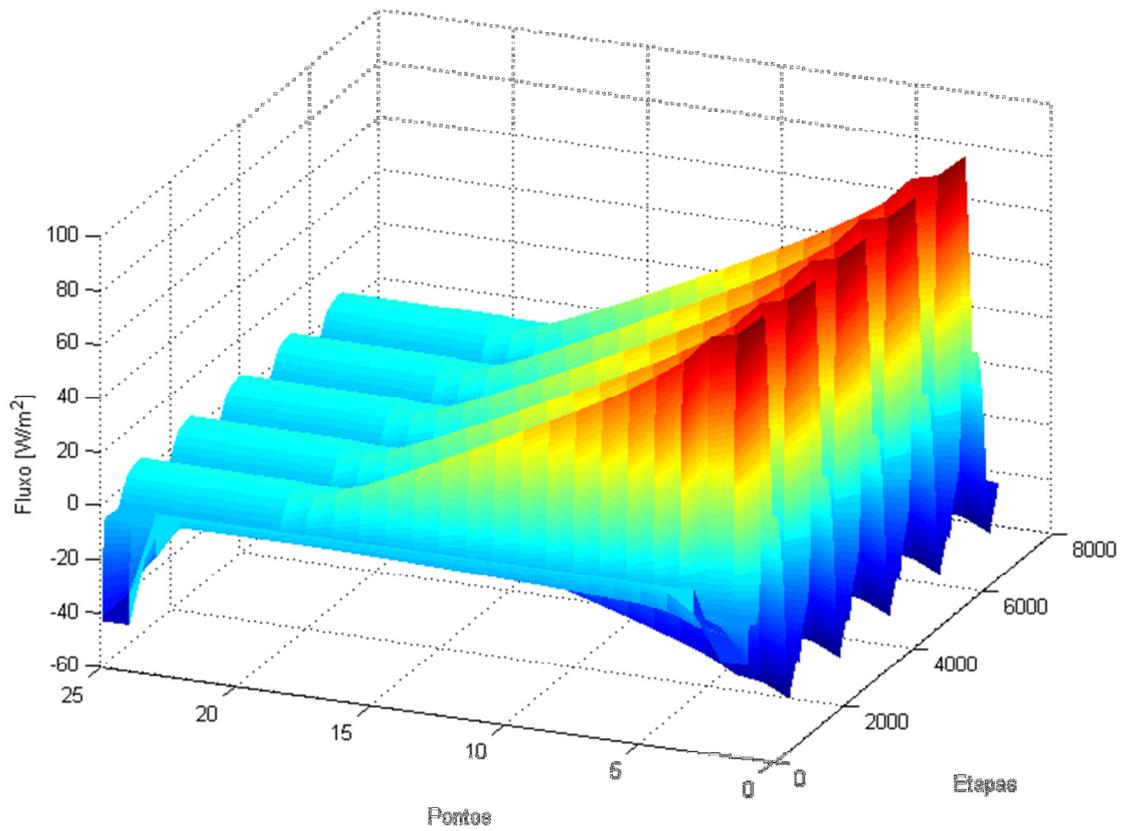


Figura E.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este).

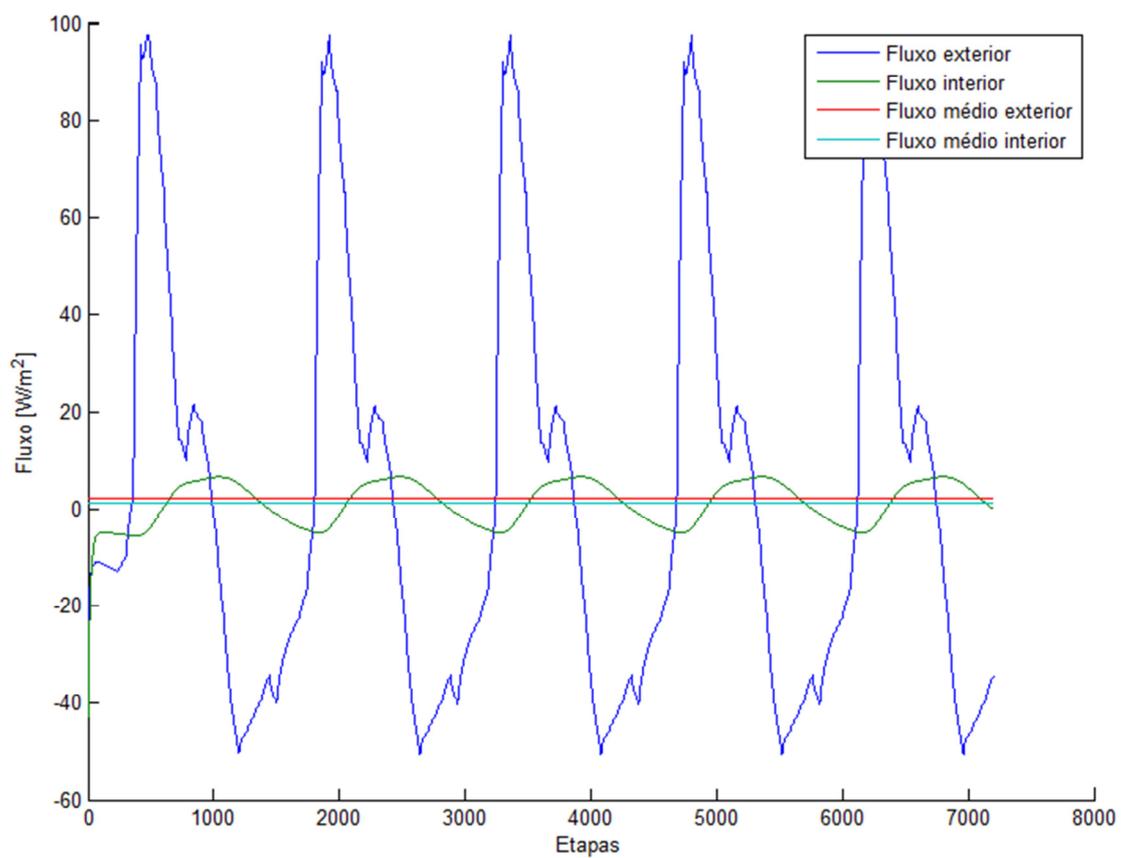


Figura E.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este).

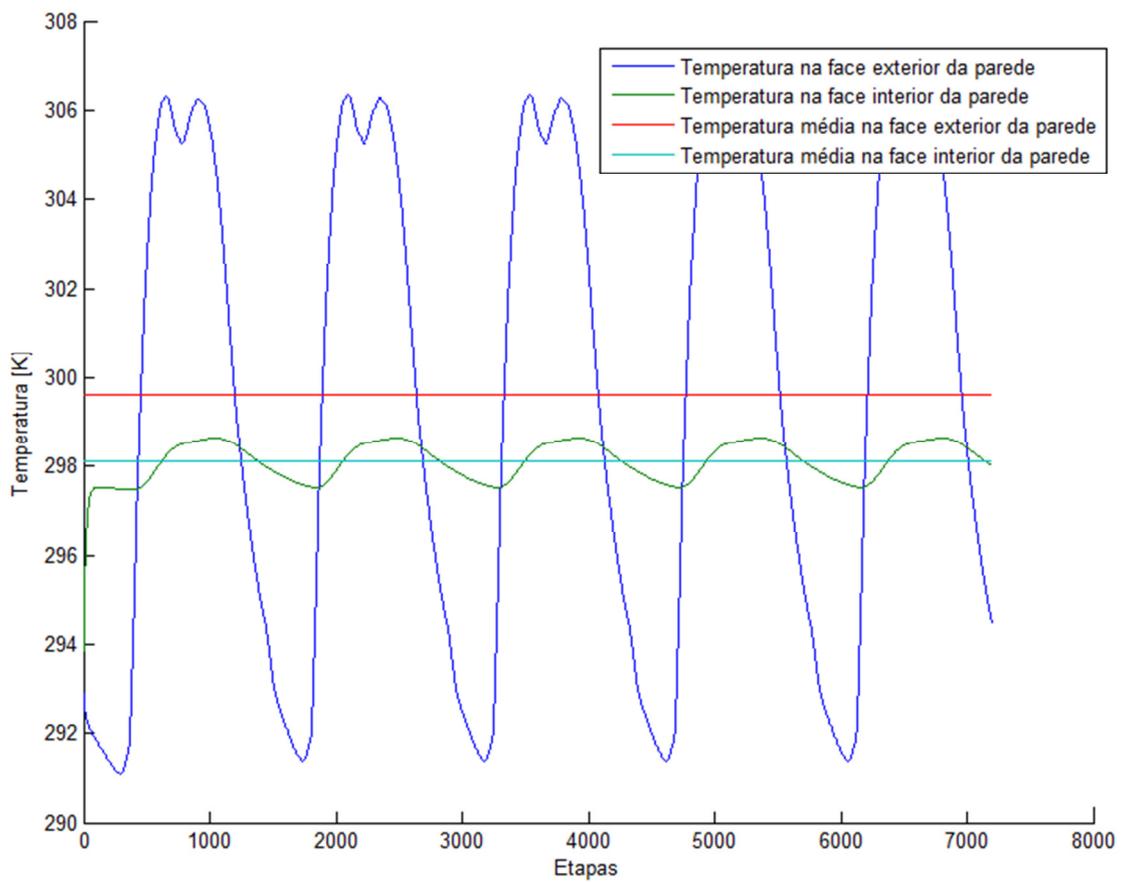


Figura E.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este).

