



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

# **Análise de Sensibilidade de Factores de Desempenho Térmico de Edifícios**

**João Daniel Lopes Ferreira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

## **Júri**

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel Alves Dias

Orientador: Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Orientador: Professora Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Vogal: Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Vogal: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

**Setembro de 2012**

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues, que foi o orientador do presente trabalho, pelo tempo, dedicação, conhecimentos e material de apoio fornecido, assim como pelas suas preciosas recomendações e esclarecimento de dúvidas suscitadas durante a elaboração do mesmo. À professora Cristina Matos Silva deixo também o meu agradecimento pela co-orientação do trabalho.

Deixo aqui um agradecimento à minha irmã, Catarina Ferreira, por ter revisto alguns dos meus textos e ajudado nalgumas traduções, a todos os meus amigos que de alguma forma colaboraram nesta dissertação, nunca esquecendo o papel que tiveram os meus pais ao longo de toda a minha educação e formação, permitindo que atingisse a conclusão do mestrado de Engenharia Civil, de que este trabalho constitui a sua dissertação final.

## Resumo

Devido ao enorme peso dos combustíveis fósseis nos processos de obtenção de energia, a procura de soluções construtivas mais eficientes torna-se essencial, quer ao nível da factura energética, quer em termos ambientais. As directivas nacionais e europeias visam controlar os processos construtivos, nomeadamente em relação a alguns factores que podem ter maior contributo para a redução das necessidades energéticas de um edifício. De forma a perceber em que medida esses factores influenciam o desempenho térmico e qual o nível de eficiência energética que permitem atingir, justifica-se o seu estudo aprofundado através de análises de sensibilidade orientadas para esse objectivo.

Após introdução de todos os conceitos teóricos ao nível do projecto passivo de edifícios e respectiva regulamentação nacional e europeia, apresentam-se os principais factores a ser estudados. Estes irão variar entre dois níveis pré-estabelecidos, através da técnica do desenho factorial, para seguidamente ser analisado o seu contributo na variação da resposta, em termos de desempenho térmico e energético, do fogo seleccionado para o estudo.

Os factores estudados são: coeficiente de transmissão térmica das zonas opacas e envidraçadas, relação entre área envidraçada e área total, inércia térmica, taxa de renovação do ar e transmitância solar. Verifica-se que a taxa de renovação do ar e a relação entre a área envidraçada e área total são os factores que contribuem de forma mais acentuada para a variação da resposta.

O estudo dos respectivos factores mencionados foi realizado através de um programa de simulação dinâmica - o *EnergyPlus* - que permitiu calcular os indicadores de desempenho considerados - necessidades de energia útil na estação de aquecimento e graus-hora de desconforto na estação de arrefecimento - para os níveis admitidos dos factores e, através dos resultados obtidos, elaborar um modelo matemático para estimar, de uma forma rápida, as respostas do fogo analisado, substituindo-se, assim, ao cálculo computacional, mais moroso e complexo de utilizar. Este modelo revelou um bom desempenho quando aplicado a valores dos factores diferentes dos utilizados para a sua dedução.

Palavras-chave: Factores, Regulamentação, Edifícios, *EnergyPlus*, Método factorial completo e fraccionado a dois níveis, Desempenho térmico, Necessidades de energia útil, Graus-hora de desconforto.

## Abstract

Due to the huge weight of fossil fuels in the process of obtaining energy, the demand for more efficient construction solutions is essential, not only in terms of the energy bill, but also in the environmental point of view. The European and national guidelines aim to control the constructive processes and pay a special attention to the factors with a greater contribution to reducing the building's energy needs. In order to realize to what extent these factors influence the thermal performance and what level of energy efficiency they meet, it is justified an in-depth study of sensitivity analyses to meet this objective.

After introducing all the theoretical concepts of the building's passive project and their national and European regulations, the main factors to be studied are explained. They will vary between two pre-defined levels, using the factorial design technique. Afterwards it will be analyzed their contribution to the variation of the response, in terms of energy and thermal performance, of the building selected for the study.

The factors studied are: thermal transmittance values of opaque and glazed zones, ratio between glass area and total area, thermal inertia, air changes and solar transmittance. Among the conclusions it has been verified that the air changes and the ration of glass area to total area are the factors that have a major contribute to the variation of the response.

The study of the mentioned factors was accomplished through a dynamic simulation program - the *EnergyPlus* - which allowed the calculation of the performance indicators – taken as the useful energy need in the heating season and the degree-hours of discomfort in the cooling season – for the accepted levels of the factors, and through the results allowed the creation of a mathematical model to estimate, in a fast manner, the responses of the building examined, substituting therefore the computational analysis, more lengthy and complex to use. This model showed a good behavior when applied to different values of the factors used for its deduction.

Keywords: Factors, Regulation, Buildings, *EnergyPlus*, Two level full and fractional factorial design, Thermal performance, Useful energy needs, Degree-hours of discomfort.

# Índice geral

<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1-Enquadramento do tema e motivações do estudo.....	1
1.2 - Objectivos e metodologia do estudo.....	2
1.3 - Plano de trabalho .....	3
<b>Capítulo 2 – Eficiência Energética e Projecto Passivo de Edifícios .....</b>	<b>5</b>
2.1 - Introdução .....	5
2.2 - Consumo de energia em edifícios .....	6
2.3 - Regulamentação energética de edifícios .....	8
2.3.1 - Directivas Europeias de desempenho energético dos edifícios.....	8
2.3.2 - Directivas Europeias de desempenho energético dos edifícios aplicadas em Portugal .....	10
2.4 - Princípios de projecto passivo de edifícios .....	13
2.4.1 - Exposição Solar .....	14
2.4.2 - Forma e dimensão do edifício.....	16
2.4.3 - Inércia térmica .....	17
2.4.4 - Isolamento térmico.....	18
2.4.5 - Renovação do ar.....	20
<b>Capítulo 3 – Análise de sensibilidade e desenho factorial.....</b>	<b>23</b>
3.1 - Análise de sensibilidade .....	23
3.1.1 - Método diferencial de análise da sensibilidade.....	24
3.1.2 - Análise da sensibilidade a uma variável de cada vez .....	26
3.1.3 - Desenho factorial .....	26
3.1.4 - Índice de sensibilidade .....	27
3.2 - Desenho de experiências.....	27
3.2.1 - Noção de espaço experimental.....	28
3.2.2 - Noção de modelação matemática .....	30
3.3 – Plano factorial completo a dois níveis .....	32
3.3.1 - Equação do modelo .....	35
3.3.2 - Efeito principal e global de um factor .....	36
3.3.3 - Efeito de interacção.....	39
3.4 - Plano fraccionado a dois níveis .....	40
3.4.1 - Plano de Resolução III .....	43
3.4.2 - Plano de resolução IV .....	44

3.4.3 - Plano de resolução V .....	47
<b>Capítulo 4 – Apresentação do caso de estudo e dos respectivos factores em avaliação.....</b>	<b>49</b>
4.1 – Introdução .....	49
4.2 – Descrição do edifício e respectivos factores .....	50
4.2.1 – Edifício .....	50
4.2.2 - Factores .....	52
4.2.2.1 – Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas das paredes exteriores...53	
4.2.2.2 – Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados .....	55
4.2.2.3 – Relação entre área envidraçada e área total na parede Sul .....	55
4.2.2.4 – Número de renovações horárias .....	56
4.2.2.5 - Inércia térmica .....	57
4.2.2.6 - Factor Solar dos vãos orientados a Sul .....	58
4.2.2.7 – Apresentação dos níveis .....	60
4.3 – Análise dinâmica do comportamento térmico dos edifícios.....	62
4.3.1 – O EnergyPlus .....	62
<b>Capítulo 5 – Resultados .....</b>	<b>65</b>
5.1 – Funções objectivo .....	65
5.2 – Análise da estação de aquecimento.....	66
5.2.1 Significância dos efeitos e validação do modelo.....	70
5.2.2 Análise dos efeitos principais e interações.....	72
5.3 – Análise da estação de arrefecimento.....	74
5.3.1 Significância dos efeitos e validação do modelo.....	77
5.3.2 Análise dos efeitos principais e interações.....	79
<b>Capítulo 6 - Conclusões e propostas de estudos futuros .....</b>	<b>82</b>
6.1 – Conclusões .....	82
6.2 – Propostas de estudos futuros .....	85
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>87</b>
<b>Sites consultados .....</b>	<b>89</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1 – Repartição do consumo energético pelos vários sectores de actividade [7] .....	6
Figura 2.2 – Repartição do consumo de energia nos edifícios residenciais em Portugal [8] .....	7
Figura 2.3 – Classificação energética para o edifício [12] .....	12
Figura 2.4 – Incidência das medidas de melhoria [13] .....	12
Figura 2.5 – Trajectória do sol e alinhamento das fachadas .....	15
Figura 2.6 – Sombreamento dos vãos envidraçados através de palas horizontais .....	15
Figura 2.7 – Forma do edifício e área exposta.....	16
Figura 2.8 - Distribuição da temperatura exterior e interior no Inverno (regime permanente) e Verão (regime variável) e o efeito da inércia térmica .....	18
Figura 2.9 - Posicionamento do isolamento térmico em paredes: 1 - revestimento interior; 2 - revestimento exterior; 3 - pano simples de alvenaria; 4 - isolamento térmico; 5 - pano interior de alvenaria; 6 - pano exterior de alvenaria .....	20
Figura 2.10 - Ventilação por acção térmica - “efeito chaminé” - e por acção do vento (ventilação cruzada).....	22
Figura 3.1 - Modelo de transformação de x em y .....	23
Figura 3.2 - Domínio de um factor .....	28
Figura 3.3 - Espaço e ponto experimental .....	29
Figura 3.4 - Distribuição de pontos experimentais no domínio de estudo .....	29
Figura 3.5 - Superfície de resposta .....	30
Figura 3.6 - Resposta de um modelo no caso de inexistência (a) e existência de interacção (b).....	32
Figura 3.7 - Esquema do desenho 2 <sup>2</sup> - representado na forma geométrica (gráfica) .....	33
Figura 3.8 - Esquema do desenho 2 <sup>3</sup> - representado na forma geométrica (gráfica) .....	33
Figura 3.9 – Efeito global e efeito médio de um factor.....	38
Figura 3.10 - Importância relativa dos efeitos .....	39
Figura 3.11 - Interacção de factores.....	39
Figura 4.1- Fracção habitacional utilizada como modelo de estudo .....	50
Figura 4.2 - Paredes em contacto com locais adjacentes e divisórias interiores.....	52

Figura 4.3 - Parede exterior de maior desempenho .....	54
Figura 4.4 - Parede exterior de menor desempenho.....	54
Figura 4.5 - Relação de 20% entre a área envidraçada e a área total da fachada Sul.....	56
Figura 4.6 - Relação de 50% entre a área envidraçada e a área total da fachada Sul.....	56
Figura 4.7 - Aplicação do isolamento térmico pelo interior e exterior respectivamente.....	58
Figura 4.8 - Painel de entrada de dados do EnergyPlus [17].....	62
Figura 4.9 - Esquema resumido de funcionamento do EnergyPlus .....	63
Figura 5.1 - Gráfico de Probabilidade Normal Positiva dos Efeitos principais e Interações referente à análise de Inverno .....	71
Figura 5.2 - Comparação dos resultados obtidos por simulação e por aplicação da equação completa do modelo - Equação (5.3) .....	71
Figura 5.3 - Efeitos principais dos factores na estação de aquecimento .....	72
Figura 5.4 - Interação $X_1X_3$ - Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas/Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul (estação de aquecimento) .....	73
Figura 5.5 - Interação $X_2X_3$ - Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados/Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul (estação de aquecimento).....	73
Figura 5.6 - Interação $X_3X_4$ - Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul/Inércia térmica (estação de aquecimento).....	73
Figura 5.7 - Interação $X_3X_5$ - Inércia térmica/Taxa de renovação horária (estação de aquecimento) .....	74
Figura 5.8 - Gráfico de Probabilidade Normal Positiva dos Efeitos e Interações referente à análise de Verão.....	78
Figura 5.9 - Comparação entre os valores estimados pela equação simplificada (5.6) e a equação completa (5.5) integrando todos os efeitos principais e interações .....	78
Figura 5.10 - Efeitos principais dos factores na estação de arrefecimento.....	79
Figura 5.11 - Interação $X_2X_3$ - Transmitância solar dos vãos a Sul/ Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul (estação de arrefecimento) .....	80
Figura 5.12 - Interação $X_3X_4$ - Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul/Inércia térmica (estação de arrefecimento) .....	80
Figura 5.13 - Interação $X_3X_5$ - Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul/Taxa de ventilação (estação de arrefecimento).....	80



Figura 6.1 - Variação percentual das necessidades de energia (Nu) .....	84
Figura 6.2 - Variação percentual dos graus-hora de desconforto por sobreaquecimento (ODH <sub>25</sub> ) .....	85

## Índice de quadros

Quadro 3.1 - Matriz do desenho $2^2$ .....	33
Quadro 3.2 - Matriz do desenho $2^3$ .....	34
Quadro 3.3 - Matriz de cálculo para o desenho $2^2$ .....	34
Quadro 3.4 - Matriz de cálculo para o desenho $2^3$ .....	34
Quadro 3.5 - Matriz de cálculo para o desenho $2^2$ com replicação .....	35
Quadro 3.6 - Plano fraccionado $2^{4-1}$ (4 factores e 8 experiências) .....	42
Quadro 3.7 - Plano $2^{3-1}_{III}$ (3 factores e 4 experiências) .....	43
Quadro 3.8 - Matriz de desenho de 3 factores e 4 experiências .....	43
Quadro 3.9 - Plano $2^{5-2}_{III}$ (5 factores e 8 experiências) .....	44
Quadro 3.10 - Matriz de desenho de 5 factores e 8 experiências .....	44
Quadro 3.11 - Plano $2^{4-1}_{IV}$ (4 factores e 8 experiências) .....	45
Quadro 3.12 - Matriz de desenho de 4 factores e 8 experiências .....	45
Quadro 3.13 - Plano $2^{6-2}_{IV}$ (6 factores e 16 experiências) .....	45
Quadro 3.14 - Matriz de desenho de 6 factores e 16 experiências .....	46
Quadro 3.15 - Plano $2^{5-1}_V$ (5 factores e 16 experiências) .....	47
Quadro 3.16 - Matriz de desenho de 6 factores e 16 experiências .....	47
Quadro 4.1 - Constituição e características térmicas do pavimento .....	51
Quadro 4.2 - Constituição e características térmicas da parede exterior de maior desempenho .....	53
Quadro 4.3 - Constituição e características térmicas da parede exterior de menor desempenho .....	54
Quadro 4.4 - Características das Janelas dupla e tripla .....	55
Quadro 4.5 - Pavimento de menor inércia térmica .....	58
Quadro 4.6 - Factores para o período de aquecimento (Inverno) .....	61
Quadro 4.7 - Factores para o período de arrefecimento (Verão) .....	61
Quadro 4.8 - Correspondência entre os valores reais dos factores e os valores normalizados .....	61

Quadro 5.1 - Matriz de um desenho factorial completo $2^5$ .....	66
Quadro 5.2 - Matriz de cálculo de um plano completo $2^5$ (A $\equiv$ X <sub>1</sub> ; B $\equiv$ X <sub>2</sub> ; C $\equiv$ X <sub>3</sub> ; D $\equiv$ X <sub>4</sub> ; E $\equiv$ X <sub>5</sub> ) ..	68
Quadro 5.3 - Valores de N <sub>u</sub> (kWh/m <sup>2</sup> ) correspondentes às 32 simulações do plano factorial completo $2^5$ estabelecido para o modelo .....	69
Quadro 5.4 - Valores dos coeficientes da equação do modelo correspondente a um plano factorial completo $2^5$ .....	69
Quadro 5.5 - Matriz do desenho factorial fraccionado $2^{5-1}_V$ .....	75
Quadro 5.6 - Matriz de cálculo do plano fraccionado $2^{5-1}_V$ (A $\equiv$ X <sub>1</sub> ; B $\equiv$ X <sub>2</sub> ; C $\equiv$ X <sub>3</sub> ; D $\equiv$ X <sub>4</sub> ; E $\equiv$ X <sub>5</sub> ). .....	76
Quadro 5.7 - Valores de ODH <sub>25</sub> (°Ch) correspondentes às 16 simulações do plano factorial fraccionado $2^{5-1}_V$ estabelecido para o modelo .....	77
Quadro 5.8 - Valores dos coeficientes da equação do modelo correspondente a um plano factorial fraccionado $2^{5-1}_V$ .....	77

## **Siglas**

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

EEE – Eficiência Energética dos Edifícios

AQS – Águas Quentes Sanitárias

CE – Comunidade Europeia

CEE – Comunidade Económica Europeia

AVAC – Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

UE – União Europeia

ADENE- Agência para a Energia

DOE – United States Department of Energy

IDF – Input Data File

CAD – Computer Aided Design

N-S – Norte-Sul

E-W – Este-Oeste

## Simbologia

$N_{ic}$  – Necessidades nominais de energia útil para aquecimento (kWh/m<sup>2</sup>.ano)

$N_{vc}$  – Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (kWh/m<sup>2</sup>.ano)

$N_{ac}$  – Necessidades nominais de energia útil para produção de água quentes sanitárias (kWh/m<sup>2</sup>.ano)

$N_{tc}$  – Necessidades nominais anuais globais de energia primária (kgep/m<sup>2</sup>.ano)

CS – Coeficiente de sensibilidade (-)

V(y) – Variância (-)

$S_i$  – Índice de sensibilidade (-)

$\sigma$  – Desvio-padrão (-)

U – Coeficiente de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.°C)

$\lambda$  – Condutibilidade térmica (W/m.°C)

R – Resistência térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)

e – Espessura (cm)

$g_v$  – Factor solar do vidro (-)

$\tau_{sol}$  – Transmitância solar (-)

$\alpha_s$  – Absortância solar (-)

$f_i$  – Fracção de radiação absorvida pelo envidraçado (-)

$g$  – Factor solar do vão envidraçado (-)

$g_p$  – Factor solar da protecção (-)

$\rho_s$  – Reflectância solar (-)

$\tau_p$  – Transmitância solar da protecção (-)

$\tau_{verão}$  – Transmitância solar na estação do verão (-)

$U_{par}$  – Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas (W/m<sup>2</sup>.°C)

$U_{env}$  – Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados (W/m<sup>2</sup>.°C)

$A_{env}$  – Área envidraçado (m<sup>2</sup>)

$A_{par}$  – Área total (m<sup>2</sup>)

$I_t$  – Inércia Térmica (Kg/m<sup>2</sup>)

$R_{ph}$  – Número de renovações horárias ( $h^{-1}$ )

$N_u$  – Necessidades de energia útil para aquecimento ( $kWh/m^2$ )

$N_H$  – Necessidades de energia útil para aquecimento da fracção ( $kWh$ )

$T_a$  – Temperatura do ar interior ( $^{\circ}C$ )

$A_u$  – Área útil de pavimento ( $m^2$ )

ODH – Overheating Degree Hours ( $^{\circ}Ch$ )

$z$  – Variável Normal padrão (-)

# Capítulo 1 – Introdução

---

## 1.1-Enquadramento do tema e motivações do estudo

A crescente diminuição dos combustíveis fósseis, associada aos danos ambientais que o seu uso intensivo gera, tem suscitado a necessidade de produção de formas de energia alternativas, de natureza renovável e não poluentes. No entanto, apesar do maior conhecimento dos efeitos nefastos do consumo de energia na camada de ozono e alterações climáticas, e dos programas para alterar este quadro, a procura de combustíveis fósseis mantém-se elevada, provocando significativo acréscimo dos preços unitários da energia. Este facto, aliado à crescente procura de melhores condições de conforto nos edifícios, decorrente do progresso tecnológico e civilizacional, leva a que o peso da factura energética tenha cada vez maior impacto no orçamento das famílias.

Nos países desenvolvidos, a energia consumida nos edifícios representa uma parcela significativa do consumo energético total. Desta forma, é essencial implementar medidas que visem uma construção mais sustentável, ou seja, capaz de reduzir o consumo energético sem afectar o conforto no interior dos edifícios. Esta problemática da sustentabilidade ambiental tem levado os projectistas e engenheiros a procurar novas formas de obter energia e a investir em soluções mais eficazes para reduzir o seu consumo, nomeadamente através da adopção de conceitos bioclimáticos, da implementação de formas de energia alternativas e da utilização de equipamentos mais eficientes.

Para o efeito, tem-se procurado utilizar desenhos da envolvente e materiais de construção adequados ao clima e local de implantação dos edifícios, introduzir sistemas passivos de aquecimento/arrefecimento e substituir a energia convencional por energias renováveis para uso e rentabilização, tendo subjacente o objectivo ambicioso de reduzir as necessidades de energia dos edifícios para quase zero, como preconiza a mais recente Directiva Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios [1].

Em Portugal, segundo a Direcção Geral de Energia [2], o consumo energético no sector dos edifícios é cerca de 30 % do consumo de energia final, sendo os edifícios residenciais responsáveis por cerca de 17%, com uma tendência de crescimento. Assim, os regulamentos e directivas têm sido mais exigentes ao nível do desempenho térmico dos edifícios, numa tentativa de preservação ambiental, ajudando também a que o dispêndio energético seja menor.

Desde o início dos anos 90 que em Portugal estão em vigor vários regulamentos dirigidos para o uso da energia em edifícios e que foram revistos em 2006, nomeadamente o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [3], que impõe valores limite para as necessidades energéticas por exigências de conforto térmico, bem como para certos parâmetros térmicos da construção, procurando desta forma assegurar níveis mínimos de qualidade térmica; e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [4], que veio definir um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios dotados de sistemas de climatização, não só relacionados com a envolvente e consumos energéticos, como também com a eficiência e manutenção dos sistemas, e com a qualidade do ar no interior dos edifícios.

Para garantir a aplicação do RCCTE e RSECE foi implementado o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) [5], que certifica os edifícios quanto à correcta observância daqueles regulamentos, que são de aplicação obrigatória para todos os edifícios por eles abrangidos.

O cumprimento das exigências destes regulamentos assume importância tanto nos edifícios construídos de raiz como nos que vão ser reabilitados, atendendo a que o parque edificado, sobretudo nas grandes cidades, contém uma percentagem elevada de edifícios antigos.

A tendência de evolução dos regulamentos será no sentido de exigir cada vez mais das novas edificações, quer ao nível da sua arquitectura e integração no ambiente, quer do aproveitamento dos recursos naturais, dos materiais utilizados na construção, e dos equipamentos que asseguram o seu funcionamento. O objectivo final é o de obter edificações que minimizem o consumo de energia, através de uma concepção construtiva adequada e de um uso eficiente dos recursos, de forma a diminuir o impacto negativo que causam no meio ambiente. Neste processo, e ao nível do consumo de energia para o conforto térmico, é particularmente importante compreender os factores que afectam o desempenho térmico das construções, quer de forma isolada quer em conjunto.

Desta forma, o conhecimento dos factores que contribuem de forma mais acentuada para o comportamento térmico dos edifícios, e da forma como interagem uns com os outros, torna-se fulcral, pois possibilita projectar de forma optimizada e assim contribuir para uma construção mais sustentável, quer ao nível de edifícios novos quer da reabilitação.

O presente trabalho centra-se na análise de sensibilidade de alguns factores de reconhecida influência no desempenho térmico dos edifícios, procurando avaliar a ordem de grandeza dos impactes e eventuais interacções entre eles, e assim contribuir para o projecto de edifícios mais sustentáveis e energeticamente mais eficientes.

## **1.2 - Objectivos e metodologia do estudo**

Actualmente são conhecidas várias soluções arquitectónicas e construtivas que contribuem de forma preponderante para um melhor desempenho térmico dos edifícios. Tendo em conta que os recursos financeiros não são, naturalmente, ilimitados, importa explorar o conhecimento do comportamento térmico de um edifício, de modo a conhecer que factores têm um papel mais activo no seu desempenho térmico e consumo energético.

Perante a multiplicidade de factores com influência no comportamento térmico dos edifícios, impõe-se seleccionar os mais relevantes, que devem ser objecto de tratamento especial no projecto, e identificar aqueles cujo impacte é pouco significativo, de forma a poder aligeirar a sua abordagem e assim poupar tempo e recursos, sobretudo quando estão em causa várias soluções alternativas de projecto.

O objectivo central da presente dissertação consiste numa análise de sensibilidade que permita identificar que factores têm maior peso no desempenho térmico e energético de um edifício. Com este estudo pretende-se conhecer a importância relativa desses factores, assim como o seu contributo para a variabilidade da resposta do edifício dentro de gamas de variação dos parâmetros predefinidas. Neste processo, procura-se igualmente identificar a eventual



existência de interdependências entre factores que, pela sua importância, não devem ser desprezadas na concepção e projecto de um edifício. A resposta do edifício para a avaliação do impacto dos factores será traduzida por indicadores de desempenho térmico e energético. No caso da estação de aquecimento recorrer-se-á às necessidades de energia útil de aquecimento para assegurar as condições de conforto térmico convencionais. No caso da estação de arrefecimento será utilizado um indicador do desconforto térmico designado por Graus-hora de desconforto por sobreaquecimento e cuja definição será detalhada no decorrer do trabalho.

A resposta do edifício à variação dos factores seleccionados para a análise de sensibilidade será obtida por via de simulação computacional, recorrendo-se para o efeito a um programa de simulação dinâmica do comportamento térmico e energético de edifícios de grande aceitação no meio técnico e científico ligado a esta temática.

A análise de sensibilidade será conduzida através de uma técnica de planeamento e análise de experiências - desenho factorial - que é muito utilizada em processos laboratoriais e de controlo de qualidade, mas que neste trabalho será aplicada às simulações computacionais referidas.

Constitui também objectivo da dissertação deduzir uma equação matemática que, de modo rápido e directo, permita estimar, com um grau de aproximação adequado, a resposta do edifício à variação dos factores sem necessidade de recorrer ao programa informático. Uma equação deste tipo é muito útil para efectuar análises de sensibilidade e estudos de optimização que envolvam os factores sobre os quais assenta a dedução dessa equação.

O objecto de estudo que serve de suporte a todas as análises efectuadas é uma fracção habitacional convencional sobre cujas características arquitectónicas e construtivas se actua de forma a implementar os factores de desempenho térmico que serão investigados. O estabelecimento destes factores exigiu algumas análises prévias de forma a ganhar alguma sensibilidade aos seus efeitos e ao esforço computacional envolvido, não tendo sido possível, devido aos enormes custos computacionais, implementar todos os factores que uma análise de sensibilidade aprofundada exigiria. No entanto, os factores seleccionados, que serão devidamente detalhados ao longo da dissertação, apesar de não serem em número muito alargado permitiram, ainda assim, extrair conclusões interessantes do estudo e evidenciar as potencialidades do método de análise de sensibilidade adoptado.

### **1.3 - Plano de trabalho**

O desenvolvimento da presente dissertação assenta num conjunto de temas seleccionados que serão apresentados segundo uma estrutura sequencial e coerente de forma a convergir para os objectivos propostos.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do problema e as motivações do seu estudo, bem como os objectivos propostos e o plano de trabalho traçado para os alcançar.

No segundo capítulo são apresentados os principais factores que condicionam a transmissão de calor e o comportamento térmico de um edifício, que constituem a base do conhecimento do projecto passivo de edifícios. Apresenta-se igualmente, como enquadramento, a caracterização e quantificação dos consumos energéticos em Portugal. Descreve-se ainda a regulamentação energética europeia e nacional, primeiramente de uma forma abrangente, e

depois particularizando para o caso português. São assim abordados os regulamentos que controlam os consumos energéticos e promovem a melhoria da eficiência energética dos edifícios em Portugal.

No terceiro capítulo faz-se uma apresentação geral dos principais métodos de análise de sensibilidade e descreve-se em pormenor o utilizado no presente trabalho - o desenho factorial -, nomeadamente as variantes do plano factorial completo a dois níveis e do plano factorial fraccionado também a dois níveis. Mostra-se igualmente como deduzir uma equação simplificada do modelo, assim como analisar os efeitos principais de um factor e os efeitos de interacção entre dois ou mais factores.

No quarto capítulo apresenta-se com detalhe a fracção habitacional que serve de suporte ao estudo, bem como os factores sobre os quais incidiu a análise de sensibilidade. São definidos os níveis de variação desses factores e as funções resposta tradutoras do desempenho energético e térmico da fracção, respectivamente nas estações de aquecimento e arrefecimento. No final deste capítulo faz-se uma breve introdução do programa informático utilizado nas simulações computacionais - *EnergyPlus* -, mostrando o seu modo de funcionamento e o tipo de resultados que produz.

No quinto capítulo são apresentados os resultados da aplicação do desenho factorial à fracção habitacional que serviu de base ao estudo e deduzida a equação simplificada representativa do modelo de cálculo para as estações de aquecimento e arrefecimento. Procedeu-se à validação da equação do modelo e à identificação dos factores com maior contributo na resposta. Para uma correcta interpretação dos resultados utilizam-se métodos estatísticos que são transpostos para a forma gráfica, a qual permite, por observação visual, uma análise mais rápida e eficaz da importância dos efeitos e interacções na função resposta. Realiza-se igualmente a análise e discussão dos efeitos principais dos factores, assim como das interacções que existem entre eles, utilizando métodos gráficos de representação que são descritos no terceiro capítulo.

Por último, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas propostas de estudos futuros. Primeiramente é feita uma síntese dos principais resultados da análise de sensibilidade efectuada, ao que se segue a apresentação de exemplos de possíveis estudos que poderão ter como base a dissertação que ora se apresenta.

## Capítulo 2 – Eficiência Energética e Projecto Passivo de Edifícios

---

### 2.1 - Introdução

Para satisfazer as crescentes necessidades energéticas a nível global, têm sido produzidas grandes quantidades de emissões de CO<sub>2</sub> provindas da queima de produtos fósseis, as quais estão a provocar alterações climáticas no planeta que podem afectar irreversivelmente e de forma devastadora os sistemas naturais, de que a espécie humana faz parte. Na assunção de que os padrões de conforto continuarão a evoluir, este avultado crescimento das emissões de gases com efeito de estufa decorrente do desenvolvimento económico só poderá ser contrariado através de uma maior eficiência energética e de uma utilização mais regular de energias renováveis em detrimento da energia fóssil.

São diversas as razões que aconselham os países europeus, entre os quais Portugal, a empreender acções de melhoria da eficiência energética dos sectores económicos com maior peso no consumo de recursos, como a Indústria, a Construção e os Transportes, de molde a contribuir para um desenvolvimento mais sustentável e amigo do ambiente:

- a nível ambiental, pois é necessário alcançar um novo equilíbrio que permita o desenvolvimento económico-social das populações, mas que preserve o meio ambiente para que as gerações futuras possam usufruir de uma melhor qualidade de vida;

- a nível estratégico, uma vez que grande parte dos combustíveis utilizados são importados de países que não estão inseridos no espaço Europeu e que por vezes são politicamente muito instáveis;

- a nível económico, devido à forte escalada dos preços do petróleo e ao peso das despesas associadas à factura energética. A procura de redução de custos passa sobretudo pela aposta na eficiência energética tanto mais que a alternativa dada pelas energias renováveis acarreta por enquanto um elevado investimento inicial, que é dissuasor de uma utilização mais disseminada das mesmas.

A procura de eficiência energética é um desígnio transversal a todos os sectores do consumo, nomeadamente, Indústria, Transportes e Edifícios. Neste trabalho, o destaque vai para o sector dos edifícios, em particular do segmento residencial, e para a parcela da energia que é dispendida para assegurar o conforto térmico dos utilizadores.

A eficiência energética dos edifícios (EEE), na óptica aqui analisada, procura maximizar as condições de conforto térmico nos edifícios com o menor dispêndio de recursos possível. A EEE assenta os seus princípios na qualidade da construção, com uma escolha adequada dos materiais, em técnicas de aproveitamento passivo e activo de fontes de energias renováveis, e em equipamentos eficientes de produção e distribuição de energia.

Neste capítulo apresenta-se, primeiramente, o panorama dos consumos de energia no sector residencial em Portugal, de forma a perceber o seu potencial de eficiência energética; segue-se uma descrição da legislação e directivas mais importantes na área da eficiência energética em edifícios, de forma a avaliar a sua importância em termos de área estratégica do desenvolvimento sustentável; e por último, na linha das orientações expressas nas directivas para a melhoria da eficiência energética dos edifícios, apresentam-se os factores que mais

directamente condicionam o comportamento térmico dos mesmos e sobre os quais assentam os princípios de projecto passivo.

## 2.2 - Consumo de energia em edifícios

Nos últimos anos tem-se registado um forte crescimento do consumo de energia primária no nosso país e na União Europeia, assim como uma elevada dependência energética em relação a países terceiros, no que se refere ao modo de obtenção da energia. Estes dois factos, aliados ao peso do sector dos edifícios na procura final de energia, exigem a adopção de medidas que promovam uma redução geral de consumos energéticos neste sector.

Embora os sectores dos transportes e da indústria sejam, ambos, grandes consumidores de energia, os edifícios representam um peso muito significativo nesse consumo, sendo responsáveis por cerca de 40 % do consumo energético na Europa [6]. A energia gasta com o aquecimento (incluindo água quente) e refrigeração das habitações, locais de trabalho e locais de lazer é superior à consumida por qualquer um dos outros dois sectores.

Em relação a Portugal, o consumo energético no sector dos edifícios constitui também uma fatia importante do consumo de energia final, situando-se na casa dos 30%. Este valor, apesar de inferior à média Europeia, que se situa, como se disse, nos 40%, tem sofrido um crescimento acelerado na última década (3% ao ano), principalmente devido à melhoria da qualidade de vida e conseqüente maior procura de conforto por parte dos utilizadores dos edifícios.

Particularizando para o caso da energia eléctrica, que é um domínio estratégico para o desenvolvimento da economia, o contributo do sector dos edifícios no consumo total de electricidade, como se pode constatar na Figura 2.1, é da ordem dos 62% (29% no sector doméstico e 33% no sector de serviços). Este valor elevado vem reforçar a necessidade de se reflectir sobre a forma como é consumida a energia nos edifícios, de modo a sustentar intervenções de poupança de energia e de maior eficiência energética nas parcelas de maior consumo.

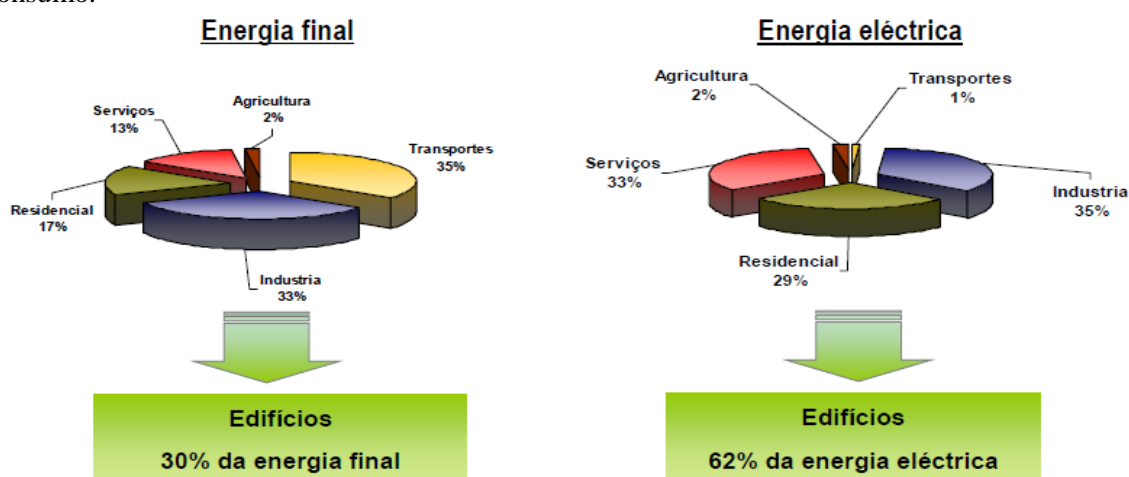


Figura 2.1 – Repartição do consumo energético pelos vários sectores de actividade [7]

No caso dos edifícios residenciais, que são aqueles que são objecto deste trabalho, o consumo de energia reparte-se pela climatização, aquecimento de águas (AQS), iluminação e

electrodomésticos, sendo a distribuição por tipo de utilização a que se mostra no gráfico da Figura 2.2.

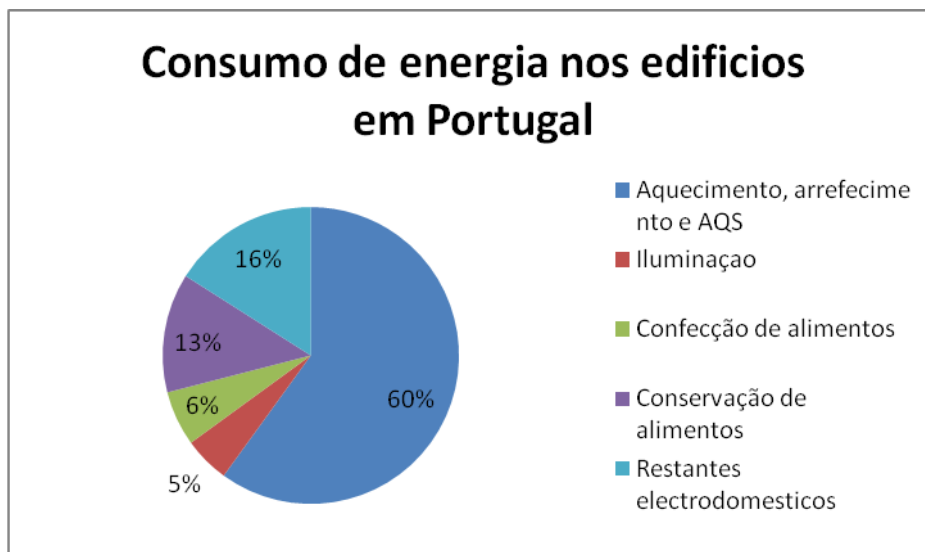


Figura 2.2 – Repartição do consumo de energia nos edifícios residenciais em Portugal [8]

A Figura 2.2 mostra que a maior parcela do consumo de energia cabe aos gastos com a climatização (aquecimento e arrefecimento dos edifícios) e com as águas quentes sanitárias (AQS), perfazendo 60% do consumo total. Os restantes gastos dividem-se por diversos tipos de utilização, como iluminação (5%), confecção de alimentos (6%), conservação de alimentos (13%) e restantes electrodomésticos (16%).

Associado à elevação dos padrões de qualidade de vida e também à redução dos preços dos equipamentos de ar condicionado, verifica-se, por comparação com estudos anteriores, que os consumos relativos ao aquecimento e arrefecimento têm vindo a crescer, prevendo-se que esta tendência se mantenha e que o ritmo de crescimento daqueles consumos seja da ordem de 3,4% ao ano, de 2000 a 2030 [6].

A forma mais sustentável de reduzir o peso da climatização nos edifícios é através de uma concepção arquitectónica e construtiva dos mesmos capaz de reduzir as necessidades energéticas associadas às exigências de conforto térmico. A utilização de técnicas passivas de aquecimento e arrefecimento, bem como a utilização de sistemas de produção de energia renovável contribuem também para a redução das necessidades de energia convencional e, consequentemente, para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, que têm um impacto ambiental negativo pela sua contribuição para o efeito de estufa.

Atente-se que a procura de maior eficiência energética nos edifícios por intervenção nas diferentes parcelas do consumo, principalmente nas de maior peso, como é o caso da climatização, já referida, é fundamental não apenas por razões estritamente económicas de diminuição dos custos, mas também por razões ambientais de diminuição dos gases com efeito de estufa.

A este respeito, a produção de emissões de CO<sub>2</sub> em Portugal no ano de 2000 era aproximadamente 50% superior ao valor de 1990, quando o País se comprometeu, ao assinar o Protocolo de Quioto, em limitar o crescimento das emissões no período de 2008-2012 a um

valor de 27% em relação ao valor de 1990. Este objectivo vem tornar mais premente a necessidade de se investir na eficiência energética dos edifícios.

Consciente da importância do sector dos edifícios no objectivo estratégico de redução da dependência energética e diminuição dos impactes ambientais, a Comissão Europeia tem produzido directivas para serem aplicadas pelos Estados-Membros com o intuito de controlar o desempenho energético dos edifícios e incentivar o uso de energias renováveis. Pretende-se, assim, obter uma redução significativa dos consumos no sector dos edifícios de forma a convergir para o cumprimento dos compromissos do Protocolo de Quioto.

## **2.3 - Regulamentação energética de edifícios**

### **2.3.1 - Directivas Europeias de desempenho energético dos edifícios**

Numa tentativa de maior controlo dos consumos energéticos, a União Europeia tem vindo a aprovar medidas e planos estratégicos, enquadrados por directivas europeias com objectivos até 2020, com o intuito de promover uma significativa melhoria da eficiência energética dos edifícios (redução de 20% face aos níveis de consumo actuais), um crescimento da utilização de energias renováveis (aumento de 20%) e uma diminuição dos gases com efeito de estufa (redução de 20%).

De referir a publicação da directiva do “Desempenho Energético dos Edifícios” (2002/91/CE) [9] do Parlamento Europeu e do Conselho, que considera que uma maior eficiência energética é fundamental para o cumprimento do Protocolo de Quioto e que os sectores residencial e terciário têm uma importante quota-parte do consumo energético final (40%), pelo que devem ser enquadrados por legislação própria com medidas concretas. Embora a directiva 2002/91/CE não fosse a primeira a ser criada com o intuito de promover a eficiência energética, pois antes já tinha sido publicada a directiva 93/76/CEE [10] - relativa à limitação das emissões de dióxido de carbono através do aumento da eficácia energética -, a sua publicação, conjuntamente com o Plano de Acção para a Eficiência Energética, criado em 2006, teve como principal objectivo a promoção da melhoria do desempenho energético dos edifícios propondo medidas mais concretas e de mais fácil aplicação na prática.

A directiva 2002/91/CE aponta para a implementação das seguintes acções pelos Estados Membros:

- Enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado nos edifícios, onde se prevê que cada Estado-membro elabore uma metodologia de cálculo, que agrupe os edifícios em diversas categorias, que entre em conta com as características térmicas do edifício, as instalações de ar condicionado, de aquecimento e produção de água quente, a localização e orientação dos edifícios, a ventilação natural e as condições climáticas exteriores e interiores.

- Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios, os quais devem ser estipulados por cada Estado-membro, tendo em atenção as condições climáticas do local sem nunca descurar a qualidade do ar interior.

- Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos grandes edifícios existentes que sofram obras de renovação, especificando a directiva que os edifícios com áreas superiores a 1000 m<sup>2</sup>, sujeitos a obras de reabilitação, deverão cumprir os requisitos das construções novas.

- Certificação energética dos edifícios, em que por via do artigo 7º refere a obrigatoriedade da certificação em todas as transacções imobiliárias de venda e aluguer, e a afixação de um certificado em edifícios públicos com mais de 1000 m<sup>2</sup>.

- Inspecção periódica de instalações de ar condicionado e de caldeiras nos edifícios, onde deve ser efectuada inspecção por parte de peritos às instalações AVAC, com potência nominal superior a 12 kW e às caldeiras com potência nominal compreendida entre 20 e 100 kW.

No seguimento da directiva 2002/91/CE apareceram outras directivas com o intuito de promover uma maior eficiência energética dos edifícios, propondo medidas que possam ser adoptadas pelos Estados-Membros para aumentar a eficácia da utilização e poupança de energia.

A directiva 2006/32/CE [11] é exemplo disso, uma vez que o seu principal objectivo é incrementar a relação custo-eficácia na melhoria da eficiência na utilização final de energia. As principais medidas propostas por esta directiva podem resumir-se em:

- Aquecimento e arrefecimento mais eficientes;
- Aumento do isolamento térmico;
- Instalação de equipamentos de águas quentes sanitárias mais eficientes;
- Utilização de recuperadores de calor;
- Introdução de aparelhos de microgeração;
- Utilização de lâmpadas e electrodomésticos mais eficientes.

É neste contexto de cada vez maior exigência no que respeita à utilização da energia que surge a directiva mais recente 2010/31/EU [1], que vem substituir a 2002/91/CE, entretanto revogada, e que os Estados-Membros deverão transpor para as legislações nacionais até ao final de 2012. As alterações na directiva 2002/91/CE visam promover um melhor desempenho das edificações, aumentando significativamente os requisitos destas.

Uma das grandes mudanças introduzidas por esta directiva surge na abolição do limite de 1000 m<sup>2</sup> na aplicação dos requisitos em casos de grandes reabilitações, podendo os Estados-Membros decidir se limitam a imposição da directiva pelo custo total da renovação (se superior a 25 % do valor do edifício torna-se necessária a sua aplicação) ou pela superfície da envolvente do edifício (se for renovada mais de 25 % da superfície torna-se necessária a sua aplicação). Outra mudança surge na introdução de requisitos a nível dos sistemas técnicos (aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, preparação de águas quentes sanitárias, entre outros), pois na directiva 2002/91/CE era apenas tida em conta a envolvente do edifício. Os requisitos mínimos (envolvente e sistemas técnicos) têm de ser estabelecidos numa óptica de custo mínimo ao longo de um ciclo de vida longo. Outra exigência da nova directiva surge nos certificados energéticos obrigatórios para novos edifícios, assim como para a venda e aluguer

dos já existentes. Estes certificados têm de incluir boas recomendações de melhoria e encontrarem-se visíveis ao público.

O maior desafio que a directiva 2010/31/EU enfrenta, surge no plano da reabilitação do parque edificado existente. A norma impõe que os Estados-Membros têm de implementar e estabelecer um plano de reabilitações “ambicioso” para o parque de edifícios não especificando detalhes que permitam uma intervenção quantitativa. Além do mais, para este plano de reabilitação é necessário investimentos avultados e sistemas de financiamento que se tornam difíceis nos dias correntes.

Em forma resumida, os desafios da nova directiva europeia sobre o desempenho energético dos edifícios (directiva 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010) podem dividir-se nos seguintes:

- Contribuir para o objectivo europeu "UE 20-20-20" em 2020, isto é:
  - Aumento de 20% na eficiência energética;
  - Redução de 20% nas emissões de gases com efeito de estufa;
  - Produção de 20% da energia através de fontes renováveis.
- Intensificar a aplicação de melhorias de eficiência energética aos edifícios existentes, sempre que:
  - O custo total da renovação é superior a 25 % do valor do edifício, e/ou;
  - É renovada mais de 25 % da superfície da envolvente do edifício.
- Promover a construção e recuperação do parque edificado de modo a construir “edifícios de energia quase zero”, tendo como prazos:
  - No caso de novos edifícios públicos, a partir de 2018;
  - Para todos os novos edifícios, a partir de 2020.
- Requisitos mínimos baseados em critérios de viabilidade económica ao longo do ciclo de vida do edifício.
- Maior esclarecimento e promoção junto do público da importância da eficiência energética, através de:
  - Apresentação da classe energética na publicidade ao edifício a partir do momento em que é colocado no mercado;
  - Afixação dos certificados energéticos na entrada dos edifícios públicos: a partir de 2012 para edifícios com área útil superior a 500 m<sup>2</sup>; a partir de 2015 para edifícios com área útil superior a 250 m<sup>2</sup>.

### **2.3.2 - Directivas Europeias de desempenho energético dos edifícios aplicadas em Portugal**

No que respeita à aplicação das directivas europeias em Portugal, de modo a estimular e impulsionar a eficiência energética dos edifícios e para esclarecer os utilizadores, foram criados diversos decretos-lei que transpõem para as normas nacionais as directivas europeias, as quais regulamentam e promovem a melhoria do conforto térmico e da qualidade do ar interior com pequenos gastos de energia.

A directiva europeia 2002/91/CE foi introduzida em Portugal através do decreto-lei nº78/2006, pelo qual é criado o Sistema Nacional de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) gerido pela ADENE - Agência para a Energia. A metodologia de



cálculo não vem expressa no respectivo decreto-lei, sendo desta forma remetido para o RSECE e RCCTE. O RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, decreto-lei nº79/2006) impõe limites ao consumo de energia nos grandes edifícios de serviços, definindo uma potência máxima dos aparelhos de climatização, sem nunca descuidar a qualidade mínima do ar interior. O RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, decreto-lei nº80/2006), abrange os edifícios de habitação e serviços com área inferior a 1000 m<sup>2</sup>, ou 500 m<sup>2</sup> no caso de supermercados, centros comerciais ou piscinas interiores. Existem quatro índices fundamentais para quantificar as necessidades energéticas dos edifícios ( $N_{ic}$ ,  $N_{vc}$ ,  $N_{ac}$  e  $N_{tc}$ ) que são limitados superiormente, consoante a zona climática onde se encontra o edifício, de modo a conseguir um bom desempenho térmico por parte deste.

Embora não seja explicada de forma extensiva, a metodologia de cálculo regulamentar tem um papel pedagógico importante, pois permite evidenciar os principais parâmetros, ou factores, que condicionam as necessidades energéticas dos edifícios, permitindo ao projectista tomar opções em função do nível de desempenho energético pretendido. Muitos destes parâmetros estão relacionados com a concepção construtiva do edifício e a forma como este tira partido dos factores climáticos - temperatura, vento, radiação solar. Assim, destacam-se os seguintes parâmetros:

- Coeficientes de transmissão térmica, superficiais e lineares dos elementos da envolvente, que constituem indicadores dos níveis de transmissão do calor através de zonas correntes e singulares (pontes térmicas) para o exterior e locais não aquecidos do edifício.

- Classe de inércia térmica do edifício, que é um indicador da forma como o edifício gere o calor acumulado nos elementos de construção pesados e que se divide em duas fases: uma fase de absorção de calor, que permite, por exemplo, evitar o sobreaquecimento do ar nas horas de maior radiação solar, e uma fase de libertação de calor, que permite, por exemplo, evitar o arrefecimento excessivo do ar interior durante a noite.

- Factor solar, que é um indicador do nível dos ganhos solares que se processam através dos elementos envidraçados e que variam com o tipo de vidro, caixilharia, sombreamento e orientação solar.