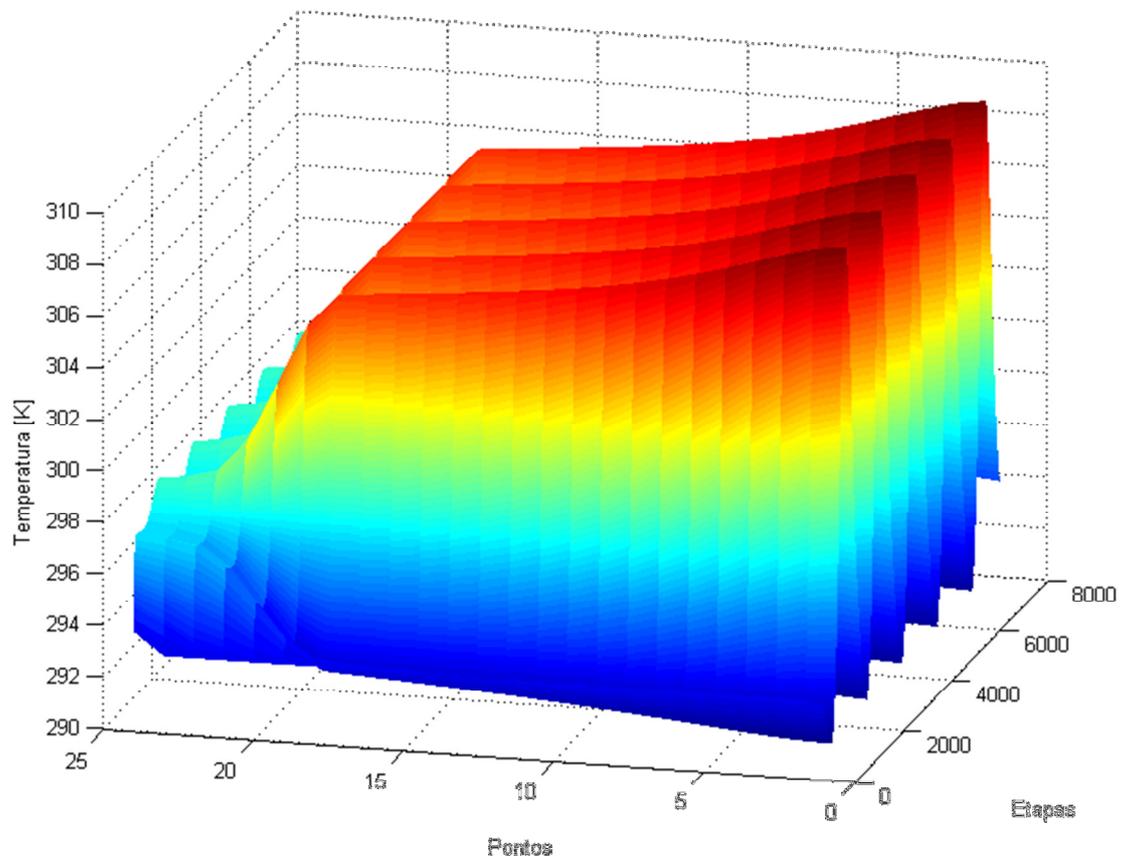


Figura E.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul).

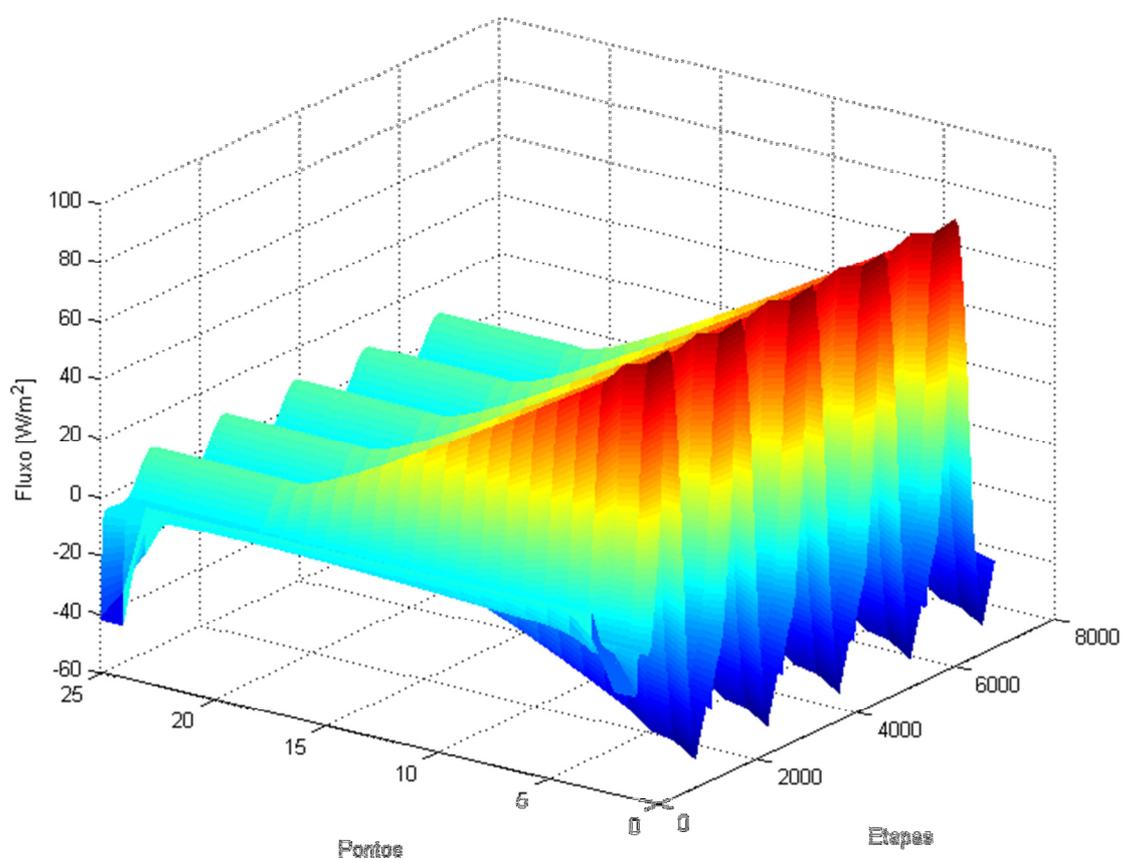


Figura E.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).

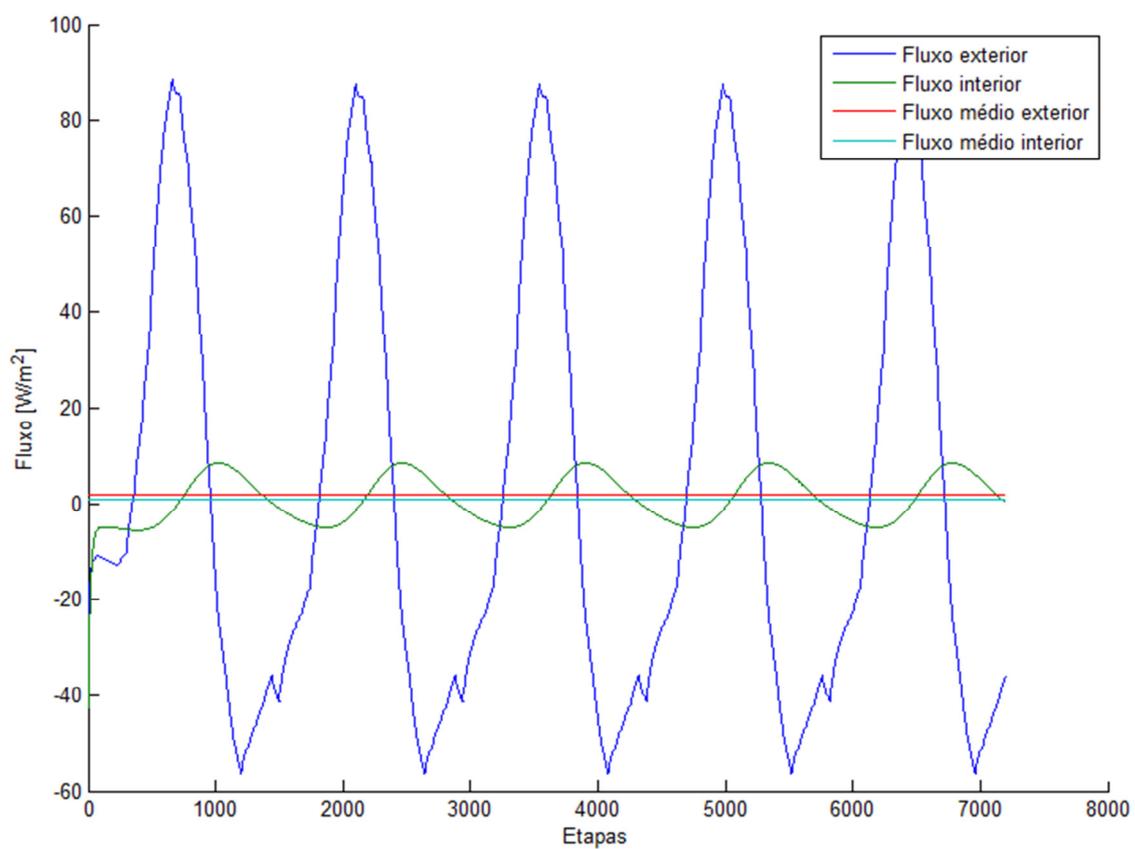


Figura E.7 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Sul).

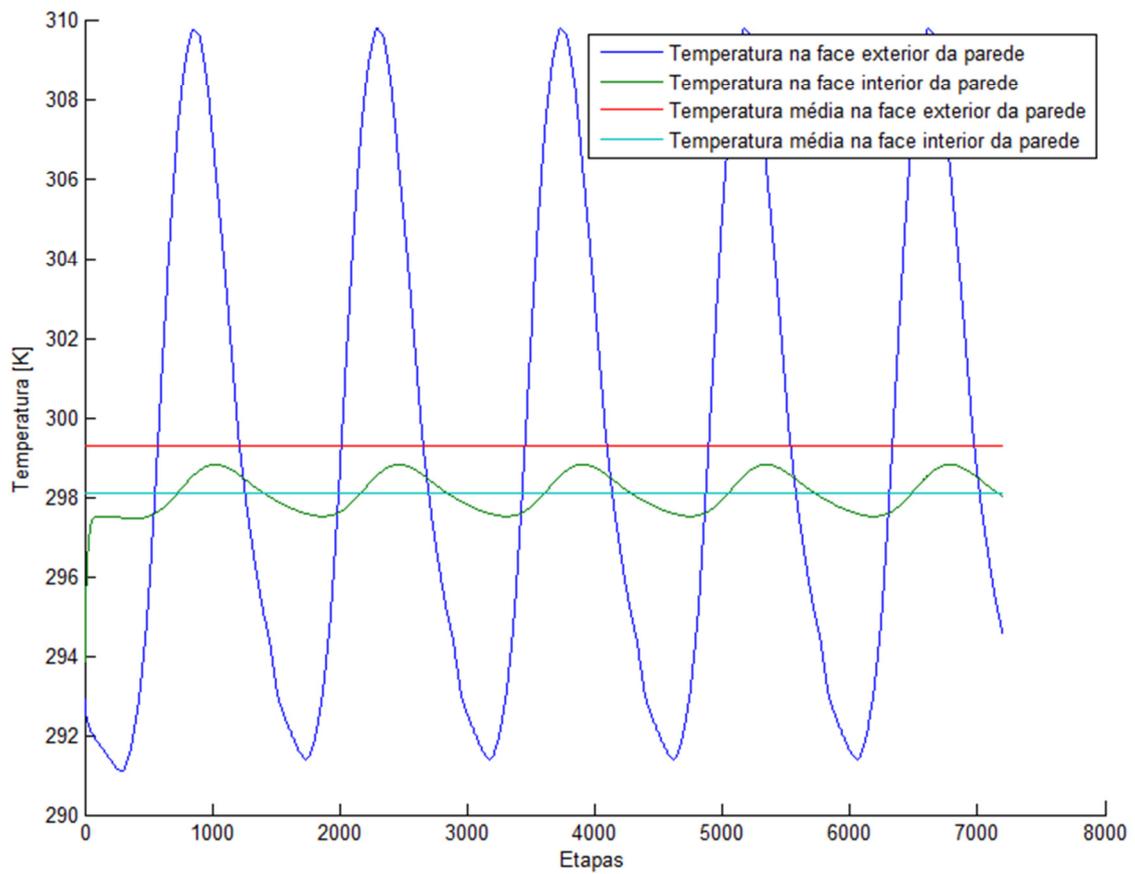


Figura E.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul).

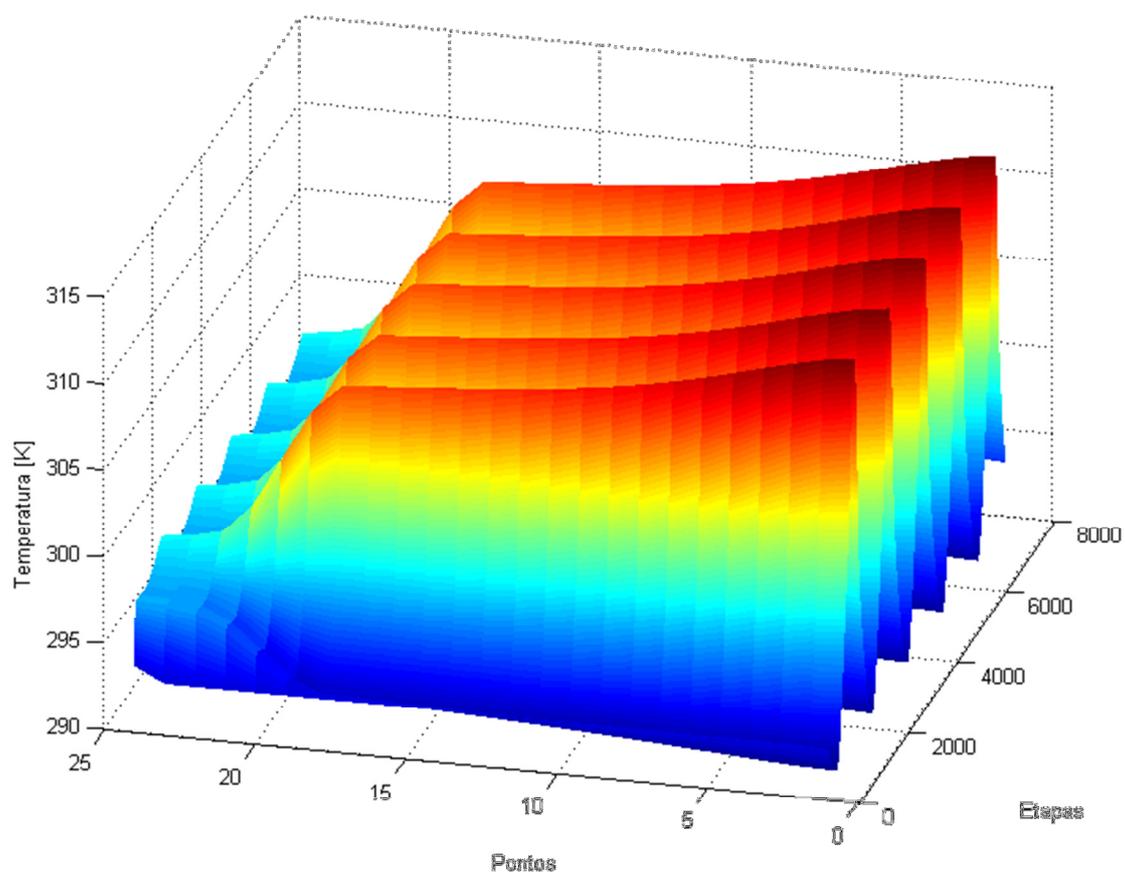


Figura E.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste).

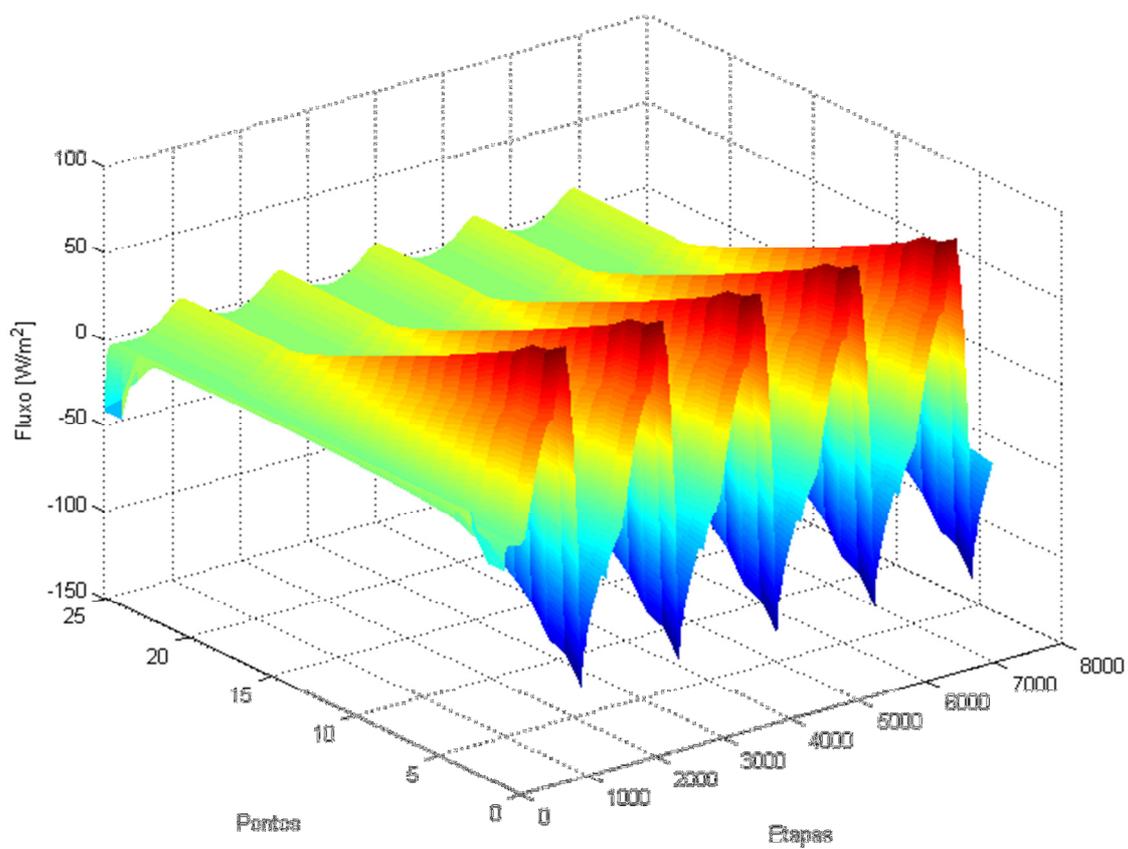


Figura E.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste).