- Taxa de renovação do ar, que é um parâmetro fundamental para assegurar a qualidade do ar interior, mas que acarreta trocas de energia importantes se não for bem controlada.

É a avaliação da importância de parâmetros deste tipo no desempenho térmico e energético dos edifícios que estará em foco neste trabalho.

Através da metodologia de cálculo do RCCTE que inclui, além dos factores descritos, outros factores relacionados com a eficiência dos equipamentos e o uso de energias renováveis, é possível calcular as necessidades globais de energia primária, resultando daí uma classe energética para o edifício em questão, por comparação com os limites regulamentares - Figura 2.3 [12].

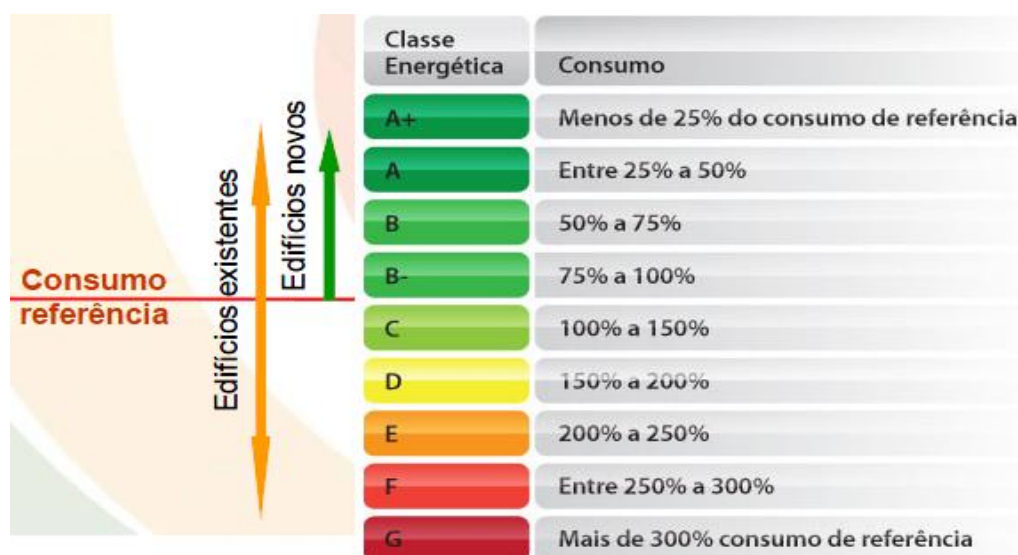


Figura 2.3 – Classificação energética para o edifício [12]

Um certificado energético assume-se como um instrumento importante num plano de melhoria da eficiência energética, pois ao classificar o edifício segundo uma dada escala de eficiência (no caso do actual regulamento em 9 níveis), está a criar um factor de distinção que naturalmente dinamiza o mercado dos edifícios de classificação mais elevada. Por outro lado, ao quantificar as necessidades energéticas do edifício, assim como as suas emissões de CO<sub>2</sub>, torna possível a criação de bases de dados quantitativas que permitirão acompanhar de forma mais rigorosa a evolução da eficiência energética do parque de novos edifícios. Finalmente, ao incorporar propostas de melhoria do desempenho térmico, o certificado energético pode ter um papel importante no sector da reabilitação, ao indicar as medidas mais acertadas para melhorar a eficiência energética de um edifício existente. Na Figura 2.4 é possível verificar a repartição da incidência das medidas de melhoria, estas fulcrais para o bom desempenho dos edifícios certificados [13]:

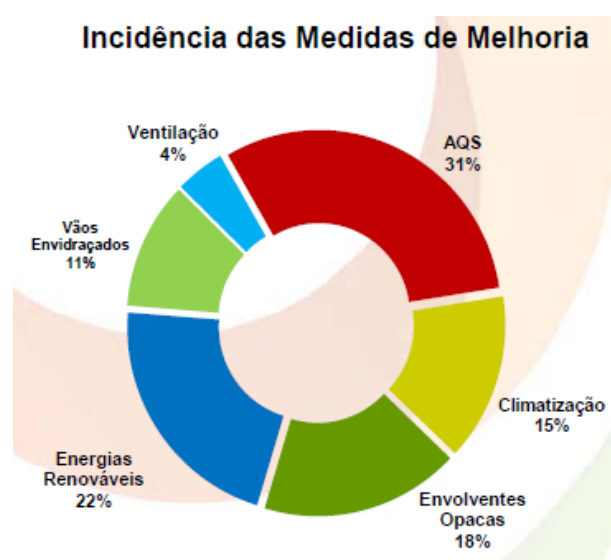


Figura 2.4 – Incidência das medidas de melhoria [13]

No sentido de dar cumprimento à mais recente directiva 2010/31/EU, a regulamentação térmica encontra-se actualmente num processo de revisão, sendo expectável que daí venha a resultar um agravamento das exigências ao nível da qualidade térmica e das necessidades

energéticas dos edifícios, em sintonia com a referida directiva, que aponta, como atrás se referiu, para a meta ambiciosa de Edifícios de Energia (quase) Zero em 2020.

Um ponto comum a todas as directivas sobre a eficiência energética dos edifícios é o reconhecimento das características construtivas do edifício, das suas relações geométricas e da forma como aproveita os factores climáticos do contexto, como elementos de grande importância no seu desempenho energético. Mais concretamente, numa hierarquia de propostas visando a melhoria da eficiência energética, os elementos passivos do edifício que condicionam o desempenho energético devem ser os primeiros a merecer atenção. As medidas relativas aos elementos activos, como os equipamentos para climatização e os sistemas de energia renovável, sendo naturalmente também importantes, apenas devem avançar quando em teoria todo o potencial de eficiência energética dos elementos passivos tiver sido aproveitado.

No ponto seguinte é feita uma descrição dos princípios que devem nortear o projecto de um edifício no que respeita ao seu desempenho térmico. Nesta matéria, exige-se que o comportamento do edifício seja de molde a recorrer o menos possível a meios mecânicos de climatização para proporcionar as condições de conforto térmico convencionadas. Por outras palavras, o comportamento térmico do edifício, na sua componente passiva, deve ser tanto quanto possível optimizado. Deste modo há interesse em identificar os factores passivos que condicionam o comportamento térmico e energético do edifício e avaliar o seu impacte em indicadores de desempenho que possam ser considerados representativos - necessidades energéticas para assegurar o conforto, temperaturas médias interiores, número de horas em que a temperatura interior é inferior ou superior à temperatura de conforto, etc. - e determinantes no projecto térmico de um edifício.

Entre os factores referidos, destacam-se os de natureza geométrica - como a relação entre a área envolvente de trocas de calor e o volume do edifício, a relação entre área opaca e envidraçada, etc. -, os de natureza construtiva - como a massa de construção (inércia térmica), o nível de isolamento térmico, as características dos envidraçados, etc. - e os relacionados com o contexto climático - como a orientação solar, o tipo de exposição ao vento, a integração da vegetação, relevo, etc..

Estes factores são englobados no que se designa de projecto (solar) passivo ou, de uma forma mais abrangente, de arquitectura bioclimática. Embora exista alguma distinção entre estes dois conceitos - para além das técnicas de aproveitamento da radiação solar para melhorar o clima interior, a arquitectura bioclimática tem ainda em conta aspectos adicionais, biológicos e climatológicos, como a utilização da vegetação como forma de sombreamento, o aproveitamento dos ventos dominantes para a ventilação natural, etc. -, neste texto usar-se-á indiferentemente uma ou outra designação.

## **2.4 - Princípios de projecto passivo de edifícios**

Como se evidenciou anteriormente, os edifícios são responsáveis por avultados consumos energéticos que os colocam como um dos maiores produtores de emissões de gases com efeito de estufa. Por esta razão, nos últimos anos tem sido publicada legislação vária que procura reduzir esses consumos quer por via do cumprimento de disposições regulamentares (RCCTE, RSECE) quer através da implementação de medidas que melhorem o desempenho energético dos edifícios.

Por razões energéticas, económicas e ambientais, os critérios de projecto de um edifício energeticamente eficiente devem dar sempre prioridade aos princípios da arquitectura bioclimática - também designada, num âmbito mais restritivo, por arquitectura (solar) passiva - que procura minimizar os gastos de energia para a manutenção do conforto ambiental através de meios exclusivamente naturais. Só depois de esgotado todo o potencial que existe relativamente ao aproveitamento dos recursos naturais - sol, vento, vegetação - para melhorar o conforto ambiental das edificações, é que se deve passar ao projecto dos sistemas activos como meio de assegurar as necessidades complementares de energia para assegurar os níveis de conforto pretendidos.

Seguidamente apresentam-se alguns princípios em que assenta o projecto passivo de edifícios, descrevendo-se a forma como intervêm no comportamento térmico destes.

### **2.4.1 - Exposição Solar**

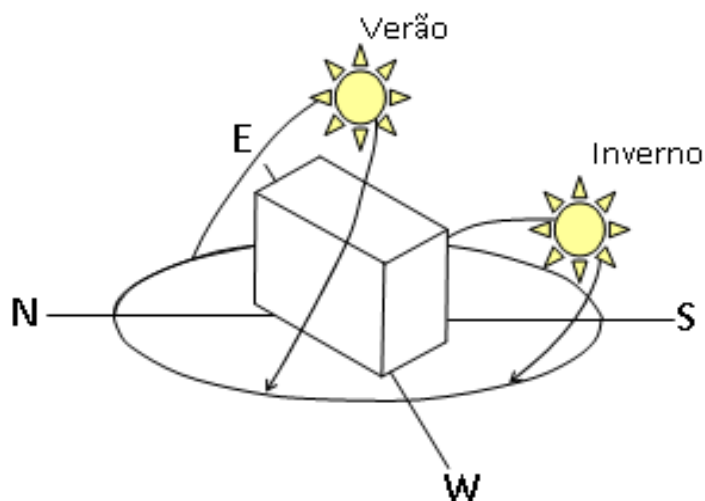
A intensidade da radiação solar, a orientação do edifício, a percentagem de área envidraçada e a forma como ela se distribui pelas fachadas são factores que têm grande influência no desempenho térmico do edifício, quer no Inverno quer no Verão.

A intensidade da radiação solar é função da latitude do local, do dia do ano e da hora do dia, e chega à superfície da terra de 2 modos distintos: directamente (radiação directa), sem reflexões nem refacções no seu percurso através da atmosfera; e sob a forma difusa (radiação difusa), que resulta da dispersão dos raios solares nas moléculas em suspensão na atmosfera. Por sua vez, a quantidade de energia radiante que pode ser captada por um edifício em proveito do seu desempenho térmico depende da orientação e das características das superfícies da sua envolvente.

A forma mais simples de aproveitar a energia radiante proveniente do sol consiste na sua captação directa através dos vãos envidraçados. Atendendo ao movimento aparente do sol, no hemisfério Norte a orientação Sul recebe radiação directa durante todo dia, pelo que o alinhamento das fachadas maiores segundo a direcção E-W e uma maior distribuição de vãos envidraçados nestas fachadas é favorável no Inverno, onde o objectivo é reduzir as necessidades de aquecimento - Figura 2.5.

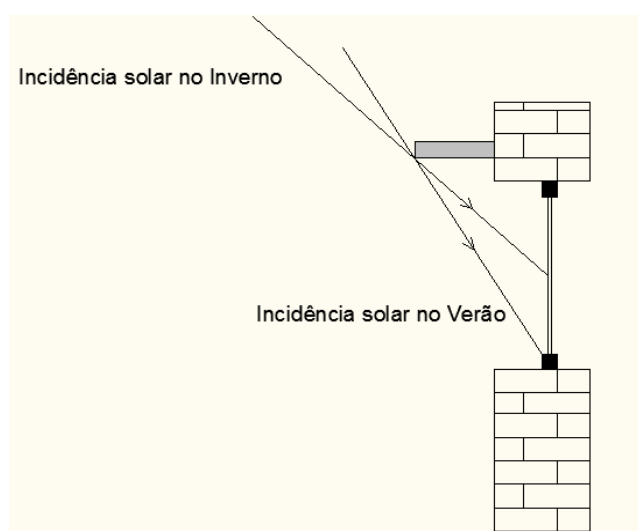
No Verão, onde o pretendido é a redução das necessidades de arrefecimento, espera-se que a mesma disposição de fachadas e a mesma distribuição de vãos recomendadas para o Inverno se mantenha igualmente favorável nesta estação.

De facto, no Verão, são as orientações Este e Oeste que recebem maior quantidade de radiação, o que torna recomendável a disposição das fachadas menores nesta orientação e possuir uma área envidraçada também mais reduzida - Figura 2.5.



**Figura 2.5 – Trajectória do sol e alinhamento das fachadas**

O excesso eventual de ganhos através da fachada Sul pode ser minimizado através de palas horizontais, que têm a particularidade de sombrear eficazmente os vãos envidraçados no Verão, que é período do ano em que o sol se encontra mais alto no horizonte, e não prejudicar os ganhos solares no Inverno, dado que para a altura solar característica deste período o sombreamento produzido nos vãos é diminuto - Figura 2.6.



**Figura 2.6 – Sombreamento dos vãos envidraçados através de palas horizontais**

Para além da orientação dos vãos envidraçados, é importante definir a proporção mais adequada de área envidraçada nas fachadas, tendo em conta as exigências de conforto térmico/economia de energia e as necessidades de iluminação natural. No plano do conforto térmico com economia de energia, é necessário ponderar devidamente os ganhos e as perdas de calor através desses elementos e efectuar essa avaliação tanto para a estação fria como para a estação quente.

A superfície vidrada orientada a sul capta a radiação directa de uma forma muito eficiente no período de Inverno, porém, como o vidro tem uma condutibilidade térmica elevada, é um elemento onde as perdas térmicas são muito acentuadas. Para minimizar estas perdas térmicas, que é o que se pretende na estação de Inverno e sobretudo em relação aos vãos das fachadas menos ensolaradas, é recomendável a adopção de vidros isolantes e caixilharia com corte térmico. No Verão, os ganhos de calor que conduzem ao sobreaquecimento do ambiente

interno evitam-se activando dispositivos de sombreamento no plano dos vãos, ou através do tipo de palas já referido, de funcionamento muito eficaz nos vãos orientados a Sul. Actualmente existem estores (ripas com injeção de poliuretano no interior) com boas propriedades de isolamento térmico que podem também desempenhar, se activados, uma função importante de limitação das perdas térmicas no período nocturno no Inverno. Uma redobrada protecção contra os ganhos de calor excessivos consegue-se através da utilização de vidros de controlo solar, que baseiam o seu funcionamento em propriedades ópticas especiais de reflexão ou absorção e cujo efeito é reduzir a transmissão dos raios solares para o ambiente interior.

#### 2.4.2 - Forma e dimensão do edifício

Como foi referido no ponto anterior, a orientação da fachada principal (maior dimensão) do edifício deve ser preferencialmente Sul, para permitir uma captação generosa de radiação solar no Inverno e uma protecção natural contra esta radiação no Verão. Ao mesmo tempo, os vãos envidraçados devem ser correctamente dimensionados, tanto em termos da área de captação, como das características térmicas e ópticas dos elementos transparentes, e protegidos contra a radiação solar excessiva através de dispositivos de sombreamento adequados.

Para além destes factores, a forma do edifício é outro factor com grande influência nas suas trocas térmicas com o exterior. Quanto mais compacta for a forma do edifício, menos recortes tiver e menor for a área exposta ao ambiente exterior, tanto mais reduzidas são as trocas de calor e melhor será o seu balanço térmico global - Figura 2.7.

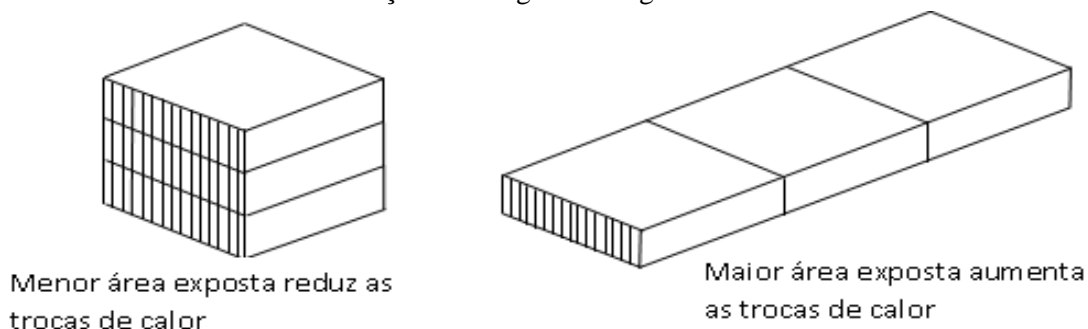


Figura 2.7 – Forma do edifício e área exposta

A forma de um edifício fica caracterizada pela relação entre a área da envolvente em contacto com o exterior (e, adicionalmente, em contacto com locais não aquecidos) e o seu volume. Esta relação é conhecida por factor de forma. A formas diferentes correspondem factores diferentes e, para uma forma constante, a área exterior aumenta menos rapidamente que o volume habitável, concluindo-se que um edifício grande tem, proporcionalmente, um menor valor de perdas térmicas quando comparado com um pequeno.

Em princípio, para minimizar as trocas de calor por condução através da envolvente, a forma do edifício deverá ser a mais compacta possível, o que significa que deverá tender para um cubo. No entanto, este princípio não deve ser tomado como absoluto, pois existem outros factores climáticos, para além da diferença de temperatura entre o exterior e o interior, que condicionam o valor das trocas térmicas, como: a temperatura do solo, a direcção e velocidade dos ventos dominantes e a radiação solar incidente no edifício. A forma de um cubo pode não ser a óptima se for necessário minimizar a área exposta de parede à direcção do vento

dominante, por exemplo Este-Oeste, ou maximizar a área de parede exposta à radiação solar directa, por exemplo a fachada voltada a Sul. Neste caso, uma forma alongada seria a recomendada, em lugar da forma cúbica. Por esta razão, a determinação da forma de um edifício que otimiza o seu comportamento térmico é, no caso geral, um problema complexo dada a diversidade de factores que podem condicionar esse comportamento.

### 2.4.3 - Inércia térmica

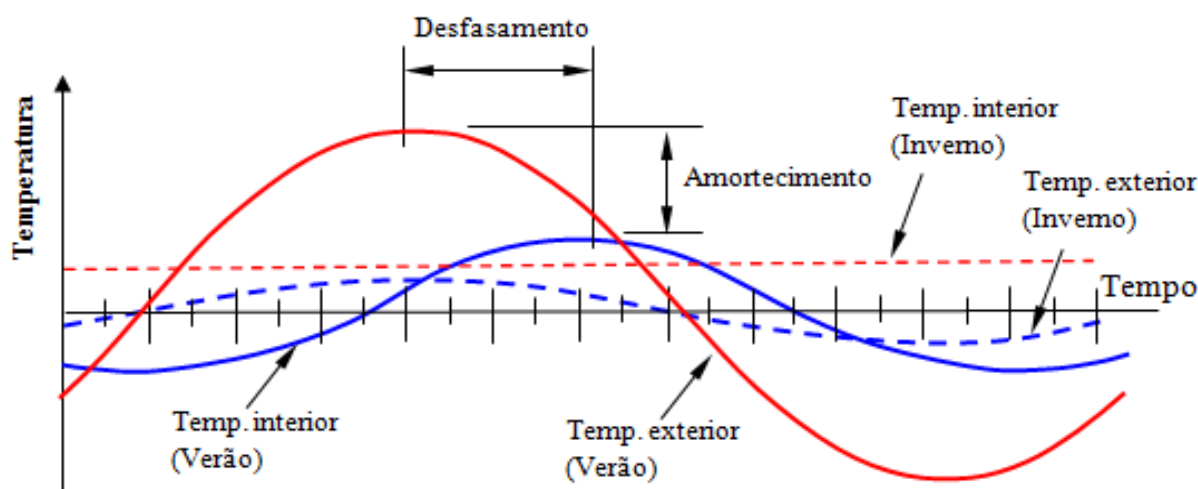
Todos os materiais quando sujeitos a uma diferença de temperatura absorvem (no caso de um aumento de temperatura) ou libertam (no caso de uma diminuição de temperatura) uma quantidade de calor que é função da sua massa e calor específico. O produto da massa pelo calor específico toma a designação de capacidade ou massa térmica e, quanto maior for o valor desta propriedade, maior é a capacidade de armazenamento ou libertação de calor do material. A forma como esta propriedade influencia o ambiente interior do edifício traduz-se pelo amortecimento e desfasamento das ondas de calor que resultam do ciclo diário da temperatura exterior e radiação solar. Dado que este comportamento não representa mais do que a resistência em termos térmicos que o edifício oferece às solicitações térmicas actuantes, por analogia com outros domínios científicos é comum designar esta resistência por *inércia térmica*. Também se conclui da explicação anterior que quanto mais pesada for a construção, ou seja, quanto maior for a massa dos seus elementos constituintes, maior deverá ser o seu potencial de inércia térmica. No entanto, para que este potencial se efective plenamente é necessário, por um lado, que essa massa seja directamente actuada pelas solicitações térmicas, e por outro, que ela esteja em contacto com o ambiente que se pretende que influencie (que naturalmente é o ambiente interior e daí, no caso dos elementos da envolvente, ser a massa que está do lado interior que é a mais importante para a inércia térmica). Se estas condições não se verificarem, a massa dos elementos, mesmo sendo elevada, não faz intervir - ou faz intervir pouco - o seu efeito na evolução das temperaturas interiores. É o que sucede, por exemplo, quando se isola termicamente a envolvente pelo lado interior. Neste caso estes elementos não participam na inércia térmica do edifício, que assim fica apenas dependente das características de massa das divisórias interiores. Também se deduz que a inércia térmica de um edifício apenas condiciona o seu comportamento térmico se a amplitude das solicitações térmicas ao longo do ciclo de um dia (as amplitudes em ciclos superiores são menos importantes) tiver expressão (temperaturas altas durante o dia e frescas à noite). De contrário, em climas que manifestam uma constância ou pequena variação das suas temperaturas ao longo do dia, a inércia dos edifícios não tem um papel significativo no seu comportamento térmico.

No caso de um clima favorável ao uso de inércia térmica, o resultado da interacção de um edifício com materiais pesados e maciços com esse clima, é uma maior estabilização da temperatura ambiente interior, o que, numa óptica de conforto e conservação da energia, e num regime de ocupação contínuo, é um comportamento favorável. Este efeito favorável aplica-se tanto a uma situação de Verão como a uma situação de Inverno.

No Verão, sobretudo devido aos ganhos solares elevados, a temperatura do ar interior tende a elevar-se e a gerar o sobreaquecimento dos espaços, que assim necessitam de energia de arrefecimento para restabelecer a situação de conforto. Ora, a utilização de materiais com massas térmicas elevadas permite minimizar os efeitos do excesso de energia solar, através do armazenamento de calor nas horas mais quentes do dia, e libertação desse calor armazenado no período nocturno, quando as temperaturas são mais baixas. Desta forma torna-se possível uma

evolução da temperatura interior sem grandes variações e eventualmente evitar o recurso a energia de arrefecimento - Figura 2.8. Se, no período nocturno, a libertação de calor for de molde a elevar a temperatura interior para além do valor de conforto, pode recorrer-se à ventilação para arejar os locais e produzir o seu arrefecimento passivo.

No Inverno, o papel da inércia térmica é o de armazenar calor nas horas do dia em que ele é menos preciso, ou seja, quando as temperaturas exteriores e os ganhos solares são mais elevados, e libertá-lo à noite, quando ele se torna mais necessário, ou seja, quando as temperaturas atingem os valores mais baixos diários e conseqüentemente as necessidades de aquecimento para assegurar o conforto são maiores. Desta forma, ao contribuir para o aquecimento dos espaços nos períodos em que as necessidades de climatização são maiores, a inércia térmica pode conduzir a economias de energia importantes.



**Figura 2.8 - Distribuição da temperatura exterior e interior no Inverno (regime permanente) e Verão (regime variável) e o efeito da inércia térmica**

Embora a inércia térmica tenha sido apresentada até aqui como um parâmetro térmico da construção que contribui positivamente para o conforto e economia de energia, nem sempre isso acontece. A inércia térmica pode também desempenhar um papel desfavorável em edifícios com regime de ocupação parcial (escola, por exemplo) ou cujos ganhos solares de Inverno sejam pouco significativos. Neste caso, um nível elevado de inércia pode traduzir-se numa demora acentuada no restabelecimento das condições de conforto pelos equipamentos de climatização, aumentando, assim, o consumo de energia.

A inércia térmica é, pois, uma variável de grande importância no que diz respeito ao desempenho térmico de um edifício. Por este motivo, a capacidade de armazenamento térmico deverá ser projectada, caso a caso, em função da orientação, área envidraçada, características do clima e regime de ocupação.

#### **2.4.4 - Isolamento térmico**

É a envolvente do edifício - representada pelas suas partes opacas e transparentes - que cabe a tarefa de regular as trocas de calor entre os ambientes interior e exterior para que o



comportamento térmico do edifício seja de molde a não implicar o recurso excessivo a energia auxiliar para assegurar as condições de conforto térmico definidas.