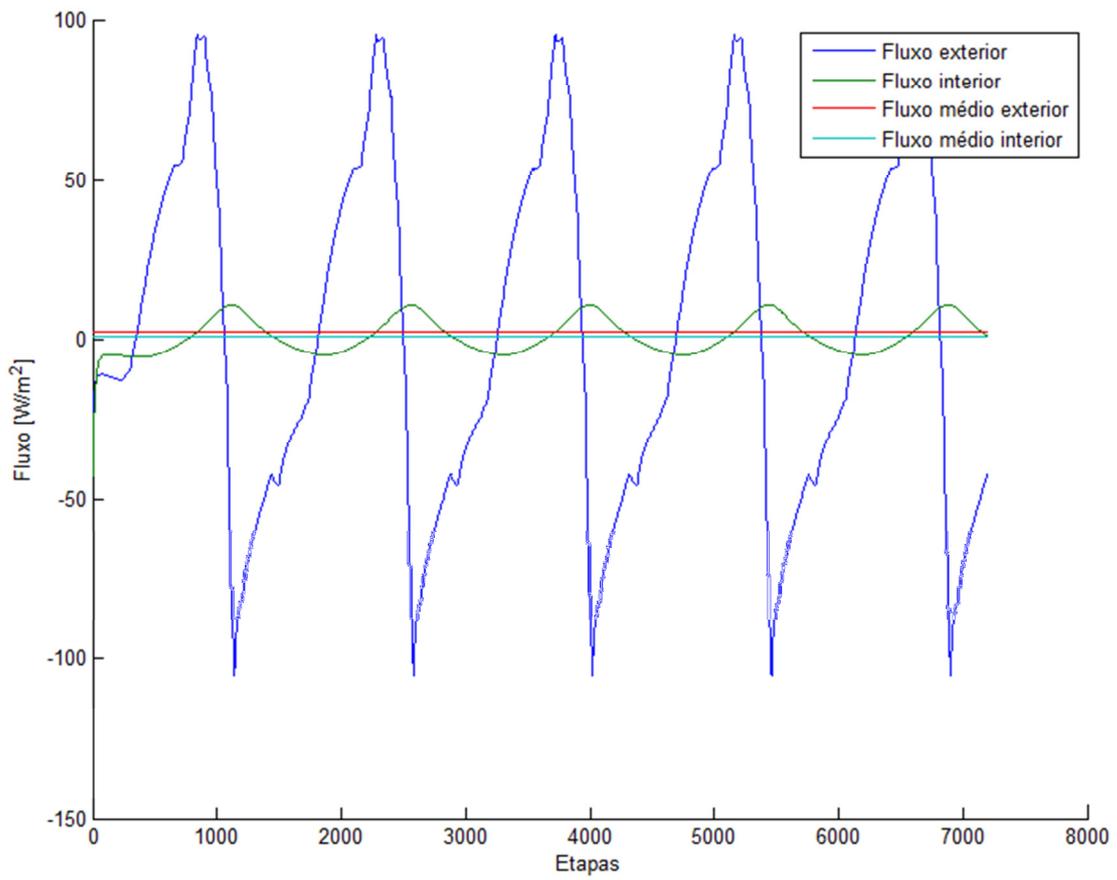


Figura E.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste).

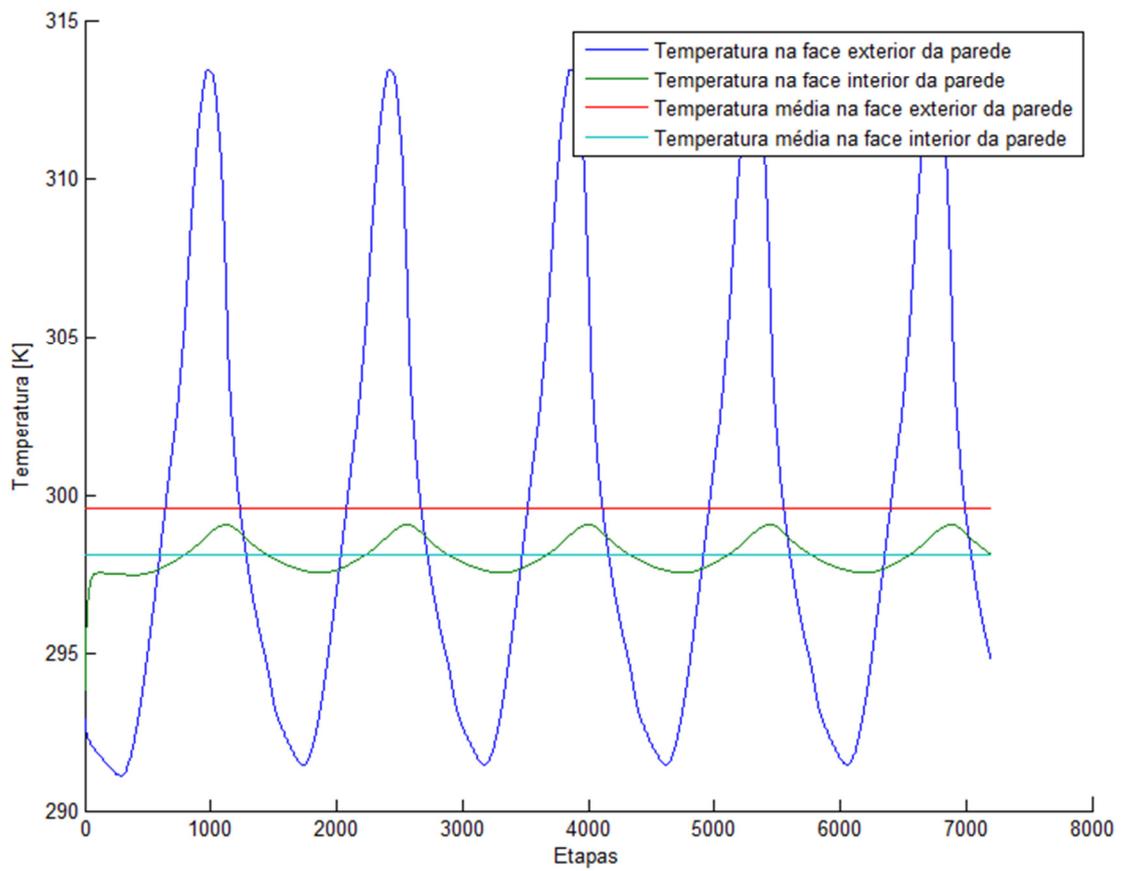


Figura E.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste).