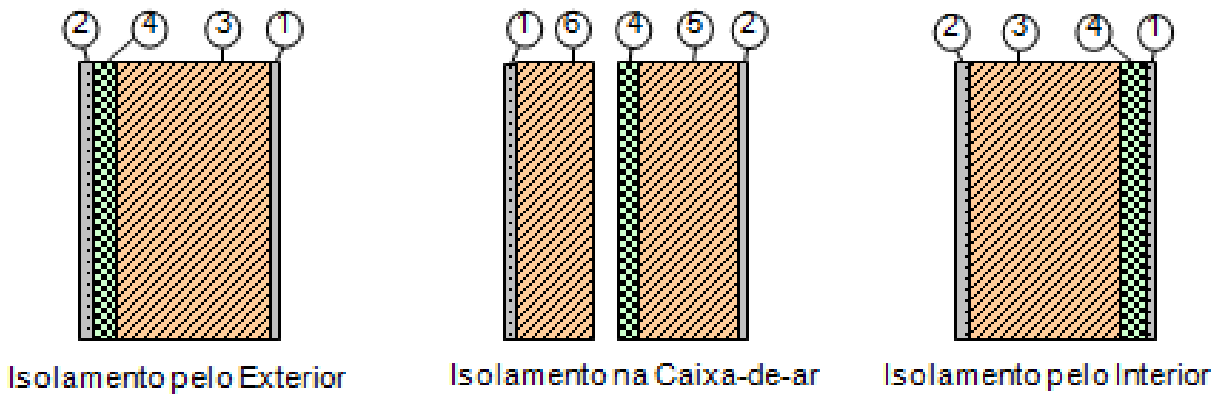
Relativamente às partes transparentes, constituídas pelos vãos envidraçados, já atrás foram referidas as principais recomendações de projecto para uma utilização passiva da energia solar em benefício do conforto térmico dos utilizadores dos edifícios. Relativamente às partes opacas, e numa óptica de conservação da energia, a sua principal função é a de limitar as trocas de calor a valores máximos admissíveis, estabelecidos normalmente em função de critérios económicos.

Todos os materiais e elementos de construção apresentam dadas características de transmissão do calor que podem ser traduzidas por coeficientes apropriados. No caso dos materiais, a sua aptidão para transmitir o calor é quantificada pela condutibilidade térmica, que é uma propriedade intrínseca de cada material e depende, entre outros factores, da massa volúmica e do teor de humidade, variando normalmente no mesmo sentido destes parâmetros. Quanto aos elementos de construção, constituídos por um único material ou por camadas de materiais diferentes, podem ser utilizados vários parâmetros para traduzir a sua maior ou menor resistência à passagem do calor - resistência térmica, condutância térmica, coeficiente de transmissão térmica. O coeficiente de transmissão térmica é o parâmetro que habitualmente é mais utilizado em cálculos térmicos e define-se como sendo a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa (normalmente o interior e o exterior).

Para se atingir o objectivo de eficiência energética, os coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca devem ser tanto mais baixos quanto maior for a severidade do clima onde o edifício se insere. Em termos de regulamentação tem-se assistido a um progressivo aumento de exigência relativamente aos coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis, em função da zona climática, sendo expectável que esta tendência continue com a revisão da regulamentação que actualmente está em curso, em sintonia, aliás, com a directiva 2010/31/EU, que, como já se referiu anteriormente, aponta para edifícios com necessidades quase nulas de energia em 2020.

Os materiais e elementos que constituem a base de construção das envolventes, que devem assegurar prioritariamente as exigências de segurança e estabilidade, não possuem normalmente as características de isolamento térmico exigidas pela regulamentação, pelo que é necessário introduzir materiais adicionais com essa função específica. Estes materiais de isolamento térmico têm uma baixa condutibilidade térmica, em razão da sua baixa massa volúmica - poliestireno expandido, extrudido, lã de vidro, lã de rocha, espuma de poliuretano - e são dispostos em camadas com a espessura dimensionada para conferir à envolvente opaca o nível de resistência térmica pretendido.

Em termos de desempenho térmico, não é indiferente o posicionamento do material de isolamento nos elementos construtivos. Basicamente, o isolamento térmico pode ser disposto pela face interior ou pela face exterior dos elementos construtivos. No caso de paredes duplas pode ainda ser colocado no interior da caixa-de-ar - Figura 2.9. Cada tipo de posicionamento apresenta as suas vantagens e desvantagens.



**Figura 2.9 - Posicionamento do isolamento térmico em paredes: 1 - revestimento interior; 2 - revestimento exterior; 3 - pano simples de alvenaria; 4 - isolamento térmico; 5 - pano interior de alvenaria; 6 - pano exterior de alvenaria**

O isolamento térmico pelo exterior tem como vantagens principais a eliminação das pontes térmicas, o aproveitamento mais eficiente da inércia térmica interior dos edifícios, a redução do risco de condensações internas nos elementos construtivos e o aumento de protecção destes às solicitações dos agentes atmosféricos. Em contrapartida, um sistema de isolamento pelo exterior, por estar directamente exposto aos agentes atmosféricos e outros agentes agressivos, exige uma manutenção mais cuidada e melhores características de resistência e durabilidade dos materiais constituintes. Por razões de uniformidade do aspecto este tipo de isolamento deve ser estendido a todo o edifício ou, no mínimo, a uma fachada completa. Esta solução, comparada com outras, é também normalmente mais onerosa, pois exige a montagem de uma estrutura pelo exterior que permita a circulação e o acesso a toda a altura da fachada para a aplicação do isolamento.

A colocação do isolamento térmico na caixa-de-ar é a técnica mais utilizada na execução de paredes duplas exteriores. Neste caso o isolamento térmico fica protegido dos agentes exteriores e apenas o pano interior contribui para a inércia térmica, o que em geral é suficiente para evitar, como é desejável, que as variações acentuadas das solicitações térmicas exteriores se façam sentir no interior. Uma vez que o isolamento é interrompido ao nível dos pisos, as pontes térmicas não são automaticamente eliminadas, como no caso do isolamento térmico pelo exterior.

Finalmente, a colocação do isolamento térmico do lado interior dos elementos, tem como vantagens a facilidade da sua aplicação, que não exige meios nem equipamentos especiais, a possibilidade de ser efectuada apenas nas fracções do edifício necessitadas, e o facto de não implicar a descaracterização das fachadas, o que torna esta solução muito interessante em obras de reabilitação. Como desvantagens assinala-se a anulação da inércia térmica interior, a não eliminação das pontes térmicas e o aumento do risco de condensações internas nos elementos onde é aplicado.

#### **2.4.5 - Renovação do ar**

As actividades humanas (actividade fisiológica, confecção de alimentos, fumar) que se desenvolvem nos edifícios, bem como os próprios materiais (revestimentos sintéticos) e equipamentos (aparelhos de combustão a gás) neles presentes são muitas vezes geradores de

substâncias poluentes (monóxido de carbono, dióxido de carbono, odores, partículas de fumo), as quais, acima de dada concentração, afectam o conforto, o bem-estar e, no limite, são nocivas para a saúde. Noutros casos, as substâncias libertadas, embora não sejam consideradas poluentes no sentido estrito do termo, como é o caso do vapor de água, quando em excesso podem comprometer dadas exigências funcionais dos edifícios - conforto higrométrico e estado de conservação dos materiais, no caso do vapor de água - e por esta razão devem também ser objecto de controlo.

Em caso de não se poder conter ou eliminar a produção dessas substâncias (não é possível eliminar, por exemplo, a produção de dióxido de carbono proveniente da respiração), a via que normalmente é seguida é limitar a sua concentração no ar a valores que não ponham em causa a qualidade do ambiente interior em matéria de conforto e salubridade. Este objectivo consegue-se por diluição dessas substâncias através da renovação do ar interior por ar exterior (admitindo que este não é fonte de poluição), que pode ser realizada por processos naturais, mecânicos ou híbridos.

A renovação do ar interior de um edifício por ar exterior dá-se como resultado da diferença de pressão entre o interior e o exterior, provocando escoamentos em todos os pontos da envolvente em que há aberturas ou frinchas que permitam a passagem do ar. No caso da renovação do ar resultar da existência de aberturas, fixas ou móveis, expressamente criadas na envolvente, o processo corresponde ao que se designa por *ventilação*. Se, ao contrário, a renovação do ar se processar por aberturas - juntas, frinchas - não criadas para o efeito, o processo designa-se por *infiltração* (ou *exfiltração*).

No caso da ventilação, se as diferenças de pressões que causam o movimento do ar forem originadas naturalmente, por efeito da acção do vento ou de diferenças de temperatura, a ventilação diz-se *natural*; se essas diferenças de pressões forem produzidas artificialmente por um equipamento mecânico de insuflação ou extracção do ar, então a ventilação diz-se *mecânica*. Finalmente, a ventilação toma a designação de *híbrida* se conjugar os dois mecanismos referidos, natural e mecânico.

No caso da ventilação natural, que é aquela que vai ao encontro dos princípios de projecto passivo, as diferenças de pressão podem ser originadas pela diferença de temperatura existente entre o interior e o exterior do edifício ou pela acção do vento nas superfícies da sua envolvente.

No primeiro caso, a diferença de temperatura provoca uma variação da densidade do ar entre o interior e o exterior que origina um gradiente de pressões e a conseqüente circulação do ar entre os dois ambientes. Esta diferença de pressões será então função da diferença de temperaturas e do desnível entre a entrada e a saída do ar. Durante o Inverno, o ar interior mais quente sobe e flui para o exterior pelo topo do edifício (“efeito chaminé”), enquanto é substituído por ar mais frio do exterior que entra pela base; no Verão a situação inverte-se.

No segundo caso, a incidência do vento sobre um edifício cria sobre ele um campo de pressões cuja distribuição depende de numerosos factores - localização do edifício, sua conformação geométrica e relação com o contorno, direcção e velocidade do vento, etc.. Na face directamente exposta ao vento instalam-se pressões positivas, ou sobrepressões, ao passo que na face de tardo, devido à formação de uma zona de recirculação e conseqüente estagnação de fluido - Figura 2.10 -, as pressões são negativas, ou seja, correspondem a sucções. Deste modo,

pode-se tirar partido desta não uniformidade de pressões nas superfícies da envolvente para originar caudais através de aberturas criteriosamente posicionadas (ventilação cruzada).

Na Figura 2.10 ilustra-se o “efeito de chaminé” resultante do diferencial térmico entre o interior e o exterior, a par do processo já descrito de ventilação por acção do vento (ventilação cruzada).

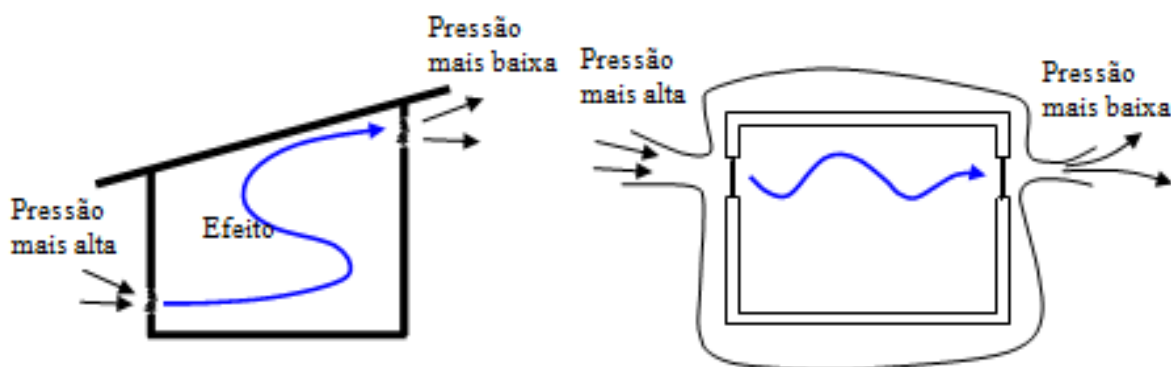


Figura 2.10 - Ventilação por acção térmica - “efeito chaminé” - e por acção do vento (ventilação cruzada)

Sendo ponto assente que a ventilação dos locais é necessária por razões de qualidade do ar interior, ela deve ser cuidadosamente ponderada dado que é geralmente fonte de trocas de calor que podem afectar negativa ou positivamente as condições de conforto. Assim, numa situação de Inverno, a ventilação deve ser reduzida ao mínimo indispensável para manter a qualidade do ar interior, pois a entrada de ar frio exterior tem um impacto negativo ao nível do conforto térmico e do consumo de energia de aquecimento. No Verão, um caudal de ventilação superior ao mínimo requerido tem normalmente um impacto menor, dado que neste caso é maior a proximidade de valores entre a temperatura do ar exterior e a temperatura interior de conforto. Para além disso, na estação quente, a ventilação pode desempenhar um importante papel no desempenho térmico do edifício por constituir um meio passivo a que se pode recorrer, quando a temperatura no exterior é inferior à temperatura interior, para promover a circulação do ar e remover as cargas térmicas em excesso acumuladas na construção no período diurno, por efeito da inércia térmica. A ventilação e a inércia térmica podem assim complementar-se no objectivo de melhorar o desempenho térmico do edifício, constituindo uma estratégia passiva de arrefecimento dos edifícios muito utilizada na arquitectura bioclimática.

## Capítulo 3 – Análise de sensibilidade e desenho factorial

### 3.1 - Análise de sensibilidade

O objectivo central deste trabalho consiste na análise do impacto de dados elementos de projecto, relacionados com a arquitectura e a construção, no desempenho térmico e energético dos edifícios. Esta tarefa é especialmente importante nas primeiras fases do projecto, na medida em que, estando ainda muitas das soluções por definir, dela podem resultar indicações preciosas que ajudem à tomada de decisões. Para o efeito estão disponíveis ferramentas de simulação computacional baseadas em modelos matemáticos que pretendem aproximar o mais possível da realidade toda a complexidade dos fenómenos de transferência de calor e respectivas interações que ocorrem nos edifícios. Estes modelos e programas de simulação, no contexto deste estudo, podem ser encarados como caixas negras que produzem um resultado (variável dependente) quando se fornece um dado conjunto de parâmetros de entrada (variáveis independentes), como se mostra na Figura 3.1.

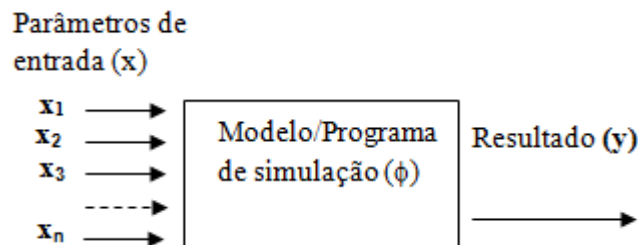


Figura 3.1 - Modelo de transformação de x em y

Em termos de modelo genérico,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  é o vector dos parâmetros de entrada e  $y$  é o resultado produzido pelo modelo, em que:  $y = \phi(x)$ . Para realizar uma simulação, a cada parâmetro de entrada é atribuído um único valor e, para o cenário de dados que assim se constitui, o modelo produz a saída de um resultado. Contudo, certeza e precisão não são normalmente atributos dos dados de entrada, o que afecta a confiança nos resultados obtidos. Na maior parte dos casos, os valores atribuídos aos parâmetros de entrada não são completamente conhecidos (incerteza) ou então dependem de outros factores (variabilidade). Assim, e de forma geral, os parâmetros podem ser variáveis aleatórias, o que implica a existência de uma incerteza que é função das distribuições de probabilidade admitidas (que transportam quase sempre uma certa dose de subjectividade), ou então podem apresentar uma heterogeneidade intrínseca, a que se associa uma variabilidade que pode ser descrita por uma gama de valores possíveis. Qualquer deste tipo de parâmetros, pelas suas características, pode influenciar substancialmente os resultados ou, de outra forma, os modelos são sensíveis aos parâmetros de entrada, o que sugere a realização de análises específicas para apurar quais as implicações nos resultados gerados.

Os modelos podem ser sensíveis aos parâmetros de entrada de duas formas distintas: (1) a variabilidade ou incerteza associada a um parâmetro é propagada através do modelo resultando numa larga contribuição para a variabilidade/incerteza global do resultado; e (2) os resultados do modelo podem estar fortemente correlacionados com um parâmetro de entrada, de forma que pequenas variações deste parâmetro produzem significativas variações no resultado.

A avaliação da influência dos parâmetros da modelação na magnitude e no grau de incerteza/variabilidade dos resultados, sobretudo quando a incerteza/variabilidade dos parâmetros é significativa, é assim um aspecto relevante no projecto de concepção de um edifício, tendo em conta os diferentes objectivos específicos a atingir: aumento da eficiência energética, minimização dos impactes ambientais, redução de custos, etc..

Podem assim identificar-se dois tipos de análises importantes - análise de sensibilidade e análise de incerteza - aos quais estão associados determinados tipos de técnicas. As técnicas utilizadas para a análise de sensibilidade são as mesmas para a análise de incerteza. A diferença entre as duas análises está na interpretação dos resultados. A análise de sensibilidade procura quantificar os impactes na resposta do modelo, ou desempenho dos sistemas, por variações dos dados de entrada, que podem estar associadas a erros ou a soluções alternativas de projecto. A análise de incerteza, por seu turno, procura avaliar a incerteza da resposta do modelo devida à incerteza dos parâmetros de entrada, recorrendo à teoria estatística para estimar intervalos de confiança em face das distribuições de probabilidade admitidas (em muitos casos de forma subjectiva) para os parâmetros. Tanto a incerteza como a variabilidade dos parâmetros de entrada podem ser vistos como desvios em relação aos seus valores médios e daí a possibilidade do emprego das mesmas técnicas em ambas as análises.

Neste trabalho, tendo em conta os objectivos fixados, será dada especial ênfase à análise de sensibilidade. Como se referiu, a análise de sensibilidade tem por objectivo descrever em que medida os resultados do modelo são afectados por variações dos dados de entrada. Nesta perspectiva, a análise de sensibilidade pode ter várias aplicações importantes na modelação dos sistemas e dos efeitos dos fenómenos e suas interacções. Por exemplo, pode ser utilizada para a determinação dos parâmetros [14]: que necessitam de um estudo adicional para melhorar o conhecimento do modelo e a qualidade dos resultados; que podem ser eliminados do modelo por terem pouca influência no resultado; que fornecem a maior contribuição para a variabilidade dos resultados; que estão mais fortemente correlacionados com o resultado.

Os métodos de análise de sensibilidade são muito numerosos e podem ser classificados segundo diferentes ópticas - métodos locais, globais, matemáticos, estatísticos. Não é objectivo deste trabalho a identificação e apresentação de todos estes métodos mas apenas dos que permitem, de uma forma mais directa, transmitir as bases gerais de uma análise de sensibilidade. Desta forma, apenas se referirão os métodos que avaliam a sensibilidade do modelo para uma gama de variação restrita dos parâmetros de entrada e em que a sensibilidade é descrita, simplesmente, a partir de variações dos resultados que se obtêm por variações impostas dos parâmetros. Ficam excluídos desta apresentação os métodos de natureza estatística que consideram a variabilidade dos parâmetros caracterizada por distribuições de probabilidade e em que a sensibilidade é descrita a partir da variância que fica associada à distribuição obtida para os resultados.

### **3.1.1 - Método diferencial de análise da sensibilidade**

O método diferencial, também conhecido por método directo, é a base de quase todas as outras técnicas de análise de sensibilidade. Este método é muito utilizado para avaliar a sensibilidade do resultado a pequenos desvios dos dados em torno de um ponto do espaço dos parâmetros de entrada. Um coeficiente de sensibilidade (CS) associado a um dado parâmetro ( $x$ ) representa a variação do resultado do modelo em relação à variação desse parâmetro quando os restantes

permanecem constantes. Uma pequena perturbação  $\Delta x$  no ponto do espaço dos parâmetros correspondente aos dados de entrada, como uma variação de  $\pm 1\%$ , por exemplo, pode ser utilizada para calcular a variação do resultado do modelo, vindo para o coeficiente de sensibilidade:

$$CS = \frac{\phi(x + \Delta x) - \phi(x - \Delta x)}{\phi(x)} \quad (3.1)$$

O resultado do modelo para um dado cenário de valores constantes dos parâmetros (dados de entrada) é considerado o caso base. Este caso base é normalmente construído com os parâmetros nos seus valores médios, sendo depois a análise diferencial estruturada a partir deste caso base. Uma das desvantagens apontadas a este método directo é o facto dos coeficientes de sensibilidade dependerem do caso base escolhido, não sendo possível extrapolar estes coeficientes, no espaço dos parâmetros do modelo, para uma posição afastada do caso base.

A análise diferencial de sensibilidade dos parâmetros é baseada na diferenciação parcial do modelo na forma agregada, podendo ser utilizada também para propagação de incertezas. No caso mais simples, a variável dependente  $y$ , que é função das variáveis dependentes  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , é descrita por uma série de Taylor truncada no termo de primeira ordem. Considerando esta aproximação linear, a variância  $V(y)$  (quadrado do desvio, em relação ao valor médio, que fica associado a  $y$ ) de  $y$  pode ser calculada através da fórmula de propagação do erro, vindo:

$$V(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad (3.2)$$

A variância em  $y$  é utilizada como uma medida da incerteza das estimações do modelo, enquanto a variância em  $x_i$ , ponderada pela primeira derivada de  $y$  em relação a  $x_i$ , fornece uma medida da sensibilidade do modelo a  $x_i$ . Este método, por utilizar uma aproximação linear da função  $y$ , é apenas válido para pequenas incertezas.

Uma outra forma de se indicar a sensibilidade é através do valor da derivada parcial normalizada pelo valor médio de  $x$  e  $y$ , constituindo o coeficiente de sensibilidade:

$$I_i = \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}_i} \quad (3.3)$$

onde a barra significa valor médio da variável. Em termos numéricos, as derivadas parciais podem ser aproximadas por diferenças finitas e o coeficiente anterior pode escrever-se na forma:

$$I_i = \frac{\% \Delta y}{\% \Delta x_i} \quad (3.4)$$

onde as respostas do modelo devem ser obtidas para pequenas perturbações dos parâmetros de entrada. Nesta forma fica evidente que este coeficiente representa a relação, em percentagem, entre os desvios da resposta e do parâmetro relativamente aos respectivos valores médios. Por exemplo, se  $I=0.5$ , então um desvio de 1% do valor médio de  $x$  resultará num desvio 0.5% no

valor médio de  $y$ . Este coeficiente tem um alcance restrito, pois toma em conta apenas a taxa de variação do respectivo parâmetro de entrada, sem entrar em conta com a sua variação absoluta.

Um índice de sensibilidade com sentido mais amplo é o que assenta na definição:

$$S_i = \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \frac{V(x_i)}{V(y)} \quad (3.5)$$

que corresponde a dividir cada termo do somatório da equação (3.2) por  $V(y)$ . Este índice é uma relação entre a variância global e a local em relação a um parâmetro de entrada. O índice de sensibilidade  $S_i$  indica qual o impacto do desvio de uma entrada no desvio de uma saída. No método diferencial a soma dos índices de sensibilidade  $S_i$  é igual a 1 e quanto maior for o índice associado a um parâmetro de entrada maior a sensibilidade do modelo a este parâmetro.

### 3.1.2 - Análise da sensibilidade a uma variável de cada vez

Conceptualmente, o método mais simples para efectuar uma análise de sensibilidade, e que é sobretudo aplicável a modelos lineares, consiste em correr o modelo variando um parâmetro de cada vez, enquanto os restantes permanecem nos valores do cenário de referência. Desta forma é possível avaliar a sensibilidade a cada parâmetro de entrada por observação da sua influência no resultado do modelo. A forma mais comum de avaliar a sensibilidade por este método é incrementar o valor de cada parâmetro de uma dada percentagem (em relação ao valor de referência), com os outros mantidos constantes, e quantificar a variação da resposta do modelo. Este tipo de análise é designado por sensibilidade *local* (análise de sensibilidade local), uma vez que só permite avaliar o impacto na resposta do modelo de pequenas variações dos parâmetros em torno do cenário de referência (traduzido, por exemplo, por valores médios dos parâmetros), em lugar de envolver todo o espaço dos parâmetros de entrada.

Uma avaliação mais potente da sensibilidade local é examinar as alterações no resultado quando se faz variar cada parâmetro de um dado número de desvios-padrão ( $\pm n\sigma$ ). Esta medida de sensibilidade toma em conta a variabilidade dos parâmetros e o consequente impacto nos dados de saída. Trata-se de uma análise similar à descrita acima com a diferença de, em lugar de se fazer variar os parâmetros de uma percentagem do seu valor de referência, essa variação é feita a partir de um dado número de desvios-padrão das distribuições de probabilidade dos valores de entrada desses parâmetros.

### 3.1.3 - Desenho factorial

Uma das limitações do método diferencial é a impossibilidade de avaliar as interações dos parâmetros, o que pode originar análises incorrectas do modelo. Uma forma de ultrapassar esta dificuldade é recorrer ao desenho factorial, que é uma técnica de planeamento de experiências que pode ser transposta para as simulações computacionais, onde todas as combinações dos valores tomados pelos parâmetros são corridas no modelo. O desenho factorial envolve a escolha de um dado número de valores (amostras, no caso de uma situação experimental) para cada parâmetro e a corrida do modelo para todas as combinações de valores (amostras). Os resultados obtidos por este processo são então utilizados para estimar a sensibilidade aos parâmetros. Considere-se, por exemplo, um modelo com 5 parâmetros e, para cada parâmetro, a



possibilidade de tomar 3 valores (níveis) distintos. O plano factorial requer  $3^5=243$  corridas do modelo. É evidente, por este exemplo, que o aumento do número de parâmetros rapidamente torna proibitivo a utilização do modelo dado o muito elevado número de corridas envolvido. De forma a reduzir o esforço de cálculo, podem conceber-se planos fraccionados, assim designados por não envolverem todas as combinações dos parâmetros e, decorrentemente, exigirem um menor número de simulações. Devido a este facto, os planos fraccionados não permitem aceder ao conhecimento completo do comportamento do sistema. No entanto, em muitos casos a informação que fornecem é suficiente para o estudo em causa, pelo que constituem uma alternativa com uma boa relação custo/eficácia.

### 3.1.4 - Índice de sensibilidade

Uma outra forma simples de avaliar a sensibilidade paramétrica do modelo é através de um índice definido pela diferença, em percentagem, entre os resultados obtidos quando se faz variar um parâmetro, com todos os outros mantidos constantes, entre os valores máximo e mínimo de uma gama plausível de valores dentro da qual o parâmetro pode variar:

$$IS = \frac{\phi(x_{m\acute{a}x}) - \phi(x_{m\grave{m}n})}{\phi(x_{m\acute{a}x})} \quad (3.6)$$

em que  $\phi(x_{m\acute{a}x})$  e  $\phi(x_{m\grave{m}n})$  representam, respectivamente, os valores do resultado para os limites máximo e mínimo do parâmetro. A construção deste índice é individual e pode ser feita para qualquer parâmetro. Ao contrário do coeficiente de sensibilidade da análise diferencial, que contempla apenas pequenos incrementos dos parâmetros, o índice anterior leva em conta todo o intervalo de variação dos valores dos parâmetros. Nesta medida, fornece uma boa indicação da variabilidade do modelo.

A análise de sensibilidade neste trabalho recorrerá ao desenho ou plano factorial, que constitui um método de planeamento de experiências cujos fundamentos são apresentados no subcapítulo seguinte.

## 3.2 - Desenho de experiências

A análise de sensibilidade realizada neste trabalho recorrerá a estratégias que se enquadram na metodologia do planeamento ou desenho de experiências (DOE - Design of Experiments) [15]. Esta metodologia está provavelmente na origem da análise de sensibilidade aplicada a modelos computacionais. Embora originalmente desenvolvida para experiências laboratoriais [16], a metodologia foi depois estendida à análise computacional, que é actualmente um dos seus grandes campos de aplicação. O planeamento ou desenho experimental é uma técnica de planeamento de experiências, utilizando critérios científicos e estatísticos definidos, com o objectivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo. Realizam-se experiências em todas as áreas do conhecimento, normalmente para descobrir algo acerca de determinado sistema ou processo. Por experiência entende-se uma investigação em que o sistema em estudo está sob controlo do investigador. Os planos ou desenhos de experiências permitem organizar melhor as experiências que acompanham uma investigação científica. Eles são aplicáveis a todas as áreas em que se pretenda investigar a

ligação que existe entre uma grandeza de interesse,  $y$ , e as variáveis,  $x_i$ , ou seja, uma relação na forma:

$$y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.7)$$

Num processo deste tipo, o planeamento das experiências, ou seja, a definição das variáveis a manipular, o número de repetições das experiências e a ordem pela qual devem ser realizadas, deve ser de forma a poder estabelecer, com um grau de confiança predefinido, uma suposta relação causa-efeito entre essas variáveis e a grandeza de interesse. Experiências bem planeadas podem produzir maior quantidade e qualidade de informação, em menos tempo e com menores custos, do que experiências conduzidas de forma aleatória ou não planeada. O bom planeamento de experiências deve seguir regras bem definidas não só quanto à condução das experiências, como também à interpretação dos resultados. Existem numerosos planos de experiências, que se adaptam aos mais variados tipos de problemas com interesse para a indústria e desenvolvimento de produtos. Seguidamente apresentam-se os princípios fundamentais desta ciência e os tipos de planos que serão utilizados neste trabalho.

A compreensão do método dos planos de experiências apoia-se sobre duas noções essenciais, a de espaço experimental e a de modelação matemática das grandezas estudadas.

### 3.2.1 - Noção de espaço experimental

A grandeza que é medida numa experiência designa-se por resposta, e é a grandeza de interesse. O valor desta grandeza pode depender de diferentes variáveis, que também tomam a designação de factores. A resposta depende, pois, de um ou mais factores. Cada factor pode ser representado num eixo graduado e orientado (Figura 3.2) e o valor que toma numa experiência,  $x$ , designa-se por nível. Quando se avalia o impacto de um factor, em geral restringe-se a sua variação a um dado intervalo de valores, compreendido entre um limite inferior,  $x^-$ , que é o nível baixo, e um limite superior,  $x^+$ , que é o nível alto.

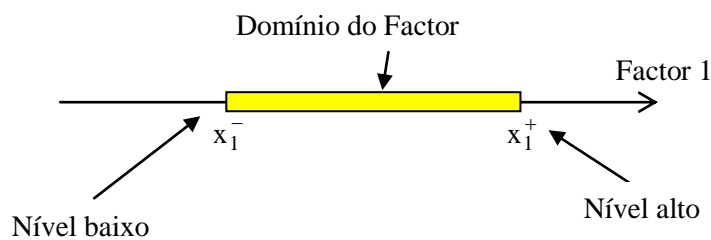


Figura 3.2 - Domínio de um factor

O conjunto de todos os valores que um factor pode tomar, entre o nível baixo e o nível alto, denomina-se domínio de variação do factor.

No caso de dois factores, a sua representação é feita em dois eixos ortogonais que definem um referencial cartesiano e um espaço euclidiano a duas dimensões, designado por espaço experimental. O nível  $x_1$  do factor 1 e o nível  $x_2$  do factor 2 podem ser considerados como as coordenadas de um ponto do espaço experimental - Figura 3.3. Uma dada experiência fica assim representada por um ponto neste sistema de eixos. Um plano de experiências é representado por um conjunto de pontos experimentais.

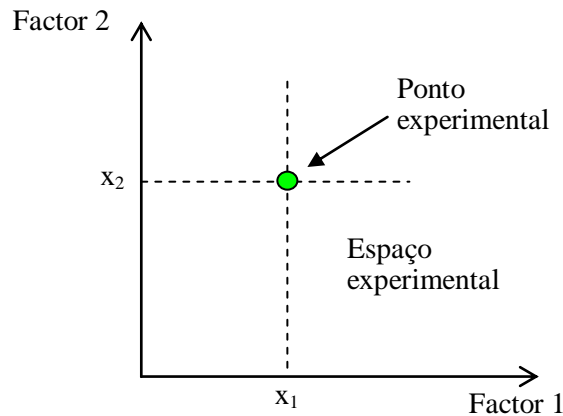


Figura 3.3 - Espaço e ponto experimental

O conjunto dos domínios dos factores denomina-se por domínio de estudo. Este domínio de estudo é a zona do espaço experimental seleccionada para a realização das experiências. Um plano experimental, ou seja, um conjunto de experiências bem definido, é representado por pontos repartidos pelo domínio de estudo - Figura 3.4. Esta forma de representar uma experimentação por pontos no espaço cartesiano constitui uma representação geométrica do estudo. Um outro tipo de representação do estudo, sob a forma de tabelas, é apresentado mais à frente.

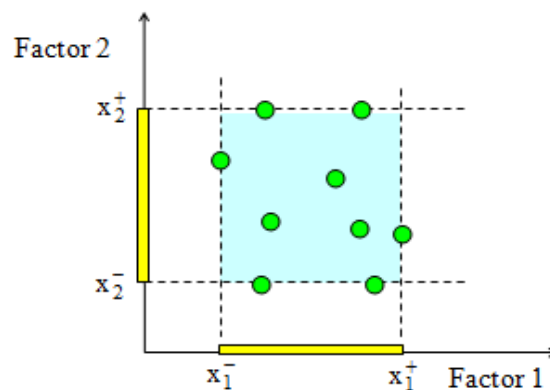


Figura 3.4 - Distribuição de pontos experimentais no domínio de estudo

As definições apresentadas aplicam-se com generalidade às variáveis contínuas, mas pode acontecer que as variáveis sejam discretas. Neste caso pode-se ainda falar de espaço experimental, mas ele não terá as mesmas propriedades que o espaço das variáveis contínuas.

A cada ponto experimental, definido por um par de coordenadas  $x_1$  e  $x_2$ , corresponderá uma resposta  $y$ . Torna-se assim necessário definir um terceiro eixo coordenado, ortogonal ao espaço experimental, para representar esta resposta. A representação geométrica do plano de experiências e da resposta necessita de um espaço com uma dimensão mais do que o espaço experimental. Um plano a dois factores utiliza um espaço a três dimensões para ser representado: uma dimensão para a resposta e duas dimensões para os factores. A cada ponto do domínio de estudo corresponde uma resposta. Ao conjunto de todos os pontos do domínio de estudo corresponde um conjunto de respostas que se posicionam sobre uma superfície designada por superfície de resposta - Figura 3.5. O número e a colocação dos pontos das experiências é

um problema fundamental dos planos de experiências, que procuram, com um número limitado de experiências, obter a melhor precisão possível sobre a superfície de resposta.

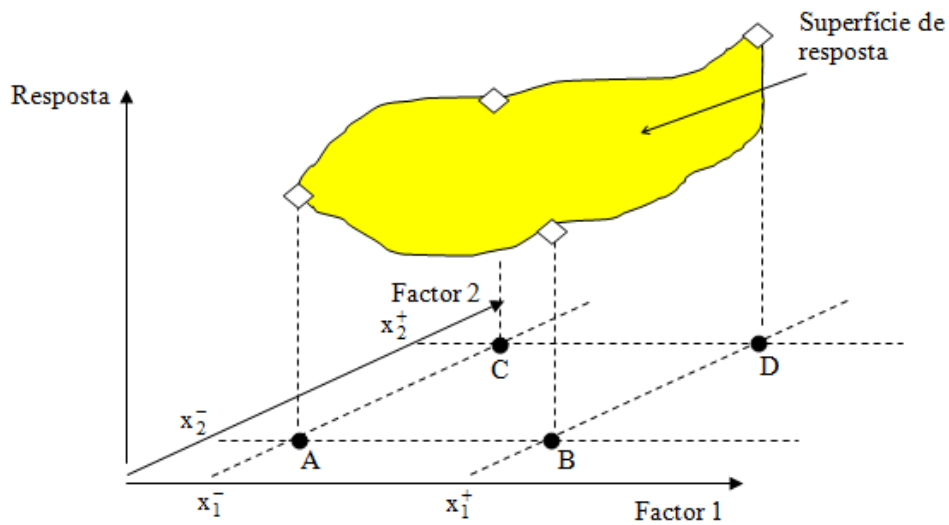


Figura 3.5 - Superfície de resposta

### 3.2.2 - Noção de modelação matemática

Um dos objectivos de um plano de experiências é a constituição de uma função matemática que relacione a resposta com os factores. Para o efeito, toma-se o desenvolvimento da função em série de Taylor (em várias variáveis), o que origina um polinómio de grau mais ou menos elevado, consoante a ordem de aproximação pretendida:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (3.8)$$

em que:

y - resposta, ou a grandeza de interesse da experiência;

$x_i$  - valor atribuído em cada experiência pelo investigador ao factor i, compreendido entre  $x_i^-$  e  $x_i^+$ , e é um dado conhecido;

$a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  - coeficientes do modelo matemático adoptado - não são conhecidos e devem ser obtidos a partir dos resultados das experiências.

Se os valores tomados pelos factores forem quantitativos, ou seja, tiverem unidades que também podem ser diferentes entre factores (temperatura, pressão, massa, energia, etc.), convém adimensionalizar (normalizar) os factores, de forma que o seu domínio de variação no novo referencial de medida fique sempre compreendido entre -1 e +1. Assim, se  $x^+$  for o nível alto e  $x^-$  o nível baixo, os factores podem ser normalizados para o domínio [-1;+1] através da transformação:

$$X = \frac{2 \times (x - \bar{x})}{x^+ - x^-} \quad (3.9)$$

em que  $\bar{x} = (x^+ + x^-)/2$ . É fácil confirmar que para  $x = x^+$ , então  $X=1$  e para  $x = x^-$ , então  $X=-1$ .

O interesse em modelar a resposta por um polinómio é o de poder calcular depois todas as respostas do domínio de estudo sem necessidade de realizar experiências. A cada ponto experimental corresponde um valor de resposta. Esta resposta é modelada por um polinómio - equação (3.8) - cujos coeficientes são as incógnitas a determinar. A execução do plano de experiências fornece assim um conjunto de  $n$  equações (correspondente ao número de experiências realizadas) a  $p$  incógnitas (se o modelo escolhido contiver  $p$  coeficientes a determinar). Numa notação simplificada, este sistema pode escrever-se:

$$\underline{\underline{y}} = \underline{\underline{X}} \underline{\underline{a}} + \underline{\underline{e}} \quad (3.10)$$

em que:

$\underline{\underline{y}} = n \times 1$  é o vector das respostas;

$\underline{\underline{X}} = n \times p$  é a matriz do modelo, que depende dos pontos experimentais escolhidos;

$\underline{\underline{a}} = p \times 1$  é o vector dos coeficientes;

$\underline{\underline{e}} = n \times 1$  é o vector erro.

O termo adicional do erro - diferença entre a resposta observada e a resposta estimada - que aparece na equação (3.10) destina-se a contemplar os desvios que existem, por um lado, devido ao facto de o modelo não reproduzir exactamente a situação real (erro de ajustamento), e por outro, devido à eventual natureza aleatória da resposta, ou seja, medições repetidas de um mesmo ponto experimental não produzem a mesma resposta (erro experimental).

O sistema anterior possui um número de equações inferior ao número de incógnitas: existem  $n$  equações e  $n+p$  incógnitas (o erro é também desconhecido). Para o resolver utiliza-se um método de regressão linear baseado no critério dos mínimos quadráticos. O método dos mínimos quadráticos estima  $\underline{\underline{a}}$  de forma que a soma ( $S$ ) dos quadrados dos erros (resíduos) seja mínima. Sendo  $\underline{\underline{e}} = \underline{\underline{y}} - \underline{\underline{X}} \underline{\underline{a}}$  e tendo em atenção que aquela soma pode ser escrita como  $\underline{\underline{e}}^T \underline{\underline{e}}$ , em que  $\underline{\underline{e}}^T$  designa a matriz transposta de  $\underline{\underline{e}}$ , vem:

$$S(\underline{\underline{a}}) = \underline{\underline{e}}^T \underline{\underline{e}} = (\underline{\underline{y}} - \underline{\underline{X}} \underline{\underline{a}})^T (\underline{\underline{y}} - \underline{\underline{X}} \underline{\underline{a}}) \quad (3.11)$$

A minimização obtém-se derivando  $S(\underline{\underline{a}})$  em relação a  $\underline{\underline{a}}$  e igualando o resultado a zero. Obtém-se, assim, os valores estimados dos coeficientes:

$$\hat{\underline{\underline{a}}} = (\underline{\underline{X}}^T \underline{\underline{X}})^{-1} \underline{\underline{X}}^T \underline{\underline{y}} \quad (3.12)$$

em que  $\underline{\underline{X}}^T$  é a matriz transposta de  $\underline{\underline{X}}$ .

### 3.3 – Plano factorial completo a dois níveis

Existem várias estratégias de experimentação para estudar o efeito dos factores sobre um determinado sistema (e, conseqüentemente, sobre uma dada variável-resposta). Um efeito representa uma variação da resposta a uma variação de nível de um factor. A estratégia mais correcta para a avaliação dos efeitos, nos casos que envolvem vários factores, é realizar uma experiência factorial, na qual se variam simultaneamente todos (os níveis dos) factores em estudo, em lugar de se fazer variar um factor de cada vez. Numa estratégia em que se faz variar um factor de cada vez estuda-se, sucessivamente, o efeito sobre a variável-resposta de cada um dos factores mantendo os restantes constantes. O principal inconveniente da estratégia um factor-de-cada-vez é não permitir estudar as possíveis interacções dos diversos factores.

De facto, os factores raramente agem de forma independente uns dos outros. A influência de um factor sobre a resposta pode depender do nível dos outros factores. Assim, existe interacção quando o efeito (sobre a resposta) de um factor não é o mesmo quando se faz variar o nível de outro factor. É importante notar que a interacção é entre factores e não entre níveis.

No exemplo que se segue - Figura 3.6 -, de um modelo com 2 factores, cada um podendo assumir dois níveis ( $x_1^+$ ,  $x_1^-$ ,  $x_2^+$ ,  $x_2^-$ ), se a resposta do modelo for a que se mostra na Figura 3.6 a), onde os segmentos de recta são paralelos, então não existe interacção. Na Figura 3.6 b), ao contrário, os segmentos de recta não são paralelos (podendo eventualmente cruzar-se) e neste caso existe interacção. Quanto maior for a diferença de declives mais forte é a interacção.

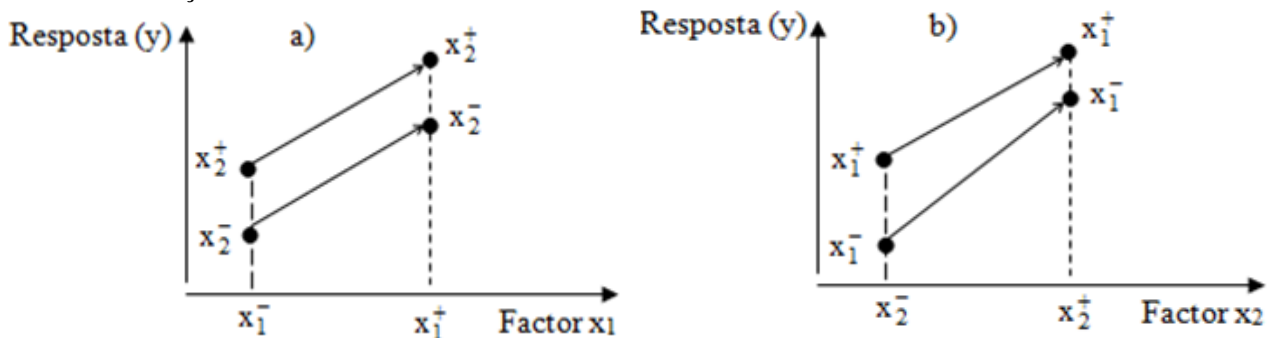


Figura 3.6 - Resposta de um modelo no caso de inexistência (a) e existência de interacção (b)

Repare-se que o efeito do factor  $x_1$ , de acordo com a definição dada, é  $y_{x_1^+} - y_{x_1^-}$  e pode ser calculado com  $x_2$  no nível alto ( $x_2^+$ ) ou  $x_2$  no nível baixo ( $x_2^-$ ). No caso da Figura 3.6 a), o efeito de  $x_1$  é o mesmo independentemente do nível do factor  $x_2$ , enquanto na Figura 3.6 b), o efeito varia com o nível do factor  $x_2$ . Esta noção de interacção é desenvolvida mais à frente.

O estudo completo do problema, que envolve todas as combinações possíveis entre níveis de factores, constitui o designado desenho ou plano factorial completo. Se “k” for o número de factores, e “2” forem os níveis de variação considerados para cada factor, o plano factorial completo representa-se por “ $2^k$ ” e produz  $2^k$  pontos factoriais, correspondendo a  $2^k$  experiências (ou simulações). Os pontos factoriais podem ser numerados em correspondência com o número da experiência a que dizem respeito.

A Figura 3.7 mostra um exemplo para um plano  $2^2=4$  pontos factoriais, representado na forma geométrica e com os níveis na forma normalizada.

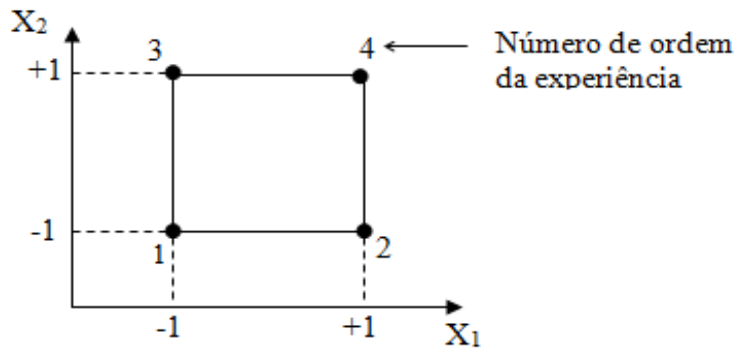


Figura 3.7 - Esquema do desenho  $2^2$ - representado na forma geométrica (gráfica)

A Figura 3.8 mostra um exemplo para um plano  $2^3=8$  pontos factoriais, representado na forma geométrica e com os níveis na forma normalizada.

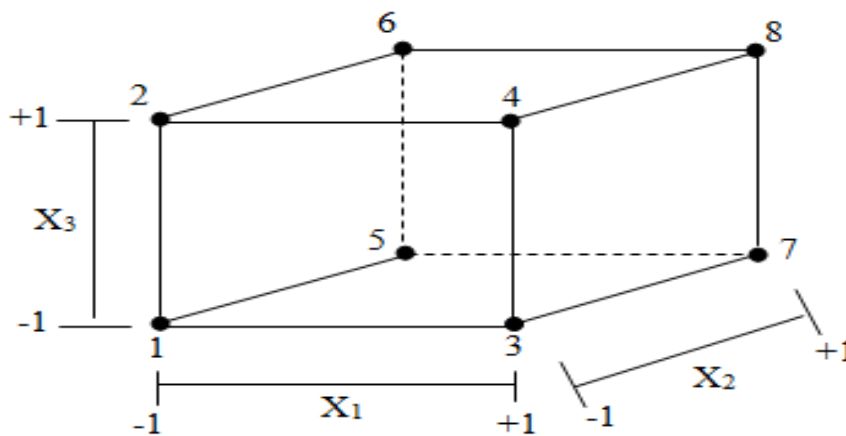


Figura 3.8 - Esquema do desenho  $2^3$ - representado na forma geométrica (gráfica)

As representações geométricas (gráficas) são cómodas, mas desde que o número de factores seja superior a 3 deixam de poder ser empregues. Para os espaços multi-dimensionais, adopta-se uma representação sob a forma de tabela. As tabelas seguintes - Quadros 3.1 e 3.2 - correspondem aos casos das figuras anteriores: são as chamadas matrizes do desenho, onde se mostram os níveis a que são colocados os factores em cada experiência.

Quadro 3.1 - Matriz do desenho  $2^2$

Experiência	Factor	
	$X_1$	$X_2$
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
$4=2^2$	+1	+1

Quadro 3.2 - Matriz do desenho  $2^3$

Experiência	Factor		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
$8 = 2^3$	+1	+1	+1

A construção destas tabelas de forma padronizada é generalizável. Assim, a primeira coluna começa com -1 e alterna o sinal para as  $2^k$  experiências. A segunda coluna começa com -1 repetido duas vezes, seguido de +1 repetido duas vezes e esta alternância de sinal prossegue até perfazer as  $2^k$  experiências. A terceira coluna começa com -1 repetido 4 vezes, seguido de +1 repetido 4 vezes e esta alternância de sinal prossegue até atingir as  $2^k$  experiências. Em geral, a coluna  $n$  começa com  $2^{n-1}$  repetições de -1, seguida de  $2^{n-1}$  repetições de +1, prosseguindo a alternância de sinal até ser atingido o número total de  $2^k$  experiências. Esta forma de organizar o desenho das experiências é designada por ordem padrão (standard order). Ainda, garante-se com este arranjo que todas as colunas da matriz são ortogonais entre si.

Para além das matrizes de desenho, também se constituem as matrizes de análise ou de cálculo, que mostram as colunas do desenho e as interações, a que se acrescenta a coluna com os resultados das experiências. As tabelas seguintes - Quadros 3.3 e 3.4 - mostram essas matrizes para os desenhos  $2^2$  e  $2^3$ .

Quadro 3.3 - Matriz de cálculo para o desenho  $2^2$

Experiência	I	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	y
1	+1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_3$
$4=2^2$	+1	+1	+1	+1	$y_4$

Quadro 3.4 - Matriz de cálculo para o desenho  $2^3$

Experiência	I	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$X_3$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	y
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	$y_4$
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$y_5$
6	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	$y_6$
7	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	$y_7$
$8 = 2^3$	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$y_8$



No caso de uma experiência laboratorial, os resultados são normalmente variáveis aleatórias, pelo que a mesma experiência (ponto experimental), se repetida, fornece em geral resultados distintos. Nestes casos, para obter uma informação mais completa do problema e melhorar a representatividade do modelo, as experiências devem ser repetidas e os diferentes resultados registados. Desta forma, em vez de uma resposta por cada ponto experimental, as matrizes de cálculo incluem todas as respostas obtidas, que depois são tratadas estatisticamente. O Quadro 3.5 apresenta um exemplo deste caso para um desenho  $2^2$ , onde estão representadas as várias replicações de cada experiência e os respectivos valores médios.