## **Anexo F – Simulação para o dia 10 de agosto**

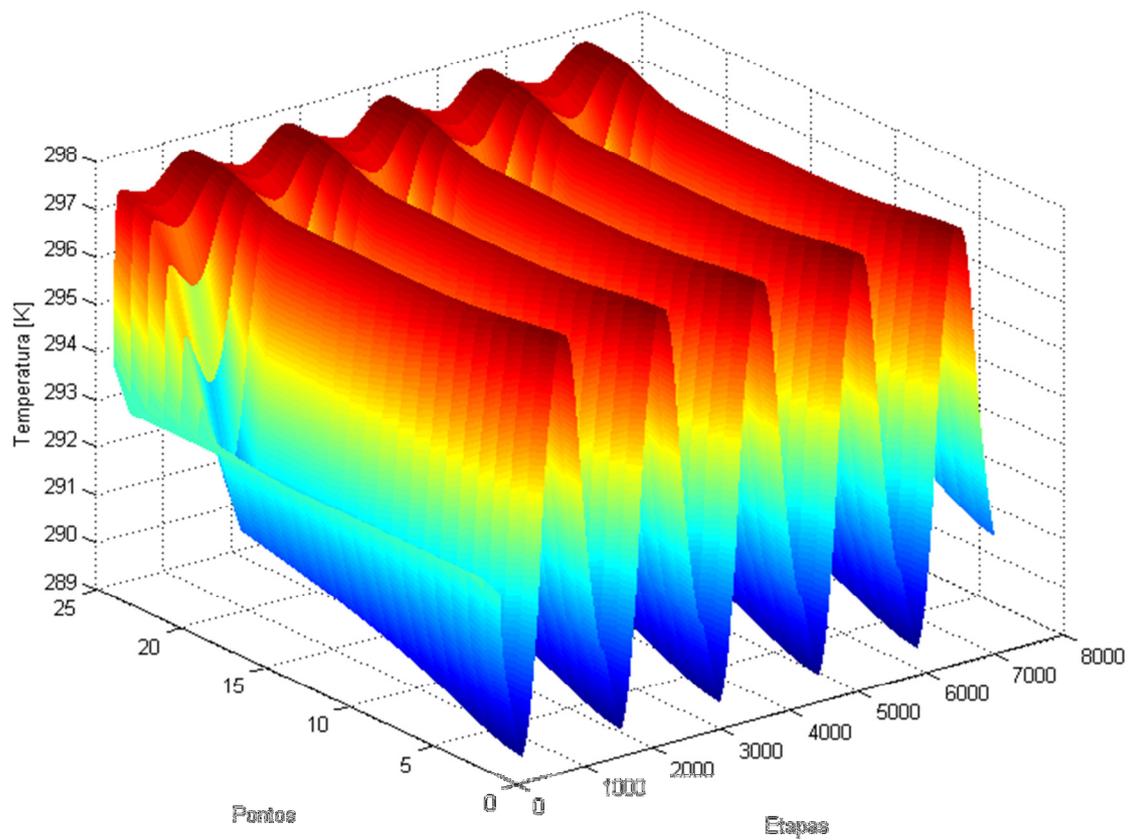


Figura F.1 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Este).

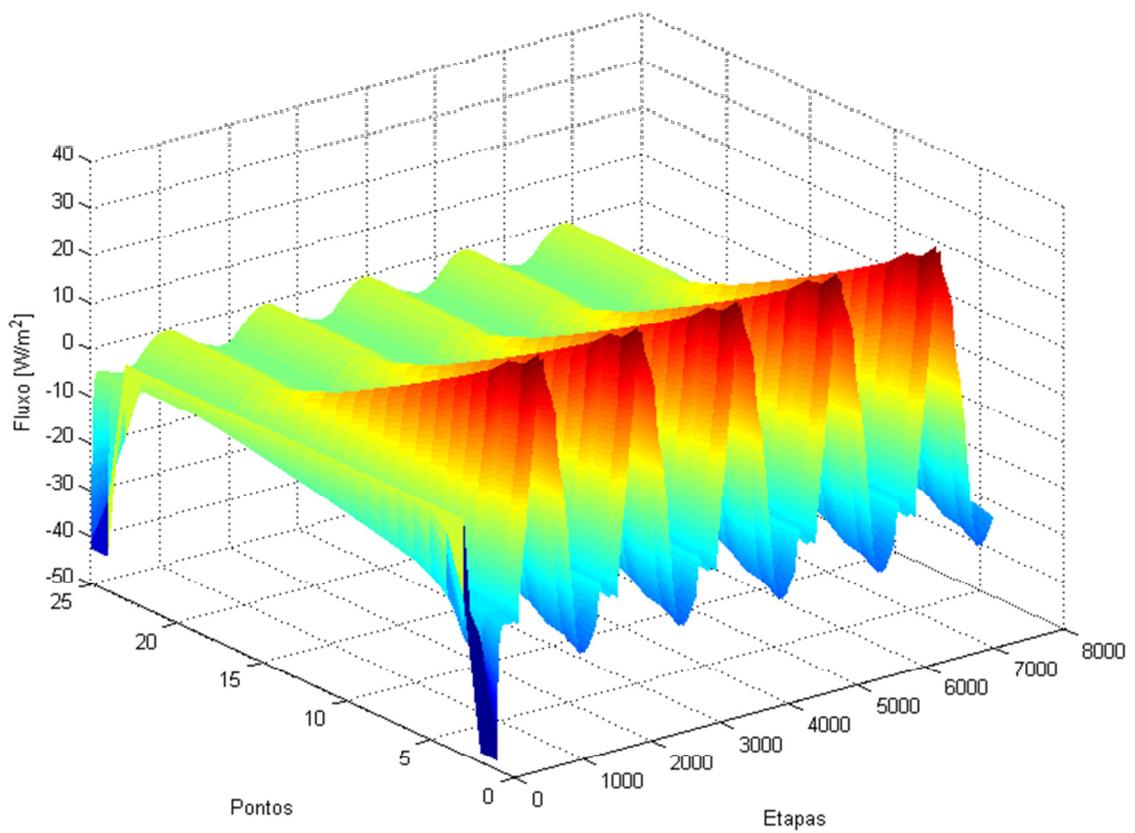


Figura F.2 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Este).

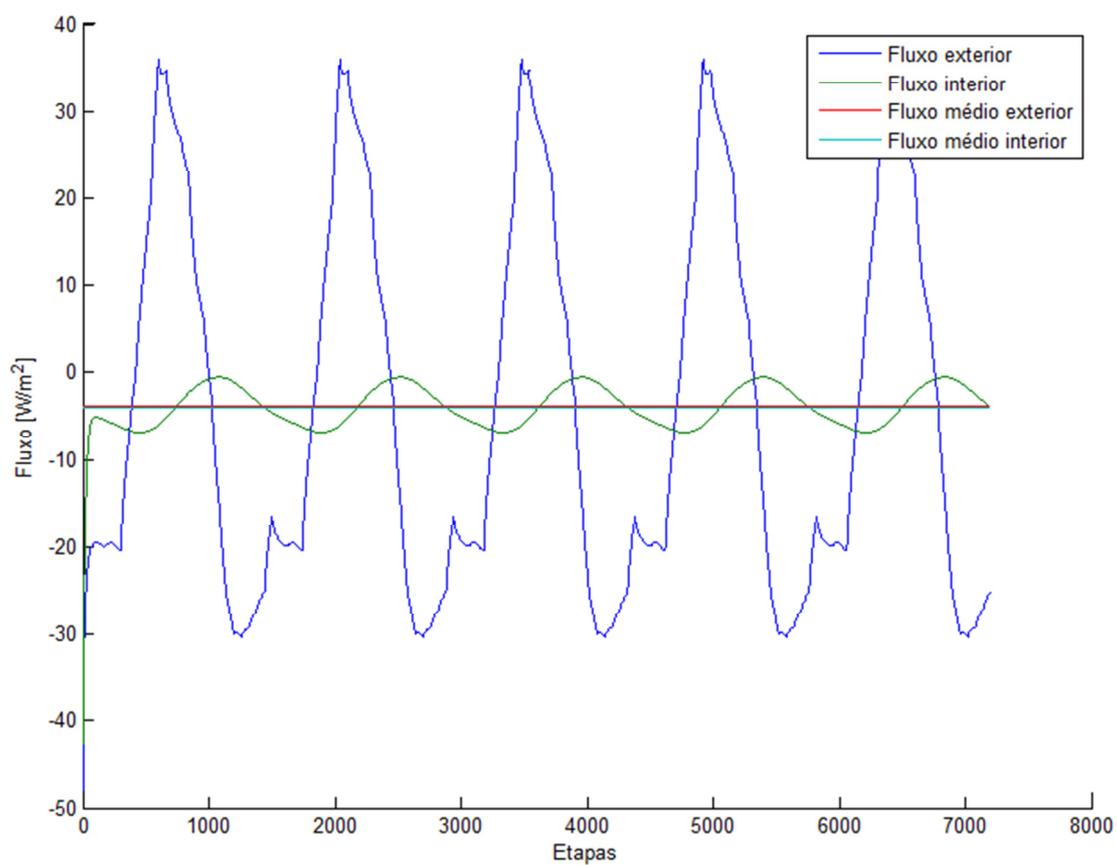


Figura F.3 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Este).

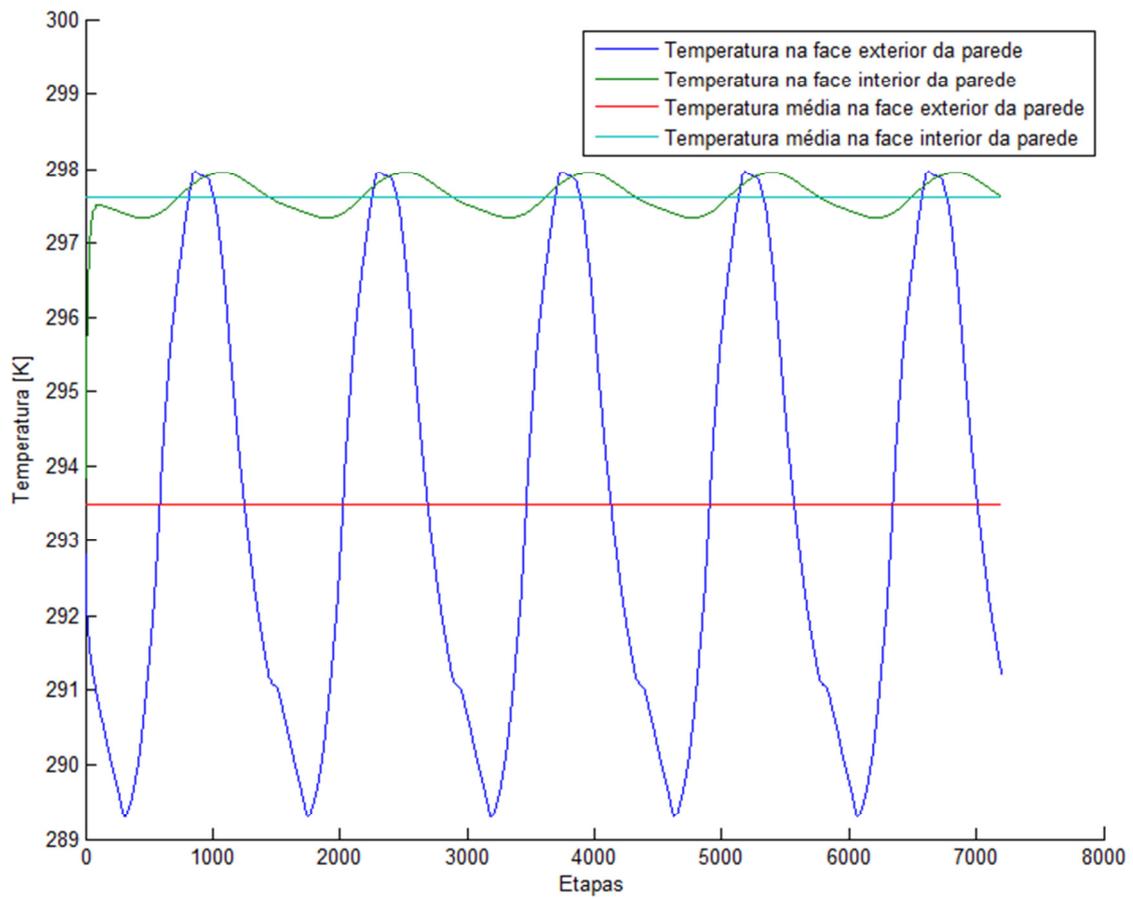


Figura F.4 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Este).

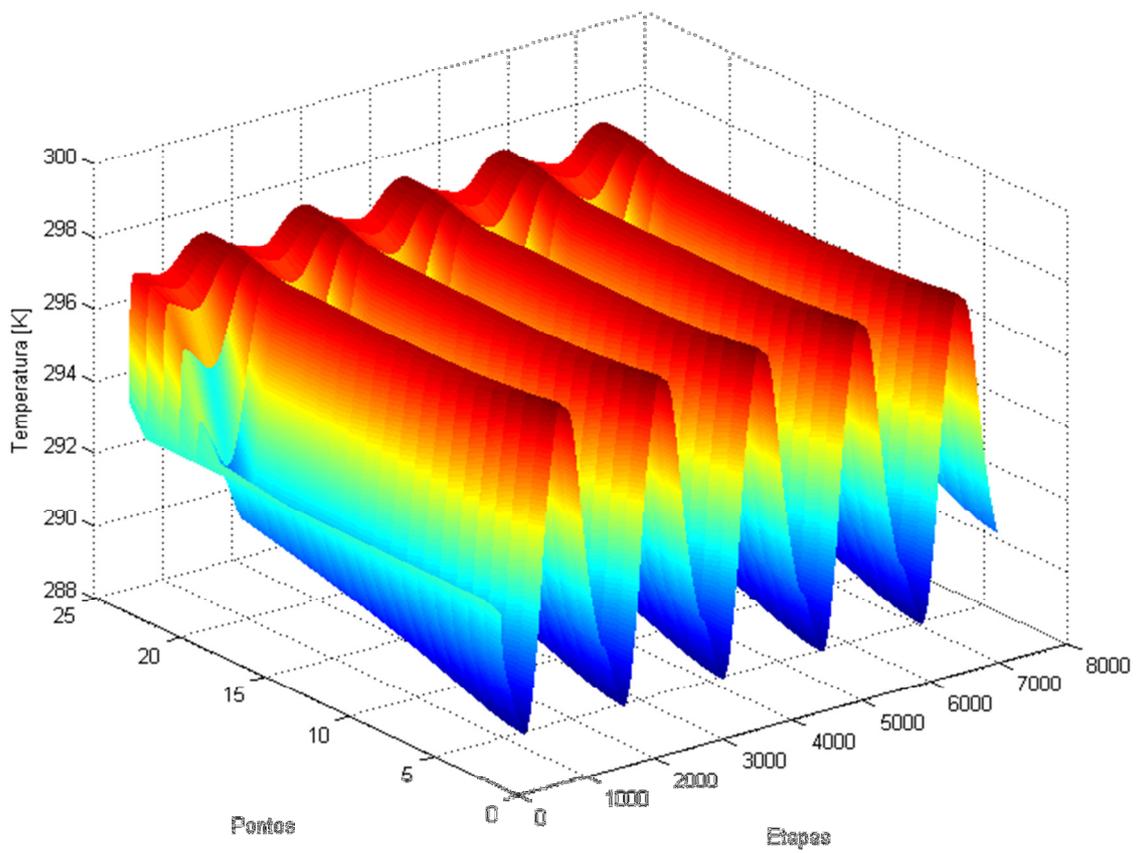


Figura F.5 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Sul).

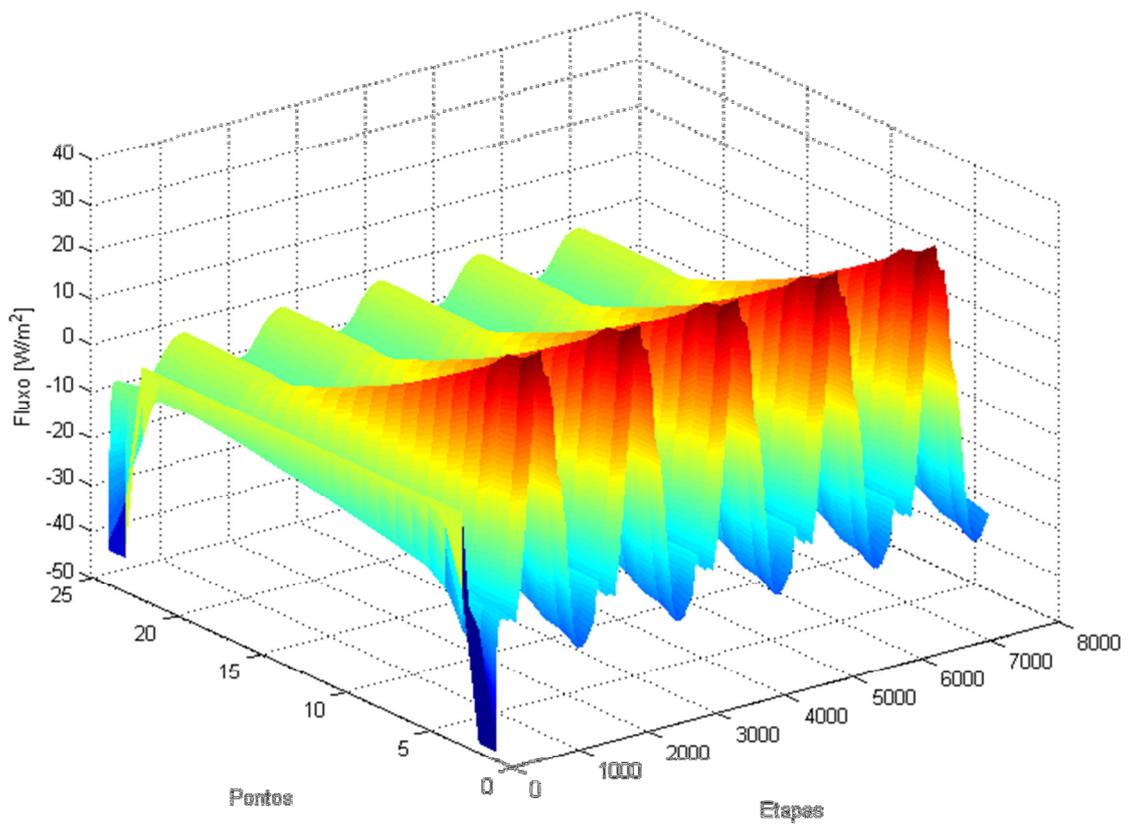


Figura F.6 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Sul).