**Quadro 3.5 - Matriz de cálculo para o desenho  $2^2$  com replicação**

Experiência	I	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$y_{i1}$	$y_{i2}$	...	$y_{in}$	$\Sigma y_i$	$\bar{y}_i$
1	+1	-1	-1	+1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_1$	$\bar{y}_1$
2	+1	+1	-1	-1	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_2$	$\bar{y}_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_{31}$	$y_{32}$	...	$y_{3n}$	$y_3$	$\bar{y}_3$
$4=2^2$	+1	+1	+1	+1	$y_{41}$	$y_{42}$	...	$y_{4n}$	$y_4$	$\bar{y}_4$

Uma simulação ou experiência computacional é determinística, no sentido em que para as mesmas variáveis de entrada o resultado obtido é sempre o mesmo. Desta forma, este é um problema onde não existe replicação das experiências. O presente trabalho assenta nesta hipótese, ou seja, cada experiência, que representa uma simulação computacional com os factores em dados níveis, produz um resultado único.

### 3.3.1 - Equação do modelo

A partir da matriz de cálculo do desenho de experiências, e do conhecimento das respostas para cada experiência, pode partir-se para o estabelecimento da equação do modelo. Seguem-se os passos para o estabelecimento desta equação para o caso mais simples do desenho  $2^2$ . Este caso é facilmente generalizável para desenhos de ordem superior. No caso de um desenho  $2^2$ , e considerando um modelo linear com interacção, a equação representativa é um polinómio do primeiro grau em relação a cada factor:

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 \quad (3.13)$$

onde os factores aparecem na sua forma adimensional e variando todos entre -1 e +1.

Com base na matriz de cálculo representada no Quadro 3.3, onde são conhecidos os resultados  $y_i$  das experiências (simulações computacionais), pode constituir-se o seguinte sistema de equações:

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} \quad (3.14a)$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (3.14b)$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} \quad (3.14c)$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} \quad (3.14d)$$

A resolução analítica do sistema fornece as seguintes relações para os coeficientes:

$$a_0 = (+y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/4 \quad (3.15a)$$

$$a_1 = (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4)/4 \quad (3.15b)$$

$$a_2 = (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4)/4 \quad (3.15c)$$

$$a_{12} = (+y_1 - y_2 - y_3 + y_4)/4 \quad (3.15d)$$

Repare-se que a forma de cálculo dos coeficientes pode ser facilmente implementada em forma de rotina, pois verifica-se que cada coeficiente pode obter-se a partir da coluna do factor respectivo, adicionando as respostas das linhas com os sinais da coluna e efectuando a média.

O sistema anterior pode também escrever-se na forma matricial, como se mostra:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

e que no fundo corresponde à aplicação da equação (3.12). De facto, sendo  $\underline{\underline{X}}$  a matriz de cálculo do Quadro 3.3 e:

$$\underline{\underline{X}}^T \underline{\underline{X}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\left(\underline{\underline{X}}^T \underline{\underline{X}}\right)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

é fácil verificar a correspondência entre a Equação (3.12) e o sistema matricial (3.16).

Repare-se que aqui não há lugar à aplicação do método dos mínimos quadráticos, uma vez que o número de experiências é o estritamente necessário para a determinação do modelo, não havendo a redundância causada por um número de observações maior do que o número de variáveis do modelo, que é o que acontece quando há replicação de experiências.

### 3.3.2 - Efeito principal e global de um factor

O estudo da influência de um factor num dado nível na resposta do sistema faz-se comparando a média das respostas obtidas nesse nível com a média geral das respostas (efeito de uma variável

independente sobre a variável dependente ignorando os efeitos de todas as outras variáveis independentes, ou seja, com todas as outras variáveis independentes nos seus valores médios). Esta influência assim definida designa-se por efeito principal e, para o factor  $X_1$  do sistema em análise, no nível +1, o seu valor é:

$$\alpha_{+1} = \frac{1}{2}(y_2 + y_4) - \mu \quad (3.19)$$

sendo  $\mu = \sum y_i / 4$  a média geral das respostas. Repare-se que esta média corresponde ao coeficiente  $a_0$  da equação (3.15a) e que representa a resposta do sistema quando todos os factores são nulos (média entre +1 e -1), o que equivale a dizer que corresponde ao valor da resposta no centro do domínio de estudo ( $X_1=X_2=0$ ).

Procurando relacionar a definição de efeito principal - equação (3.19) - com os coeficientes definidos pela equação (3.15), verifica-se que

$$\alpha_{+1} = \frac{1}{2}(y_2 + y_4) - \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) = a_1 \quad (3.20)$$

ou seja, o coeficiente  $a_1$  constitui o efeito principal do factor  $X_1$  na resposta do modelo.

Outra forma de chegar ao mesmo resultado é partir da equação geral (3.13) e calcular o efeito para o nível médio do factor  $X_2$ , ou seja, com  $X_2=(-1+1)/2=0$ . Daqui resulta:

$$y = a_0 + a_1 X_1 \quad (3.21)$$

Repare-se que ao tomar  $X_2$  com o valor médio, a resposta  $y$  para um nível de  $X_1$  é uma resposta média. Se o nível de  $X_1$  for o nível alto (=1), então, pelo Quadro 3.3, que mostra duas respostas quando  $X_1$  está no nível alto ( $y_2$  e  $y_4$ ), tem-se  $y = y^+ = (y_2 + y_4)/2$ . Se  $X_1$  tomar o nível baixo (= -1), então, de forma idêntica,  $y = y^- = (y_1 + y_3)/2$ .

Para obter o significado de  $a_1$ , faz-se  $X_1=1$  (nível alto), donde:

$$a_1 = y^+ - a_0 \quad (3.22)$$

De forma equivalente, para o nível -1, o efeito principal seria:

$$\alpha_{-1} = \frac{1}{2}(y_1 + y_3) - \mu \quad (3.23)$$

verificando-se facilmente que  $\alpha_{+1} + \alpha_{-1} = 0$ .

Define-se efeito global de um factor como sendo a diferença entre a média das respostas com o factor no nível mais elevado (+1) e no nível mais baixo (-1):

$$\text{Efeito global de } X_1 = \frac{1}{2}(y_2 + y_4) - \frac{1}{2}(y_1 + y_3) = y^+ - y^- \quad (3.24)$$

O efeito global pode ser escrito noutras formas. Assim, a expressão (3.24) pode também escrever-se:

$$\text{Efeito global de } X_1 = \frac{1}{2}(y_4 - y_3) + \frac{1}{2}(y_2 - y_1) = \frac{1}{2}(ef^+ + ef^-) \quad (3.25)$$

O efeito global de  $X_1$  aparece, assim, como a semi-soma do efeito do factor  $X_1$  no nível alto do factor  $X_2$  (efeito designado por  $ef^+$ ) e do efeito do factor  $X_1$  no nível baixo do factor  $X_2$  (efeito designado por  $ef^-$ ).

Uma terceira forma de apresentação do efeito global pode igualmente obter-se da expressão (3.24) introduzindo a definição de média:

$$\text{Efeito global de } X_1 = \left[ \frac{1}{2}(y_2 + y_4) - \mu \right] - \left[ \frac{1}{2}(y_1 + y_3) - \mu \right] = \alpha_{+1} - \alpha_{-1} \quad (3.26)$$

O efeito global do factor é assim igualmente a diferença entre o efeito principal do factor no nível mais elevado e o efeito principal do factor no nível mais baixo.

Mais importante do que a diferença total entre estes dois efeitos, é a diferença entre as médias. Define-se, assim, efeito médio  $\alpha$  de um factor por:

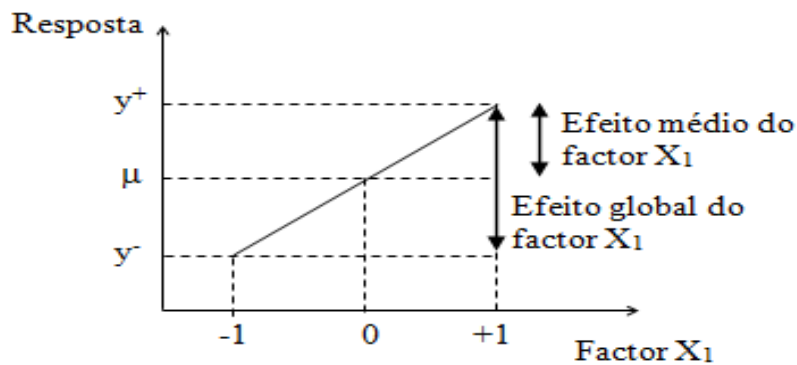
$$\alpha = (\alpha_{+1} - \alpha_{-1}) / 2 \quad (3.27)$$

Como  $\alpha_{+1} + \alpha_{-1} = 0$ , pode escrever-se o efeito médio de um factor como:

$$\alpha = \frac{\alpha_{+1} + \alpha_{+1} - \alpha_{-1} + \alpha_{-1}}{2} = \alpha_{+1} \quad (3.28)$$

ou seja, o efeito médio é o que atrás se definiu como efeito principal.

A representação gráfica das definições apresentadas mostra-se na Figura 3.9.



**Figura 3.9 – Efeito global e efeito médio de um factor**

Quanto maior for o efeito de um factor maior é a inclinação (declive) do segmento. Este é, pois, um meio de verificação visual rápida do impacto dos diferentes factores, pela representação de todos eles num mesmo gráfico. Na figura 3.10, o factor  $X_2$  é mais influente que o factor  $X_1$ .

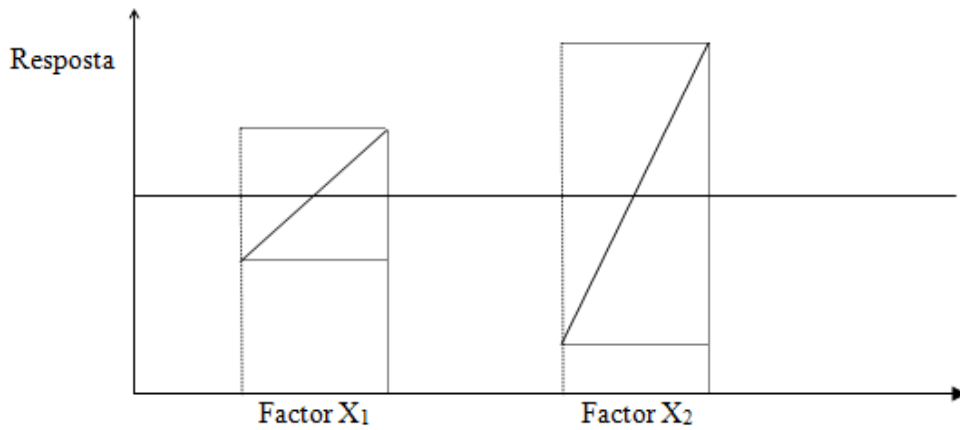


Figura 3.10 - Importância relativa dos efeitos

### 3.3.3 - Efeito de interacção

A noção de interacção é das mais delicadas em estatística. Ela é, por vezes, confundida com a noção de dependência. O facto de haver interacção entre dois factores,  $X_1$  e  $X_2$ , não pressupõe que exista dependência entre esses factores. Ou melhor: os factores estudados num desenho de experiências são obrigatoriamente independentes. Isto quer dizer que uma variação no nível de um factor não tem influência no nível de outro factor. A variação (eventual) é sobre a resposta e não sobre o nível de um factor. Contra-exemplo: num espaço de volume constante, sabe-se que qualquer modificação de temperatura implica uma modificação da pressão. Os factores pressão e temperatura não são, pois, independentes.

A noção de interacção é diferente. Trata-se de um efeito sobre a resposta que é partilhado por dois factores (no caso de se considerarem apenas dois factores). Ela traduz-se por um reforço (num ou noutro sentido) do efeito de um factor devido à presença de outro (no caso de dois factores). Pode-se evidenciar este conceito na forma gráfica, como se mostra na Figura 3.11, onde estão representados dois exemplos de respostas para o desenho  $2^2$  do Quadro 3.3.

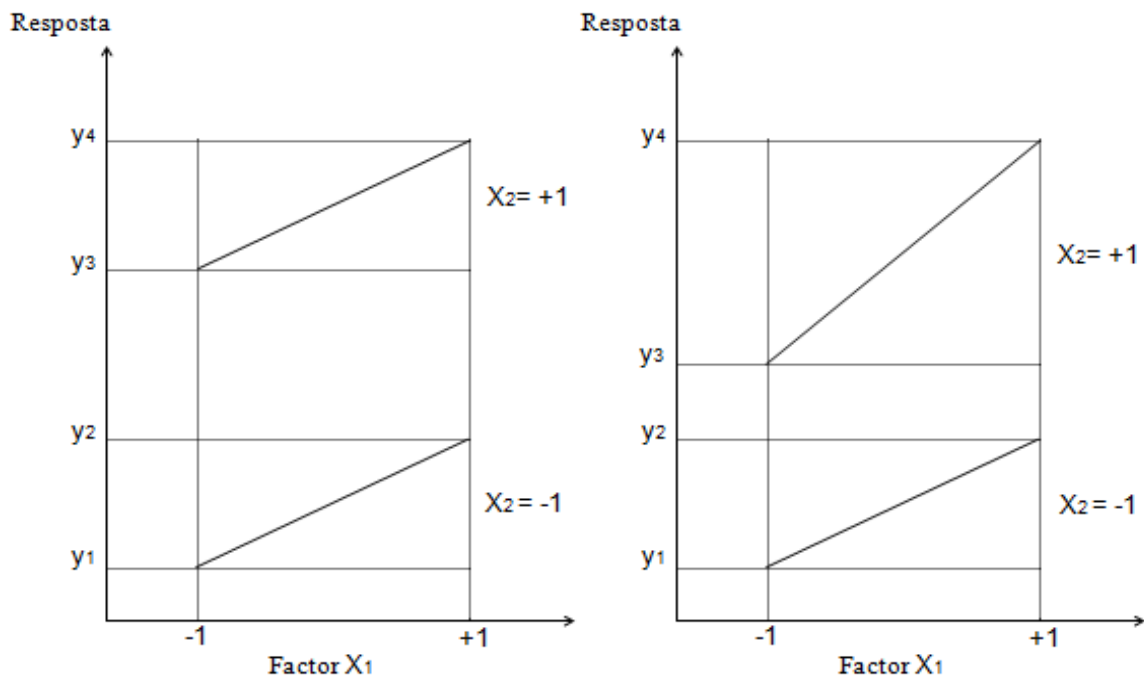


Figura 3.11 - Interação de factores.

Na representação da esquerda da Figura 3.11, o efeito do factor  $X_1$  não se modifica com a variação do nível de  $X_2$  ( $y_2 - y_1 = y_4 - y_3$ ), o que é sinal de inexistência de interacção dos factores. Ao contrário, na representação da direita, o efeito de  $X_1$  é diferente consoante  $X_2$  esteja no nível alto ou nível baixo ( $y_2 - y_1 \neq y_4 - y_3$ ). Neste caso existe interacção dos factores.

O efeito de interacção é traduzido pelo coeficiente  $a_{12}$  da equação (3.13) e definido pela relação (3.15d). Ora, esta relação pode ser escrita como se segue:

$$a_{12} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2}(y_4 - y_3) - \frac{1}{2}(y_2 - y_1) \right] = \frac{1}{2} [ef^+ - ef^-] \quad (3.29)$$

A interacção aparece, assim, como a semi-diferença entre o efeito do factor  $X_1$  no nível alto do factor  $X_2$  (efeito designado por  $ef^+$ ) e o efeito do factor  $X_1$  no nível baixo do factor  $X_2$  (efeito designado por  $ef^-$ ). Ela traduz uma variação do efeito de um factor em função do nível de um outro factor. A interacção  $a_{12}$  entre dois factores é uma interacção de segunda ordem (ordem 2). Em desenhos com mais de dois factores, aparecem interacções de ordem superior a 2, sendo o seu cálculo obtido por extrapolação da definição (3.29). Assim, uma interacção de terceira ordem,  $X_1X_2X_3$ , seria a semi-diferença entre o efeito da interacção  $X_1X_2$  no nível alto de  $X_3$  e o efeito da interacção  $X_1X_2$  no nível baixo de  $X_3$ .

### 3.4 - Plano fraccionado a dois níveis

Na prática, os desenhos factoriais completos só são utilizáveis em sistemas com poucos factores. De facto, tomando por exemplo um sistema com 7 factores com 3 níveis cada, o número de experiências necessário para efectuar o estudo completo, envolvendo todas as combinações possíveis de factores, seria  $3^7 = 2187$ , o que exige um nível de recursos que pode ser incomportável. Para resolver estas situações, têm sido propostos desenhos reduzidos ou fraccionados, que consistem em seleccionar apenas certas combinações, do conjunto completo, e efectuar o estudo com base nessas combinações. Os planos fraccionados permitem, assim, estudar todos os factores mas com um número de experiências reduzido em relação ao desenho factorial completo. Estes planos reduzem os custos, em termos de tempo e recursos, mas diminuem igualmente a informação obtida sobre o comportamento do sistema. Torna-se deste modo indispensável garantir a pertinência da selecção das combinações de factores para o problema em estudo.

Num desenho factorial fraccionado fica-se com um sistema de  $n$  equações (correspondente ao número de experiências) com  $p$  coeficientes como incógnitas (correspondentes aos efeitos principais e interacções dos factores), sendo  $p$  maior do que  $n$ . Havendo mais incógnitas do que equações, e no pressuposto de não aumentar o número de equações por indisponibilidade de recursos, é necessário diminuir o número de incógnitas. Tal consegue-se utilizando o artifício de agrupar coeficientes de modo a ficar com um sistema de  $n$  equações a  $n$  incógnitas. O sistema é assim resolvido para um conjunto de  $n$  equações a  $n$  grupos de coeficientes. Os agrupamentos de coeficientes designam-se por contrastes ou aliases (associações). O agrupamento de coeficientes permite ultrapassar a indeterminação do sistema de equações mas, em contrapartida, cria dificuldades quanto à interpretação dos resultados no que toca à sua relação com os coeficientes.

Considerando apenas 2 níveis para os factores, um desenho factorial fraccionado  $2^{k-p}$  permite analisar “k” factores só com  $2^{k-p}$  experiências, em que  $p$  define a fracção do desenho. Por exemplo, um plano  $2^{k-1} = 2^k / 2$  só requer metade das experiências, e um plano  $2^{k-2} = 2^k / 4$  só requer 1/4 das experiências. No caso geral, um desenho fraccionado  $2^{k-p}$  requer  $(1/2)^p$  experiências.

Considere-se, como exemplo, o plano fraccionado  $2^{3-1}$  para estudar os efeitos de 3 factores considerando apenas 4 experiências. Se os 3 factores fossem estudados com o plano completo, o modelo matemático da resposta seria, de acordo com a equação geral (3.8) e um esquema linear de interacção:

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_1X_3 + a_{123}X_1X_2X_3 \quad (3.30)$$

Mas se apenas são realizadas 4 experiências, em lugar das 8 do plano completo, então ter-se-á um sistema de 4 equações a 8 incógnitas, que são os coeficientes da equação (3.30). Como apenas é possível determinar 4 incógnitas, pode-se adoptar o modelo reduzido:

$$y = l_0 + l_1X_1 + l_2X_2 + l_3X_3 \quad (3.31)$$

com as seguintes associações (contrastes):

$$l_0 = a_0 + a_{123}$$

$$l_1 = a_1 + a_{23}$$

$$l_2 = a_2 + a_{13}$$

$$l_3 = a_3 + a_{12}$$

em que o termo de ordem 0 é confundido com o termo de terceira ordem, ou seja, são indiferenciáveis, e os termos de primeira ordem são confundidos com os termos de segunda ordem. Como se observa, esta redução do modelo permite determinar os contrastes  $l_i$ . No entanto, aparece o problema da interpretação destes contrastes, que impossibilita a determinação dos coeficientes do modelo original. As relações apresentadas mostram que um contraste só é igual a um efeito principal se as interacções com as quais está associado forem desprezáveis. É este o pressuposto que se toma quando se utilizam planos fraccionados, o que implica muita precaução na escolha destes planos. Normalmente, as interacções de terceira ordem ou superior são desprezáveis, o que permite eliminar muitas incógnitas e assim avançar com relativa segurança para planos fraccionados, em lugar dos planos completos, que a este nível são em geral in comportáveis.

O exemplo apresentado mostra que um plano factorial fraccionado  $2^{k-p}$  pode ser gerado pelo plano factorial completo com  $k-p$  factores escolhendo uma estrutura de aliases. A estrutura de aliases determina que efeitos são confundidos entre si (ou seja, que são indistinguíveis entre si). Esta estrutura de aliases pode ser obtida através do conceito de *gerador*. Considere-se uma situação com 4 factores, cada um com 2 níveis de interesse, mas em que apenas só é possível realizar 8 experiências, o que corresponde a metade de todas as combinações possíveis de um plano factorial completo  $2^4=16$ . Nestas condições, está-se perante um desenho fraccionado  $2^{4-1} = (1/2) \times 2^4$ . Na matriz de cálculo do plano completo  $2^3$ , com 8 experiências - Quadro 3.4 - pretende-se, assim, adicionar um quarto factor. Para isso, pode sacrificar-se a interacção

$X_1X_2X_3$ , substituindo-a pelo factor  $X_4$  vindo, simbolicamente,  $X_4 = X_1X_2X_3$ . Tal corresponde a confundir o efeito do factor  $X_4$  com a interacção  $X_1X_2X_3$ . Na realidade, o efeito de  $X_4$  representa a soma dos efeitos de  $X_4$  e  $X_1X_2X_3$ , mas como uma interacção de terceira ordem é normalmente desprezável, o erro cometido em admitir que o efeito é apenas o de  $X_4$  é pequeno. A  $X_4 = X_1X_2X_3$  chama-se o gerador do desenho. Neste caso existe apenas um gerador. No caso geral, o número de geradores é igual ao indicador  $p$  da fracção do desenho (no caso presente,  $p=1$ ). A partir do gerador obtém-se a relação definidora do desenho,  $I = X_1X_2X_3X_4$ , por multiplicação simbólica de ambos os lados do gerador por  $X_4$  ( $X_4 \bullet X_4 = X_1X_2X_3X_4$ ) e tendo em conta que  $X_4^2 = I$  (o produto de qualquer coluna por ela própria é a identidade). A relação definidora vai permitir definir os restantes aliases do desenho. Multiplicando cada coluna do desenho pela relação definidora obtêm-se os aliases para os efeitos respectivos. Assim, para as colunas do Quadro 3.4:

$$X_1 \bullet I = X_1 \bullet X_1X_2X_3X_4 = X_1^2X_2X_3X_4 = X_2X_3X_4$$

$$X_2 \bullet I = X_2 \bullet X_1X_2X_3X_4 = X_1X_2^2X_3X_4 = X_1X_3X_4$$

$$X_3 \bullet I = X_3 \bullet X_1X_2X_3X_4 = X_1X_2X_3^2X_4 = X_1X_2X_4$$

$$X_1X_2 \bullet I = X_1X_2 \bullet X_1X_2X_3X_4 = X_1^2X_2^2X_3X_4 = X_3X_4$$

$$X_1X_3 \bullet I = X_1X_3 \bullet X_1X_2X_3X_4 = X_1^2X_2X_3^2X_4 = X_2X_4$$

$$X_2X_3 \bullet I = X_2X_3 \bullet X_1X_2X_3X_4 = X_1X_2^2X_3^2X_4 = X_1X_4$$

Por simplicidade, estas operações aparecem em muitos textos indicadas apenas pelos índices que caracterizam a ordem dos factores ou interacções. Por exemplo, de acordo com esta regra, a operação  $X_2X_3 \bullet I$  aparece simplesmente descrita por  $23 \bullet I = 23 \bullet 1234 = 12^23^24 = 14$ .

O Quadro 3.6 mostra a matriz de cálculo do desenho completo  $2^3$  (Quadro 3.4) com os aliases que se formam quando utilizada para o plano fraccionado  $2^{4-1}$ .

**Quadro 3.6 - Plano fraccionado  $2^{4-1}$  (4 factores e 8 experiências)**

I	$X_1 = X_2X_3X_4$	$X_2 = X_1X_3X_4$	$X_1X_2 = X_3X_4$	$X_3 = X_1X_2X_4$	$X_1X_3 = X_2X_4$	$X_2X_3 = X_1X_4$	$X_1X_2X_3 = X_4$	y
+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	$y_1$
+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$y_2$
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$y_3$
+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	$y_4$
+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$y_5$
+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	$y_6$
+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	$y_7$
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$y_8$



A estrutura de aliases mostra que os efeitos principais de  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  são na verdade a soma dos efeitos principais e das três interações de factores, ou seja,  $X_1+X_2X_3X_4$ ,  $X_2+X_1X_3X_4$  e  $X_3+X_1X_2X_4$ , respectivamente. Em consequência, não é possível diferenciar os efeitos principais dos três termos de interação. Este desenho constitui um plano de resolução IV. O conceito de resolução de um plano é uma maneira útil de catalogar planos factoriais fraccionados de acordo com o padrão de aliases que produzem. A resolução de um plano é normalmente representada por um algarismo romano em subscripto. Por exemplo,  $2_{IV}^{4-1}$  representa o plano factorial de resolução IV, com metade dos ensaios do plano factorial completo  $2^4$ . De entre estes planos, são particularmente importantes os planos de resolução III, IV e V, que se descrevem abaixo, juntamente com as tabelas de alguns desenhos com padrões de aliases óptimos.