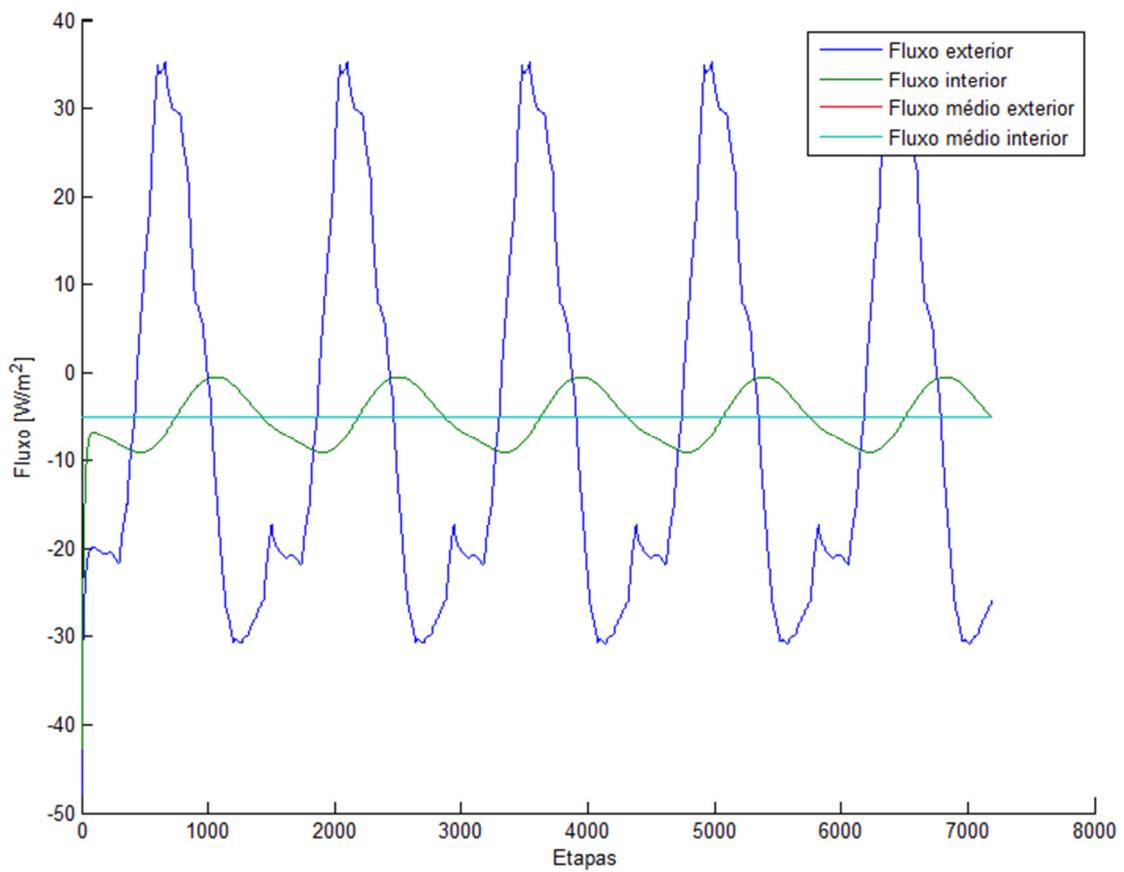


Figura F.7 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Sul).

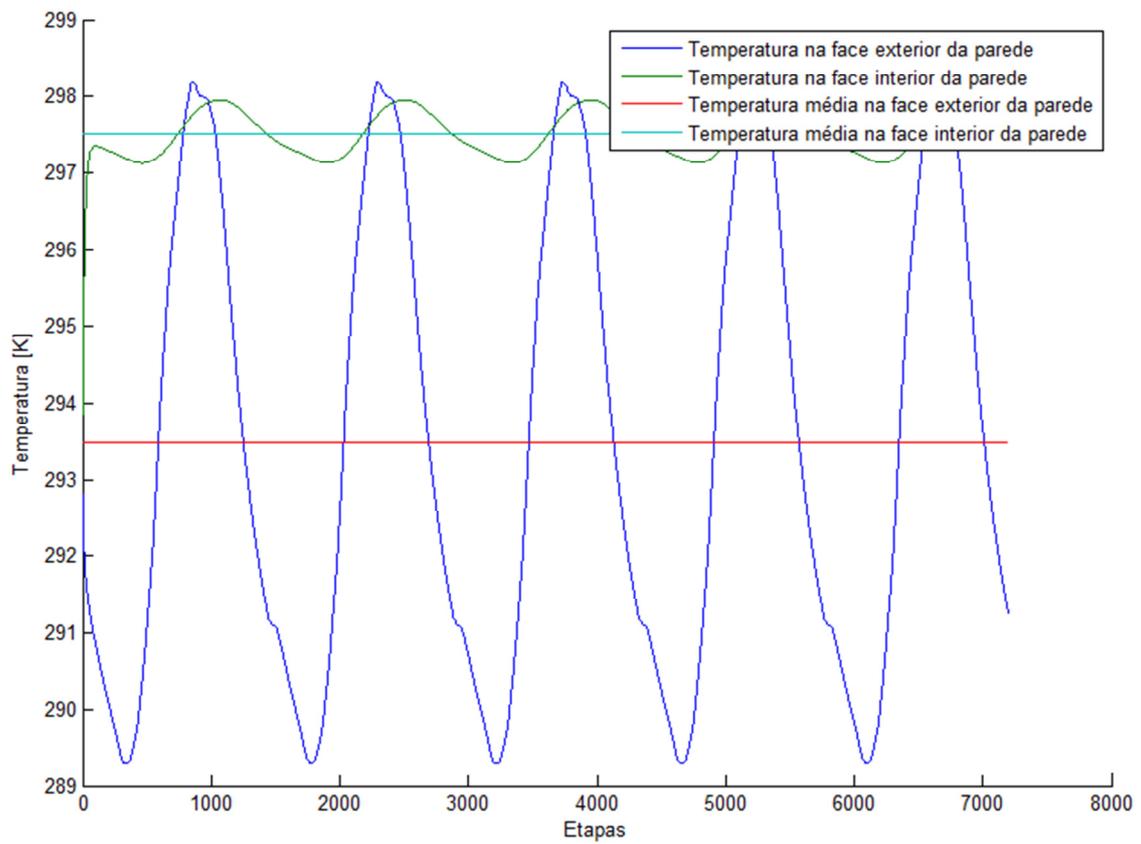


Figura F.8 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Sul).

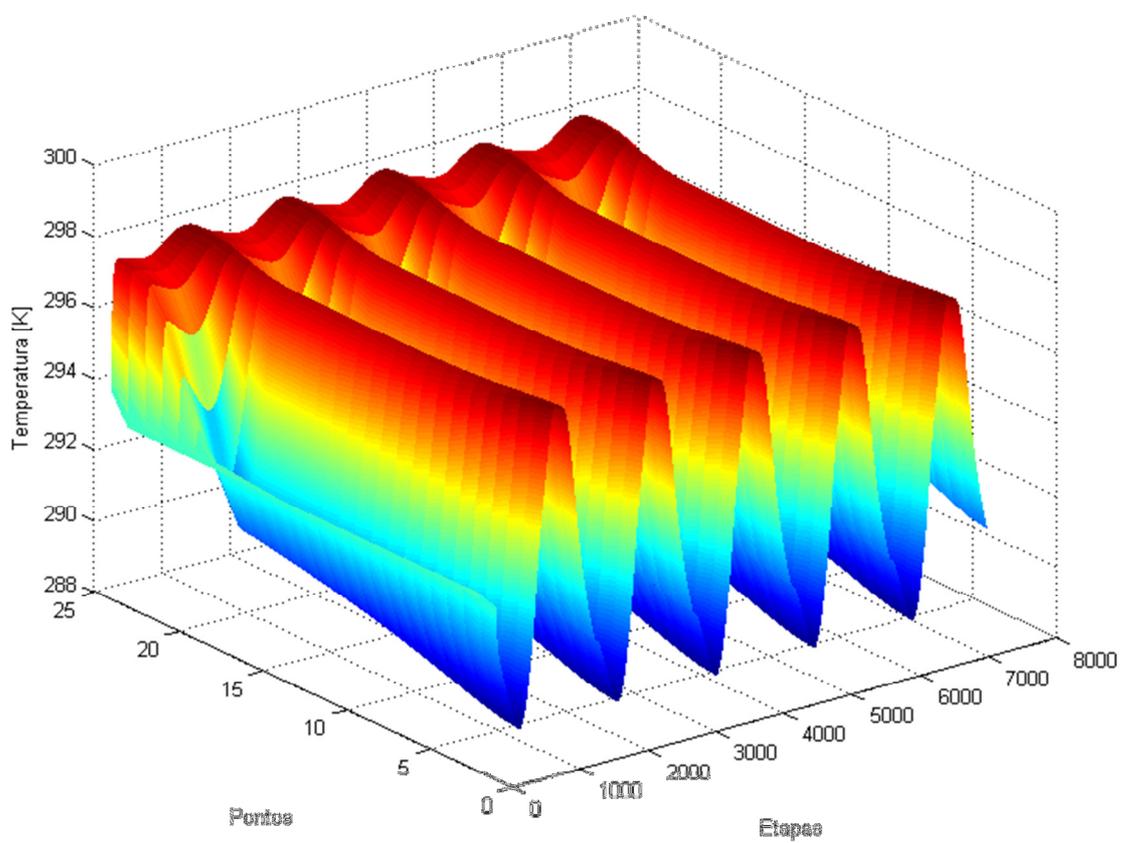


Figura F.9 - Variação da temperatura na parede ao longo do tempo (Oeste).

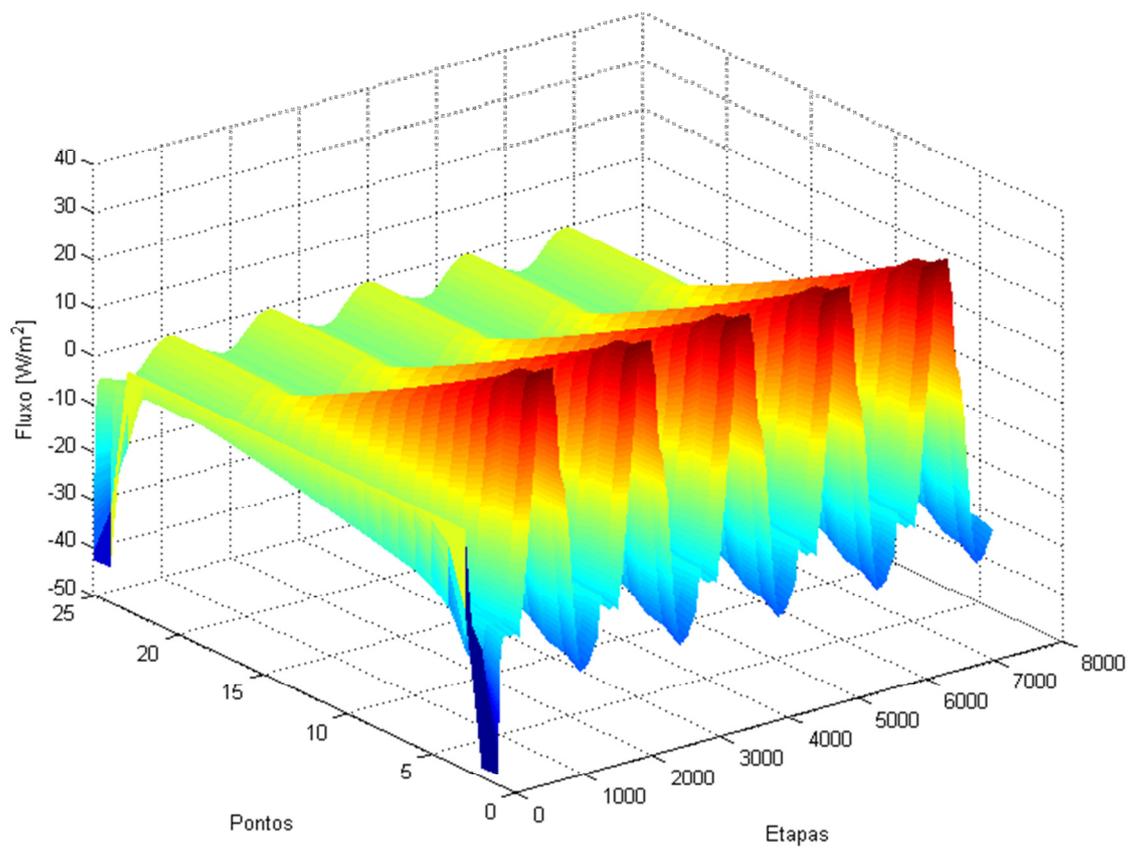


Figura F.10 - Variação do fluxo na parede ao longo do tempo (Oeste).

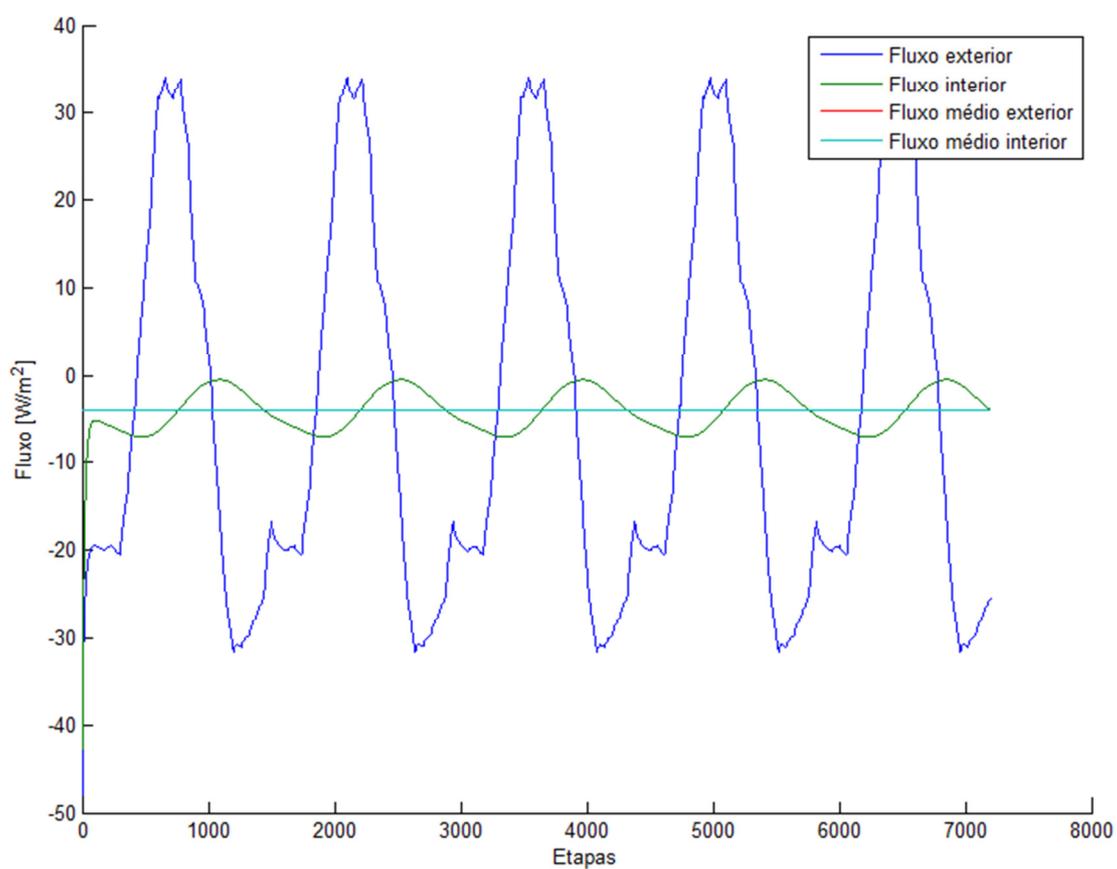


Figura F.11 - Variação do fluxo ao longo do tempo (Oeste).

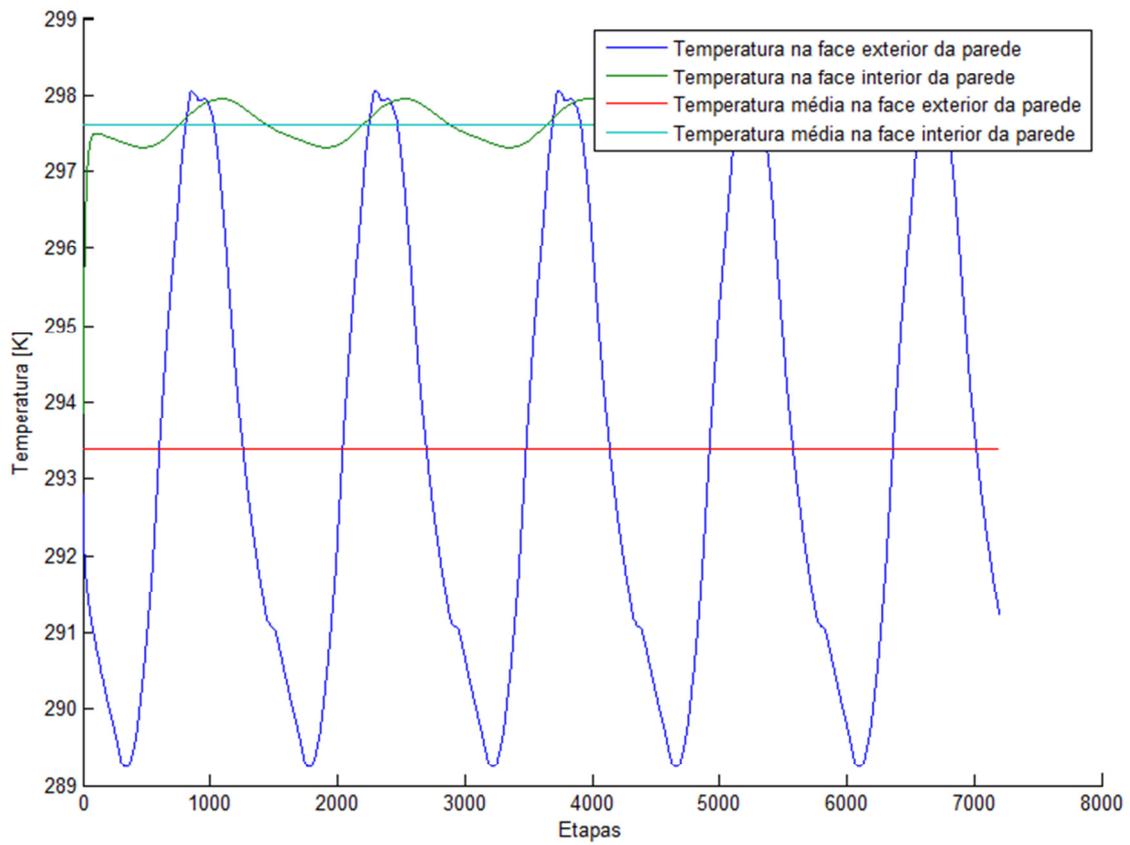


Figura F.12 - Variação da temperatura nas faces da parede ao longo do tempo (Oeste).