### 3.4.1 - Plano de Resolução III

Neste plano nenhum efeito principal é *alias* de qualquer outro efeito principal, mas os efeitos principais são aliases das interações de dois factores, e as interações de dois factores podem ser aliases uma das outras. O plano  $2^{3-1}$  com  $I = X_1X_2X_3$  é de resolução III. Usualmente, designa-se por  $2_{III}^{3-1}$ . Nos quadros seguintes – Quadros 3.7 - 3.10 – apresentam-se exemplos de planos de resolução III.

Quadro 3.7 - Plano  $2_{III}^{3-1}$  (3 factores e 4 experiências)

Factor	Definição	Estrutura de contrastes
1	1	1+23
2	2	2+13
3	12	3+12
12		12+3
13		13+2
23		23+1

Quadro 3.8 - Matriz de desenho de 3 factores e 4 experiências

Experiência	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

**Quadro 3.9 - Plano  $2_{III}^{5-2}$  ( 5 factores e 8 experiências)**

Factor	Definição	Estrutura de contrastes
1	1	1 + 24 + 35 + 12345
2	2	2 + 14 + 345 + 1235
3	3	3 + 15 + 245 + 1234
4	12	4 + 12 + 235 + 1345
5	13	5 + 13 + 234 + 1245
12		12 + 4 + 1345 + 2345
13		13 + 5 + 1245 + 2345
14		14 + 2 + 345 + 1235
15		15 + 3 + 245 + 1234
23		23 + 45 + 125 + 134
24		24 + 1 + 35 + 12345
25		25 + 34 + 123 + 145
34		34 + 25 + 123 + 145
35		35 + 1 + 24 + 12345
45		45 + 23 + 125 + 134

**Quadro 3.10 - Matriz de desenho de 5 factores e 8 experiências**

Experiência	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
1	-1	-1	-1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1

### 3.4.2 - Plano de resolução IV

Neste plano nenhum efeito principal é *alias* de qualquer outro efeito principal e nem de interações de dois factores, mas as interações de dois factores são aliasas umas das outras. O

plano  $2^{4-1}$ , com  $I = X_1X_2X_3X_4$  é de resolução IV. Usualmente, designa-se por  $2_{IV}^{4-1}$ . Nos quadros seguintes – Quadros 3.11 - 3.14 – apresentam-se exemplos de planos de resolução IV.

**Quadro 3.11 - Plano  $2_{IV}^{4-1}$  (4 factores e 8 experiências)**

Factor	Definição	Estrutura de contraste
1	1	1+234
2	2	2+134
3	3	3+124
4	123	4+123
12		12+34
13		13+24
14		14+23
23		23+14
24		24+13
34		34+12

**Quadro 3.12 - Matriz de desenho de 4 factores e 8 experiências**

Experiência	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1

**Quadro 3.13 - Plano  $2_{IV}^{6-2}$  (6 factores e 16 experiências)**

Factor	Definição	Estrutura de contraste
1	1	1+235+456+12346
2	2	2+135+346+12456
3	3	3+125+246+13456
4	4	4+156+236+12345
5	123	5+123+146+23456
6	234	6+145+234+12356

12		12+35+1346+2456
13		13+25+1246+3456
14		14+56+1236+2345
15		15+23+46+123456
16		16+45+1234+2356
23		23+15+46+123456
24		24+36+1256+1345
25		25+13+1246+3456
26		26+34+1245+1356
34		34+26+1245+1356
35		35+12+1346+2456
36		36+24+1256+1345
45		45+16+1234+2356
46		46+15+23+123456
56		56+14+1236+2345

**Quadro 3.14 - Matriz de desenho de 6 factores e 16 experiências**

Experiência	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	+1	-1
3	-1	+1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	-1	+1
5	-1	-1	+1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1	+1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1

### 3.4.3 - Plano de resolução V

Neste plano nenhum efeito principal ou interacção de dois factores é *alias* de qualquer outro efeito principal ou interacção de dois factores, mas as interacções de dois factores são aliases das interacções de três factores. Nos quadros seguintes – Quadros 3.15 - 3.16 – apresenta-se um exemplo de um plano de resolução V.

**Quadro 3.15 - Plano  $2_{V}^{5-1}$  (5 factores e 16 experiências)**

Factor	Definição	Estrutura de contrastes
1	1	1+2345
2	2	2+1345
3	3	3 + 1245
4	4	4 + 1235
5	1234	5 + 1234
12		12 + 345
13		13 + 245
14		14 + 235
15		15 + 234
23		23 + 145
24		24 + 135
25		25 + 134
34		34 + 125
35		35 + 124
45		45 + 123

**Quadro 3.16 - Matriz de desenho de 5 factores e 16 experiências**

Experiência	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
1	-1	-1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	+1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	-1

9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1

## Capítulo 4 – Apresentação do caso de estudo e dos respectivos factores em avaliação

---

### 4.1 – Introdução

Como referido anteriormente, o objectivo central deste trabalho consiste numa análise de sensibilidade dos factores que condicionam o desempenho térmico de um edifício, por avaliação dos efeitos que a sua variação produz em dados indicadores característicos desse desempenho. Os indicadores de desempenho utilizados, que constituirão a resposta do edifício às diversas combinações de factores, são, na estação fria, as necessidades de energia útil de aquecimento - para assegurar a temperatura convencional de conforto de 20 °C - e, na estação quente, os graus-hora de desconforto por sobreaquecimento (cuja definição é apresentada mais adiante), calculados com base na temperatura de 25°C, que se considera como representativa do conforto térmico nesta estação. Para o cálculo destes indicadores recorre-se a uma ferramenta informática de análise dinâmica dos fenómenos de transmissão do calor específicos de edifícios.

Para a realização desta análise de sensibilidade, ir-se-á utilizar o método factorial, explicado em pormenor no capítulo anterior, através do qual serão analisados os efeitos que os factores escolhidos para a realização do estudo produzem nos indicadores referidos.

Através desta análise pretende-se deduzir uma equação matemática que permita, de forma simplificada e rápida, obter uma resposta aproximada daquela que se obtém através da utilização do programa informático, o qual, por tratar os fenómenos em toda a sua complexidade, se considera produzir a resposta exacta do modelo para qualquer combinação de factores.

Neste capítulo será apresentado o edifício e a fracção onde incidirá este estudo, bem como os factores que serão feitos variar para o cálculo dos indicadores de desempenho. Para o efeito foram seleccionados os seguintes factores, que se desenvolverão mais adiante com mais pormenor:

- Coeficiente de transmissão térmica da parte opaca das fachadas;
- Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados;
- Relação entre área envidraçada e área da fachada a Sul;
- Taxa de renovação do ar;
- Inércia térmica;
- Factor solar dos vãos orientados a Sul.

Para a realização das diversas simulações efectuadas neste trabalho, utiliza-se o programa de simulação dinâmica *EnergyPlus* [17], programa desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (*DOE*), que também se descreve no presente capítulo. O uso deste programa informático de simulação, ao tratar em regime dinâmico e em grande detalhe os processos de transmissão do calor, permite obter com grau de precisão elevado as respostas do edifício às acções térmicas exteriores, representadas nomeadamente pela temperatura exterior e radiação solar. Desta forma, a utilização deste programa substitui a experimentação que, no caso geral de um plano de experiências factorial, deveria ser levada a cabo. A principal diferença

destas duas formas de abordagem - computacional e experimental - reside na ausência de aleatoriedade dos resultados quando obtidos por simulação computacional e, conseqüentemente, na impossibilidade de realizar o tratamento estatístico que normalmente acompanha a produção de resultados experimentais. Pelo facto da abordagem computacional utilizada neste estudo ser determinística (a repetição de uma simulação com os mesmos parâmetros de entrada produz sempre o mesmo resultado), os erros experimentais estão ausentes do modelo matemático que será deduzido do plano factorial concebido.

Com o intuito de permitir uma melhor compreensão do trabalho que se expõe nos pontos seguintes, começar-se-á por descrever o edifício que se pretende analisar para que se possa retirar uma ideia concreta dos parâmetros alvo de estudo. De seguida, procede-se à identificação dos factores que se irão estudar, caracterizando-os nos níveis “alto” e “baixo”, de maneira a facilitar o entendimento de toda a análise. É importante salientar que, ao longo dos restantes capítulos desta dissertação, tanto os factores como o edifício que se introduzem de seguida, serão objectos centrais do trabalho, razão pela qual se descrevem com maior cuidado nos pontos seguintes.

## 4.2 – Descrição do edifício e respectivos factores

### 4.2.1 – Edifício

O caso de estudo refere-se a uma fracção de um edifício de habitação, de tipologia T2, com dupla exposição (N-S), constituída por dois quartos, uma sala, uma casa de banho e uma cozinha. Admite-se que a fracção se localiza num piso intermédio e que lateralmente - direcção Este-Oeste - faz também fronteira com locais de temperatura similar, pelo que apenas se consideram as trocas de calor pelas fachadas. O fogo tem 120 m<sup>2</sup> (12×10m) de área total, e um pé-direito de 2,65 m, o que perfaz um volume total de 318 m<sup>3</sup>. Na Figura 4.1 é possível identificar a compartimentação do fogo, assim como os diferentes tipos de paredes.

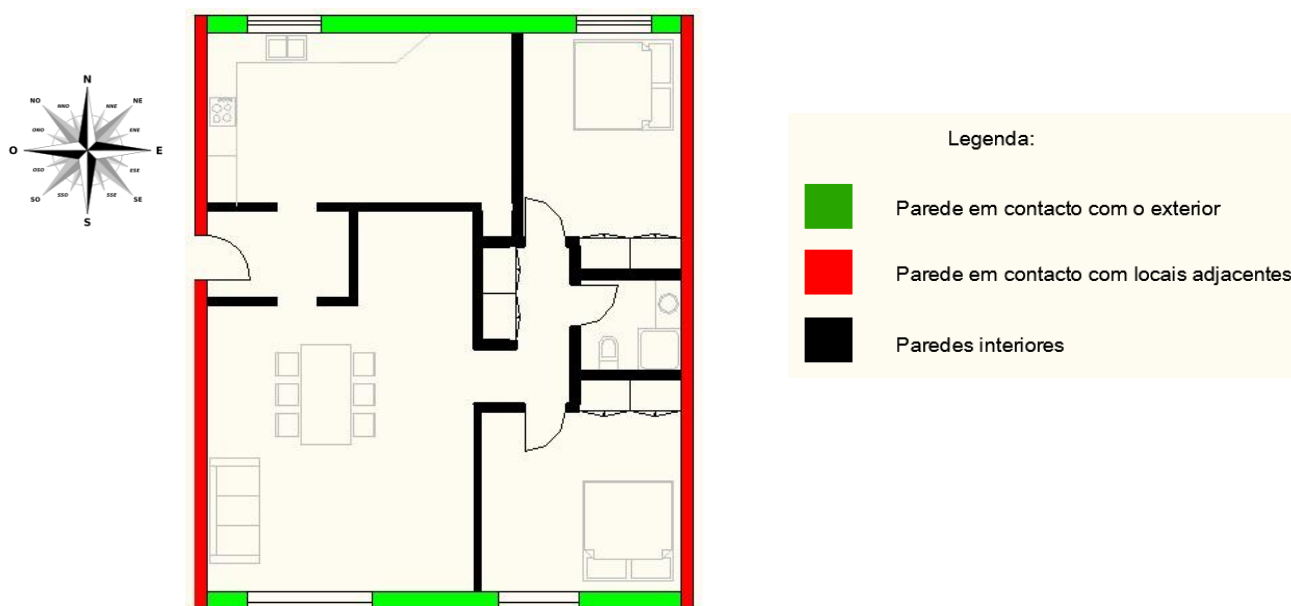


Figura 4.1- Fracção habitacional utilizada como modelo de estudo



Estruturalmente, o fogo descrito faz parte de um edifício de betão armado, com uma malha convencional de pilares e vigas, sobre as quais assentam as lajes. Relativamente à localização geográfica, considerar-se-ão duas localizações: Bragança para a análise relativa à estação de aquecimento e Lisboa para o estudo referente à estação de arrefecimento.

Não se descrevem neste ponto todos os elementos construtivos utilizados na envolvente do fogo, uma vez que uma parte deles corresponde a factores de estudo, e para esses casos a sua completa definição será feita com a descrição dos respectivos factores. É, no entanto, importante referir, para a correcta definição do modelo em estudo, todos os restantes elementos que se mantêm inalterados ao longo de todo o trabalho, nomeadamente o tipo de pavimento a adoptar, as paredes em contacto com locais adjacentes e as paredes divisórias interiores.

No que se refere ao pavimento, este será constituído por uma laje com 20 cm, reboco interior de 1 cm, argamassa de regularização do piso com 3 cm e um revestimento em ladrilho de grés cerâmico com 1 cm, perfazendo 25 cm de espessura total. O seu coeficiente de transmissão térmica é de 2.95 W/m<sup>2</sup>.°C. No Quadro 4.1 é possível identificar os elementos constituintes do pavimento e respectivos parâmetros térmicos.

**Quadro 4.1 - Constituição e características térmicas do pavimento**

Pavimento sem necessidade de isolamento			
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R (m <sup>2</sup> .°C/W)
Ar interior	-	-	0.10
Reboco	0.01	1.3	0.008
Laje	0.20	2.0	0.100
Betonilha de regularização	0.03	1.3	0.023
Ladrilho de grés cerâmico	0.01	1.3	0.008
Ar interior	-	-	0.10
Espessura Total	0.25		
Coeficiente de transmissão térmica - U (W/m <sup>2</sup> .°C)			2.95

A determinação do coeficiente de transmissão térmica não é, no caso do pavimento, fundamental, dado serem negligenciáveis as trocas de calor por condução que induz, em razão da proximidade das temperaturas dos ambientes que separa.

As paredes em contacto com locais adjacentes consideram-se constituídas por um pano de tijolo de 22 cm (R=0.52 m<sup>2</sup>.°C/W), e acabamento interno e externo em reboco estucado com 1 cm de espessura, perfazendo 24 cm de espessura total. O seu coeficiente de transmissão térmica é 1.26 W/m<sup>2</sup>.°C. Pela mesma razão apontada acima, a determinação do coeficiente de transmissão térmica não é fundamental para este tipo de paredes.

No que se refere às paredes divisórias interiores, estas são compostas por um tijolo de 15 cm (R=0.39 m<sup>2</sup>.°C/W), com revestimento em ambos os lados em reboco com 1 cm de espessura, perfazendo no total 17 cm de espessura. O seu coeficiente de transmissão térmica é 1.50 W/m<sup>2</sup>.°C, mas não terá utilização neste estudo dado que as simulações realizadas apenas considerarão este tipo de paredes com importância para a massa térmica.

Na Figura 4.2 é possível verificar as disposições construtivas respeitantes aos dois tipos de parede descritos.

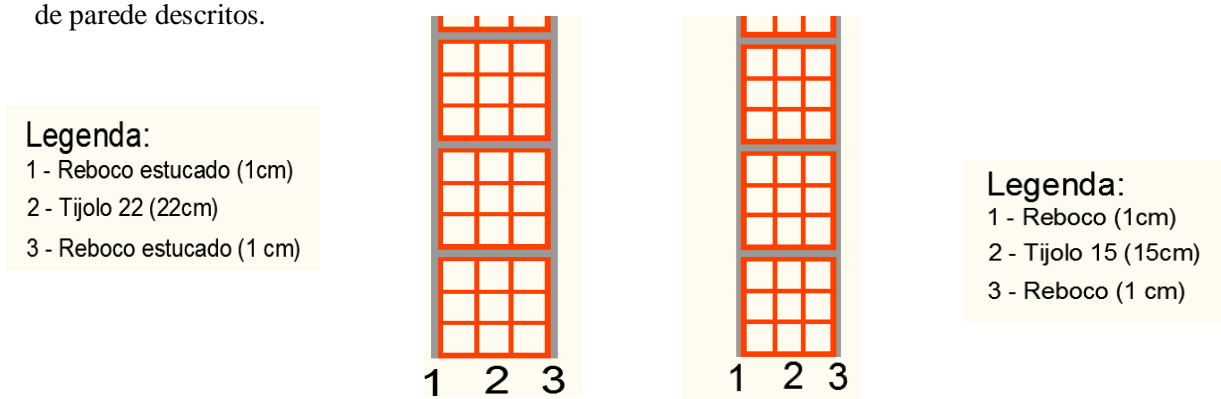


Figura 4.2 - Paredes em contacto com locais adjacentes e divisórias interiores

Importa igualmente definir as dimensões e localização dos vãos envidraçados na fachada Norte, uma vez que serão uma constante ao longo de todo o estudo. A janela de menores dimensões encontra-se num dos quartos e tem uma área de  $1.2 \times 1.2 \text{m}^2$  enquanto a de maiores dimensões localiza-se na cozinha e ocupa uma área de  $1.5 \times 1.2 \text{m}^2$ .

Outra imposição arquitectónica com grande impacto no desempenho térmico do edifício e que, por isso, se torna importante aqui referir, prende-se com o sistema de protecção solar dos envidraçados que se pretende adoptar. No caso do edifício em estudo optou-se pela solução mais corrente no nosso país, ou seja, pela instalação de estores exteriores.

#### 4.2.2 - Factores

Como foi referido na introdução deste capítulo, existem diversos factores que têm impacto no desempenho térmico de um edifício. Visto ser impraticável controlar todos os factores com impacto nesse desempenho, importa escolher aqueles que se pensa terem um maior contributo. Na introdução deste capítulo foram já listados os factores que serão utilizados neste estudo. Em cada uma das análises realizadas, correspondentes à estação de aquecimento e arrefecimento, serão utilizados 5 factores. Destes 5 factores 4 serão comuns às duas análises, a saber: coeficiente de transmissão térmica das partes opacas, relação entre área de envidraçados e área de fachada a Sul, inércia térmica e número de renovações do ar horárias. O quinto factor será, para a análise referente à estação de aquecimento, o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados e, para a análise respeitante à estação de arrefecimento, o factor solar dos envidraçados a Sul.

Aos factores escolhidos atribui-se um nível “alto” e um nível “baixo”. Um dos níveis produzirá um desempenho térmico superior, o que não significa forçosamente corresponder ao nível “alto”, e o outro nível um desempenho térmico inferior. A distribuição dos níveis por cada factor em cada simulação obedecerá ao plano factorial seleccionado, que também será diferenciado para as análises relativas à estação de aquecimento e de arrefecimento. Para a estação de aquecimento considerar-se-á um plano completo de dois níveis e 5 factores, ou seja, o plano  $2^5$ , o que implicará um número total de 32 simulações, enquanto para a estação de arrefecimento será utilizado o plano fraccionado  $2^{5-1}_V$ , implicando um total de 16 simulações, tendo esta opção de escolher planos diferentes o objectivo apenas de exemplificar a aplicação de

cada um deles. O tratamento dos resultados, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior, permitirá evidenciar os factores com maior relevo no desempenho térmico da fracção em estudo e, assim, constituir uma informação importante para o projecto.

#### 4.2.2.1 – Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas das paredes exteriores

O coeficiente de transmissão térmica das partes opacas das paredes exteriores será designado por factor  $x_1$  e aplica-se a ambas as paredes orientadas a Norte e a Sul. O coeficiente de transmissão térmica de um elemento corresponde à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes interior e exterior.

Visto as paredes opacas constituírem uma parte significativa da envolvente térmica do fogo, e devido ao seu contacto com ambientes a diferentes temperaturas, estas acarretam elevadas trocas térmicas que influenciam o desempenho térmico do fogo. Daí ser importante existir um controlo mais cuidado quanto às características térmicas destes elementos. Quanto maior o coeficiente de transmissão térmica, menor será a qualidade térmica do elemento e este princípio aplica-se quer à estação fria, onde se pretende reduzir as perdas de calor, quer à estação quente, onde o objectivo é minimizar os ganhos de calor.

A parede orientada a Sul recebe uma maior quantidade de radiação solar, o que, do ponto de vista das perdas de calor, resulta num comportamento de Inverno mais favorável que o da parede Norte, mas no Verão a parede de comportamento mais favorável inverte-se em relação ao Inverno. Embora esta troca de posições em termos de impacto térmico justificasse a possibilidade de considerar constituições diferentes para as paredes Norte e Sul, admitiu-se a mesma constituição para ambas, ou seja, o factor que representa a variação do coeficiente de transmissão térmica será comum às duas paredes, o que é uma hipótese que simplifica o modelo de estudo em termos do número de parâmetros em jogo.

Para representar o nível de maior desempenho adopta-se para as paredes exteriores uma constituição em alvenaria de tijolo furado composta por um tijolo de 22 cm, uma camada de isolamento térmico de 5 cm, e um revestimento interno e externo em reboco de 1 e 2 cm respectivamente, perfazendo 30 cm de espessura total. O coeficiente de transmissão térmica correspondente a esta disposição é  $0.48 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ , como se pode verificar pelo cálculo apresentado no Quadro 4.2.

**Quadro 4.2 - Constituição e características térmicas da parede exterior de maior desempenho**

Parede exterior de maior desempenho			
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R (m <sup>2</sup> .°C/W)
Ar interior	-	-	0.13
Reboco	0.01	1.3	0.008
Tijolo 22	0.22	-	0.520
Isolante	0.05	0.037	1.351
Reboco	0.02	1.3	0.015
Ar exterior	-	-	0.04
Espessura total	0.30		
Coeficiente de transmissão térmica - U (W/m <sup>2</sup> .°C)			0.48

Na Figura 4.3 é possível verificar os constituintes da parede exterior de maior desempenho.

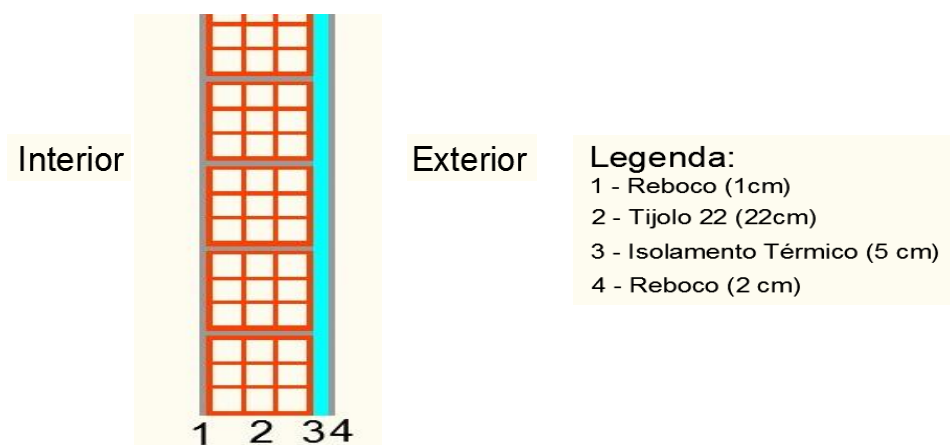


Figura 4.3 - Parede exterior de maior desempenho

No que se refere ao nível com menor desempenho térmico, a sua materialização recorre a um tijolo de 22 cm, isolamento térmico de 1 cm, e revestimento interno e externo em reboco de 1 e 2 cm respectivamente, totalizando 26 cm de espessura. O seu coeficiente de transmissão térmica é  $1.02 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , cujo cálculo se mostra no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Constituição e características térmicas da parede exterior de menor desempenho

Parede exterior de menor desempenho			
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m. $^\circ\text{C}$ )	R (m $^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )
Ar interior	-	-	0.13
Reboco	0.01	1.3	0.008
Tijolo 22	0.22	-	0.520
Isolante	0.01	0.037	0.270
Reboco	0.02	1.3	0.015
Ar exterior	-	-	0.04
Espessura total	0.26		
Coeficiente de transmissão térmica - U (W/m $^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )			1.02

Na Figura 4.4 mostra-se a parede exterior de menor desempenho.

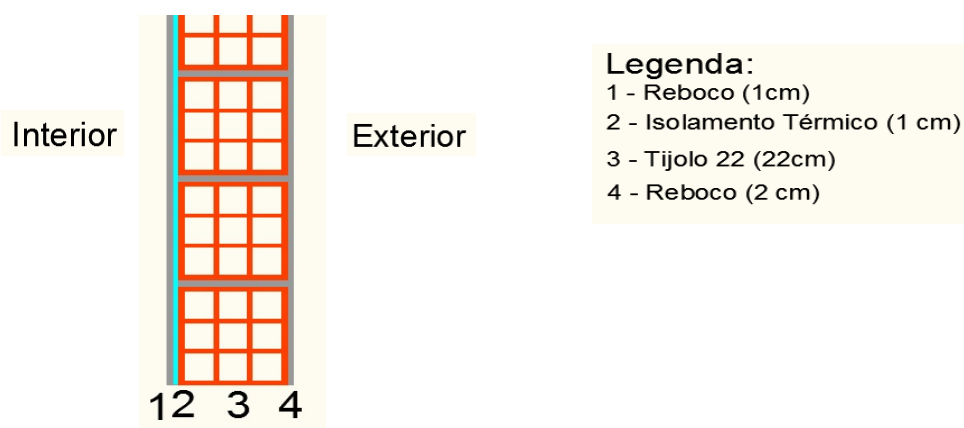


Figura 4.4 - Parede exterior de menor desempenho

#### 4.2.2.2 – Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados

Vão envidraçado é definido neste estudo como o conjunto da caixilharia e vidro. A escolha da composição dos vãos envidraçados implica tomar decisões ao nível de diversos critérios. Estes vão desde a zona climática, orientação solar, relação entre área envidraçada e área de fachada, meios de sombreamento a utilizar, factor solar do vão, até critérios relacionados com a constituição da janela, incluindo o tipo de vidro e o material do caixilho, cujos coeficientes de transmissão térmica são relevantes para o nível de trocas de calor através desses elementos.

O factor que se descreve neste ponto é o coeficiente de transmissão térmica do pano envidraçado (U), que se designará por  $x_2$ , e que se aplicará unicamente à situação de Inverno. No Verão, tendo em conta o tipo de acções térmicas, o coeficiente de transmissão térmica desempenha um papel menor no impacto térmico das edificações, pelo que não será considerado nesta estação. O material e tipo de caixilho, apesar de terem também influência no desempenho térmico do vão por via do coeficiente de transmissão térmica que lhes fica associado, por limitações relacionadas com a dimensão do trabalho não serão tomados como factores de variação, considerando-se ao longo de todo o estudo uma caixilharia de alumínio com corte térmico em todos os vãos envidraçados.

Para representar o nível de maior desempenho tomar-se-á uma janela tripla, constituída por três vidros de 3mm de espessura, todos separados por 13 mm de caixa-de-ar preenchida com argon. Por sua vez, para o nível de menor desempenho, a janela admite-se dupla, constituída por dois vidros de 3mm de espessura, separados por uma caixa-de-ar de 13mm. No Quadro 4.4 mostram-se as principais características das duas janelas descritas.

**Quadro 4.4 - Características das Janelas dupla e tripla**

Características das Janelas	U (W/m <sup>2</sup> °C)	Dimensões (mm)
Janela Tripla	1.64	3 (13) 3 (13) 3
Janela Dupla	2.79	3 (13) 3

Importa igualmente referir que ambos os níveis do coeficiente de transmissão térmica, correspondentes às situações de maior e menor desempenho térmico, traduzidos respectivamente pela utilização de janelas tripla e dupla, serão aplicados quer na fachada Norte quer na fachada Sul, o que implica alterações das características dos vãos em toda a envolvente.

#### 4.2.2.3 – Relação entre área envidraçada e área total na parede Sul

O dimensionamento das áreas envidraçadas, em função da área total das fachadas, é uma medida com reflexos importantes no comportamento térmico de um edifício. As áreas envidraçadas são a componente do edifício que permite uma maior interacção com o clima onde este se encontra. Se os vãos envidraçados são, por um lado, os elementos por via dos quais o edifício capta radiação solar, essencial para a redução da energia de aquecimento no Inverno, por outro, são os elementos da envolvente com menor resistência térmica, o que deste ponto de vista os torna pouco eficientes relativamente ao objectivo de poupança de energia numa construção que se pretende sustentável. Sendo quer a captação de radiação solar quer a transmissão do calor por condução função da área envidraçada, é importante avaliar a importância deste factor no desempenho térmico do fogo.

Neste estudo, a relação entre a área envidraçada e a área total da parede Sul, para a qual se admitirá uma variação entre 20 e 50%, constituirá o factor  $x_3$  na estação de aquecimento e o factor  $x_2$  na de arrefecimento.

Assim, tendo a fachada Sul uma área total de  $26,5 \text{ m}^2$  ( $10 \times 2,65\text{m}$ ), a relação de 20% entre a área envidraçada e a área total consegue-se adoptando uma área de janelas  $5,3 \text{ m}^2$ . A distribuição desta área far-se-á por 2 vãos, um de dimensões  $1,2 \times 1,2\text{m}$  e o outro de dimensões  $2,1 \times 1,85\text{m}$ , ficando com a representação mostrada na Figura 4.5.

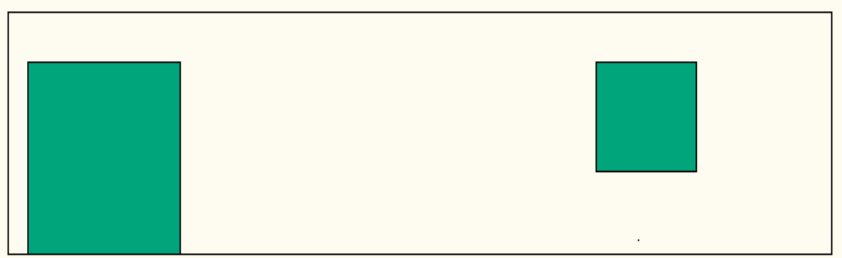


Figura 4.5 - Relação de 20% entre a área envidraçada e a área total da fachada Sul

Por sua vez, a relação de áreas de 50%, mantendo a mesma área de fachada, pode obter-se com uma área de envidraçados de  $13,25 \text{ m}^2$ . Esta área será igualmente repartida por 2 vãos, neste caso com as dimensões  $3,5 \times 2,1\text{m}$  e  $2,8 \times 2,1\text{m}$  respectivamente, como se mostra na Figura 4.6.

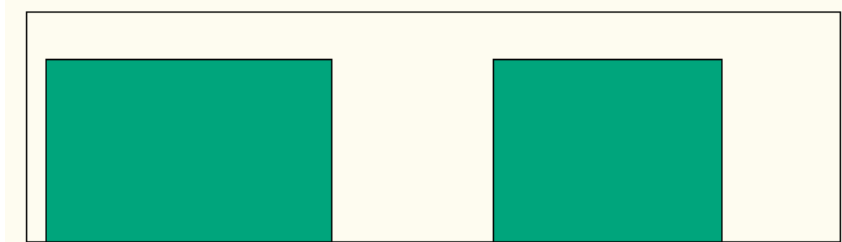


Figura 4.6 - Relação de 50% entre a área envidraçada e a área total da fachada Sul

#### 4.2.2.4 – Número de renovações horárias

O ar que envolve um edifício não se encontra estático, apresentando movimentações contínuas entre o interior e o exterior. Devido às diferenças de pressão entre o exterior e o interior, e ao facto das envolventes não serem estanques, existe entrada e saída de ar dos edifícios que são acompanhadas por trocas de calor entre os ambientes interior e exterior. A velocidade, direcção do vento, diferença de temperatura entre o interior e o exterior e as áreas de aberturas na envolvente que possibilitam o escoamento do ar são os factores que mais influenciam a ventilação de um edifício. De modo a assegurar as condições de higiene e salubridade do ar interior, os edifícios devem ser ventilados, seja de forma natural ou mecânica. No entanto, os caudais de ventilação devem ser reduzidos ao mínimo necessário, pois são fonte de trocas de calor entre o interior e o exterior.

Por número de renovações horárias de um compartimento entende-se o número de vezes que o volume de ar desse compartimento é extraído ou introduzido no intervalo de uma hora. No caso de um fogo, o caudal de renovação do ar obtém-se multiplicando o volume das várias divisões do edifício pelo número de renovações desejado.

Neste estudo considera-se o número de renovações horárias como o factor  $x_5$  para o Inverno e para o Verão, admitindo-se que poderá variar entre 0.6 e 1.0  $h^{-1}$ . Como descrito anteriormente, o fogo tem 120  $m^2$  de área (10×12m) e 2.65 m de pé-direito, o que implica um volume útil de 318  $m^3$ . Assim, em termos de caudais de ventilação, as renovações horárias de 0.6 e 1.0 correspondem a 0.053  $m^3/s$  e 0.088  $m^3/s$ , respectivamente, que são os valores a introduzir no programa de simulação para definir os níveis de maior e menor desempenho em termos térmicos.

#### **4.2.2.5 - Inércia térmica**

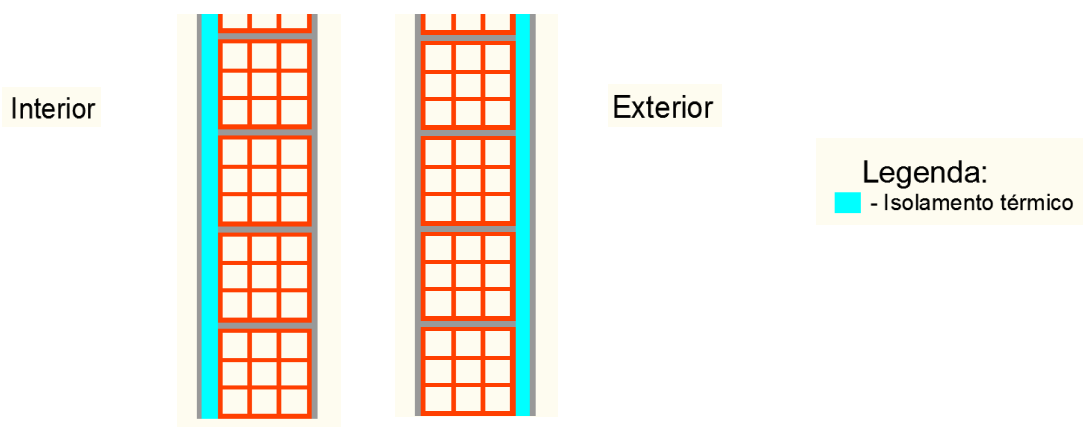
A inércia térmica de um edifício pode ser definida, simplificada, como a capacidade que o edifício revela em amortecer e desfazer a onda de calor que se lhe transmite do exterior. Esta capacidade depende da massa de cada um dos elementos construtivos, e também do calor específico e da condutibilidade térmica dos materiais constituintes. O calor específico influencia a capacidade de retenção do calor e a condutibilidade térmica determina a velocidade com que este se propaga no interior dos elementos de construção.

A inércia térmica exerce influência sobre o comportamento do edifício tanto de Verão, ao amortecer os picos de temperatura nas horas de maior calor, podendo assim proporcionar ambientes internos dos edifícios mais frescos, como de Inverno, ao permitir gerir de forma mais eficiente os ganhos solares e deste modo contribuir para a obtenção de maiores economias nos consumos de energia em aquecimento.

A capacidade da inércia térmica influenciar a temperatura do ar interior depende em grande parte da massa de construção que fica exposta ao ambiente interno, o que pode ser grandemente influenciado pelo posicionamento do isolamento térmico nos elementos da envolvente ou pelas características de resistência térmica dos revestimentos superficiais (interiores). Assim, uma disposição do isolamento térmico pela face interior dos elementos construtivos retira a estes a capacidade de armazenar ou libertar calor e, decorrentemente, a sua contribuição para a inércia térmica do espaço ou edifício. Ao contrário, uma disposição do isolamento pela face exterior permite potenciar ao máximo o efeito de inércia térmica desses elementos. No caso do isolamento ocupar uma posição intermédia no elemento, apenas a massa do elemento voltada para o ambiente interior apresenta contribuição para a inércia térmica. Considerações do mesmo tipo podem ser feitas para os revestimentos superficiais, em relação à capacidade de potenciar ou reduzir o efeito de inércia térmica dos elementos que cobrem.

A existência e o posicionamento do isolamento térmico, bem como as características dos revestimentos superficiais, são assim elementos essenciais para a determinação do nível de inércia térmica, que geralmente é classificada em fraca, média ou forte.

A inércia térmica será considerada neste estudo como o factor  $x_4$  para o Inverno e para o Verão, admitindo-se que poderá variar entre inércia térmica forte e inércia térmica fraca. Esta variação da inércia térmica, nas paredes exteriores, é conseguida por aplicação do isolamento térmico em diferentes posições, ou seja, a uma aplicação do isolamento pelo exterior corresponderá uma inércia térmica mais alta e a uma aplicação do isolamento pelo interior corresponderá uma inércia térmica mais baixa. Na Figura 4.7 é possível verificar a troca do posicionamento do isolamento térmico, que induz uma inércia térmica mais elevada e menos elevada, respectivamente.



**Figura 4.7 - Aplicação do isolamento térmico pelo interior e exterior respectivamente**

De realçar que o pavimento também influencia o nível de inércia térmica. No caso de inércia térmica forte, a massa do pavimento, para além de elevada deve estar exposta ao ambiente interior. Assim, para estudar o efeito de uma classe de inércia térmica forte, o pavimento será idêntico ao descrito em 4.2.1, ou seja, constituído por uma laje com 20 cm, reboco interior de 1 cm, argamassa de assentamento de 3 cm e um revestimento cerâmico de 1 cm, perfazendo 25 cm de espessura total.

No caso de inércia térmica fraca, a massa do pavimento ou é pequena ou não tem contacto directo com o ambiente interior. Assim, uma inércia térmica fraca pode ser conseguida por aplicação de um revestimento com características isolantes térmicas. Neste caso a massa do pavimento, mesmo sendo elevada, tem a sua contribuição consideravelmente reduzida para a inércia térmica do fogo. Desta forma, neste estudo, para obtenção do nível de inércia térmica baixo, o ladrilho cerâmico será substituído por um revestimento em parquet de cortiça, que tem características isolantes térmicas superiores. Assim sendo, o pavimento tem as características do Quadro 4.5.

**Quadro 4.5 - Pavimento de menor inércia térmica**

Pavimento de menor inércia térmica			
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R (m <sup>2</sup> .°C/W)
Ar interior	-	-	0.10
Reboco	0.01	1.3	0.008
Laje	0.20	2.0	0.100
Betonilha de regularização	0.03	1.3	0.023
Revestimento de cortiça	0.01	0.065	0.154
Ar interior	-	-	0.10
Espessura Total	0.250		
Coeficiente de transmissão térmica - U (W/m <sup>2</sup> .°C)			2.06

#### 4.2.2.6 - Factor Solar dos vãos orientados a Sul

O ganho de calor solar através de um envidraçado, que no caso geral se decompõe numa parcela instantânea que depende da transmitância ( $\tau_v$ ) do vidro, e de uma parcela diferida que é função da sua absorvância ( $\alpha$ ), é normalmente traduzido pelo factor solar, definido por:



$$g_v = \frac{\text{Ganhos de calor através do vidro}}{\text{Radiação incidente}} = \tau_v + f_i \alpha_v \quad (4.1)$$

onde  $f_i$  é a fracção de radiação solar absorvida pelo envidraçado que posteriormente é transmitida para o interior, por convecção e radiação, sob a forma de fluxo de calor. Através da expressão anterior é fácil entender que quanto menor for o factor solar do vidro, menor será a quantidade de ganhos solares através deste elemento. Nos casos em que o factor solar de um envidraçado não é suficiente para controlar de forma eficaz os ganhos de calor, é necessária a utilização de sistemas de protecção contra a entrada dos raios solares - protecções solares. Nos casos em que a protecção funciona no plano do vidro através de dispositivos próprios, normalmente reguláveis, o factor solar do sistema vidro+protecção é dado por:

$$g = g_v \cdot g_p \quad (4.2)$$

em que  $g_p$  é o factor solar da protecção, definido de forma idêntica à do vidro.

Sendo os vãos orientados a Sul os que recebem um nível maior de radiação solar, captando nomeadamente a componente directa que não é sentida nos vãos a Norte, apenas aqueles serão objecto de estudo no que respeita ao efeito produzido pelo factor solar no desempenho térmico do fogo. Por outro lado, dado que é na estação quente que os ganhos solares desempenham um papel decisivo nas condições de conforto e consequente energia de arrefecimento, será apenas nesta estação que o efeito do factor solar será avaliado.

No programa de simulação utilizado neste trabalho, o factor solar não constitui um parâmetro de entrada do modelo, mas sim as transmitâncias e reflectâncias solares, quer do vidro quer da protecção solar. Apesar da transmitância não ser equivalente ao factor solar, como se conclui da definição apresentada, a verdade é que constitui, em geral, a propriedade com mais impacto naquele parâmetro. Por esta razão, e pelo facto de ser a propriedade levada em conta no programa de simulação, a transmitância assumirá neste estudo o papel de factor solar como parâmetro que determina o nível de ganhos solares através de um envidraçado.

Como se viu atrás serão utilizadas neste estudo, na estação de aquecimento, janelas duplas e triplas, com o objectivo de estudar o efeito de diferentes níveis de coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados no desempenho térmico do fogo. No entanto, a utilização de janelas duplas ou triplas implica a alteração não só dos coeficientes de transmissão térmica mas igualmente dos valores das transmitâncias, já que em igualdade de características dos vidros uma janela tripla apresentará em geral uma transmitância inferior à da janela dupla. Isto significa que no caso real estes factores não são independentes, ou seja, a modificação de um implica uma variação do outro, e desta forma o problema perde uma importante condição para poder ser abordado por um plano factorial, que é a observação da independência dos factores.

Assim, embora as propriedades ópticas, nomeadamente no que respeita à transmitância e reflectância solar, de uma janela tripla não sejam, como se referiu, as mesmas de uma janela dupla, neste estudo considerar-se-á, pelas razões expostas, que são idênticas, de forma que a diferença de comportamento entre as duas janelas na estação de aquecimento se possa atribuir exclusivamente à diferença de coeficientes de transmissão térmica. De facto, se fossem consideradas as verdadeiras propriedades ópticas dos vidros, não seria possível restringir, na comparação dos efeitos produzidos por cada janela, entre o que é devido à diferença de

coeficientes de transmissão térmica e o que é devido à diferença das propriedades ópticas. Assim, tomando 0.7 e 0.6 como os verdadeiros valores da transmitância solar para as janelas dupla e tripla admitidas, considerou-se para ambas um valor comum de  $\tau_v = 0.65$  para aquela propriedade

Na estação de arrefecimento, o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados não é um factor relevante do desempenho térmico dos edifícios, pelo que não será levado em conta na análise de sensibilidade realizada nesta estação. Desta forma, nesta estação serão admitidos como elementos invariáveis as janelas de vidro duplo com o coeficiente de transmissão térmica e as propriedades ópticas já referidas. De forma a fazer variar, na estação de arrefecimento, as propriedades ópticas dos vãos, no caso presente apenas os virados a Sul, sem alterar as suas características de transmissão térmica, recorre-se à activação de uma protecção solar dos vãos, disposta pelo exterior, de resistência térmica admitida nula e com uma transmitância solar  $\tau_p = 0.1$ .

Assim, o factor solar dos vãos é considerado neste estudo como factor de variação do desempenho apenas na estação de arrefecimento e representado por uma transmitância solar que leva em conta o efeito de uma protecção solar no caso da sua activação. Será designado por  $x_2$ , e o seu impacto avaliado a partir de dois níveis de activação da protecção solar, que ficam associados às situações de menor e maior desempenho. Como no Inverno os ganhos solares são maioritariamente favoráveis, dado contribuírem para a redução das necessidades úteis de aquecimento, os vãos considerar-se-ão nesta estação, por simplificação, sempre desprotegidos e, deste modo, o impacto do factor solar não será estudado na situação de Inverno.

No Verão, onde o objectivo é controlar os ganhos solares para evitar o sobreaquecimento dos espaços interiores do edifício, o RCCTE recomenda uma percentagem de activação das protecções solares, em relação à área das janelas onde funcionam, de 70%, pelo que será este tipo de utilização que será adoptado como representando o nível de maior desempenho. Em representação do nível de menor desempenho tomar-se-á um grau de activação de 30% em relação à área total da janela. Entrando em conta com estes graus de activação, as transmitâncias solares equivalentes dos vãos vêm calculadas por:

$$\text{Nível de menor desempenho:} \quad \tau_{\text{Verão}}^- = 0.7 \cdot \tau_v + 0.30 \cdot \tau_v \tau_p = 0.48 \quad (4.3)$$

$$\text{Nível de maior desempenho:} \quad \tau_{\text{Verão}}^+ = 0.3 \cdot \tau_v + 0.70 \cdot \tau_v \tau_p = 0.24 \quad (4.4)$$

#### 4.2.2.7 – Apresentação dos níveis

Nos quadros apresentados abaixo - Quadro 4.6 e Quadro 4.7 - resumem-se os valores numéricos tomados pelos diferentes factores quando colocados nos níveis “baixo” e “alto”, respectivamente designados por  $x^-$  e  $x^+$ . Como se referiu atrás, serão realizados estudos independentes para o Inverno e para o Verão, uma vez que as funções resposta são traduzidas por índices de desempenho diferentes para cada um dos períodos.

**Quadro 4.6 - Factores para o período de aquecimento (Inverno)**

Factores		$\bar{x}$	$x^+$	Unidades
$x_1$	Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas ( $U_{par}$ )	1.02	0.48	W/m <sup>2</sup> K
$x_2$	Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados ( $U_{env}$ )	2.79	1.64	W/m <sup>2</sup> K
$x_3$	Relação entre área dos envidraçados e área total a Sul ( $A_{env}/A_{par}$ )	50	20	%
$x_4$	Inércia térmica ( $I_t$ )	Fraca	Forte	Kg/m <sup>2</sup>
$x_5$	Número de renovações horárias ( $R_{ph}$ )	1.0	0.6	h <sup>-1</sup>

**Quadro 4.7 - Factores para o período de arrefecimento (Verão)**

Factores		$\bar{x}$	$x^+$	Unidades
$x_1$	Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas ( $U_{par}$ )	1.02	0.48	W/m <sup>2</sup> K
$x_2$	Transmitância solar dos vãos envidraçados a Sul ( $\tau_{sol}$ )	0.48	0.24	-
$x_3$	Relação entre área dos envidraçados e área total a Sul ( $A_{env}/A_{par}$ )	50	20	%
$x_4$	Inércia térmica ( $I_t$ )	Fraca	Forte	Kg/m <sup>2</sup>
$x_5$	Número de renovações horárias ( $R_{ph}$ )	1.0	0.6	h <sup>-1</sup>

Como se observa, e em correspondência com a descrição feita nos pontos anteriores, as análises para as estações de aquecimento e arrefecimento têm 4 factores comuns, com os mesmos valores numéricos para os níveis “alto” e “baixo”, e dois factores distintos - o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados, aplicado apenas para a estação de aquecimento, e a transmitância solar dos envidraçados a Sul, utilizada unicamente na estação de arrefecimento. Volta-se a acentuar que os níveis de alto e baixo desempenho podem não corresponder aos mesmos valores numéricos dos factores no Inverno e no Verão.

Para conferir generalidade ao modelo que será deduzido, permitindo que ele possa ser também utilizado para valores dos factores entre os níveis “baixo” e “alto” (Quadros 4.6 e 4.7), os valores dos factores nas suas verdadeiras unidades devem ser normalizados para o intervalo de variação [-1;+1], o que se faz utilizando a equação de conversão (3.9). Para o caso presente, a aplicação desta equação fornece a tabela de conversão mostrada no Quadro 4.8.

**Quadro 4.8 - Correspondência entre os valores reais dos factores e os valores normalizados**

	$\bar{x}$	$x \in [\bar{x}; x^+]$	$x^+$
$x_1$	-1	$3.704 \cdot (0.75 - x)$	+1
$x_2$	-1	$1.739 \cdot (2.215 - x)$ (aquec.) $8.333 \cdot (0.36 - x)$ (arref.)	+1
$x_3$	-1	$0.0667 \cdot (35 - x)$	+1
$x_4$	-1	$x$	+1
$x_5$	-1	$5 \cdot (0.8 - x)$	+1

Como é fácil verificar, os valores -1 e +1, correspondentes aos valores normalizados dos níveis “baixo” e “alto”, resultam da aplicação das expressões para os extremos do intervalo  $[x; x^+]$ .

## 4.3 – Análise dinâmica do comportamento térmico dos edifícios

### 4.3.1 – O EnergyPlus

Para a realização deste trabalho foi adoptado o programa computacional *EnergyPlus*, desenvolvido a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, que simula de forma dinâmica o desempenho térmico e energético de edifícios.

O *EnergyPlus* é uma das ferramentas de simulação térmica e energética mais utilizadas actualmente, pois, com base nas características geométricas e construtivas da edificação, e das condições climáticas do local de implantação, possui a capacidade de estimar ao longo do tempo, entre outras variáveis de interesse, processos térmicos diversos, como ganhos solares através dos envidraçados e trocas de calor por condução e por ventilação, distribuições de temperaturas em regime livre, como as relativas ao ar interior e às superfícies dos elementos construtivos, e necessidades energéticas para a manutenção de condições de conforto térmico, o que implica uma simulação dos espaços em regime de temperatura controlada. Este programa permite igualmente dimensionar sistemas mecânicos de climatização e efectuar avaliações de conforto térmico com base na metodologia de Fanger.

Para a realização desta dissertação será utilizada a versão 1.2.0 do programa, a qual, embora não seja a versão mais recente, dispõe das potencialidades suficientes para efectuar os estudos pretendidos. Na Figura 4.8 é possível visualizar o ambiente gráfico do *EnergyPlus* no que respeita ao painel de introdução de dados - Editor IDF (Input Data File).

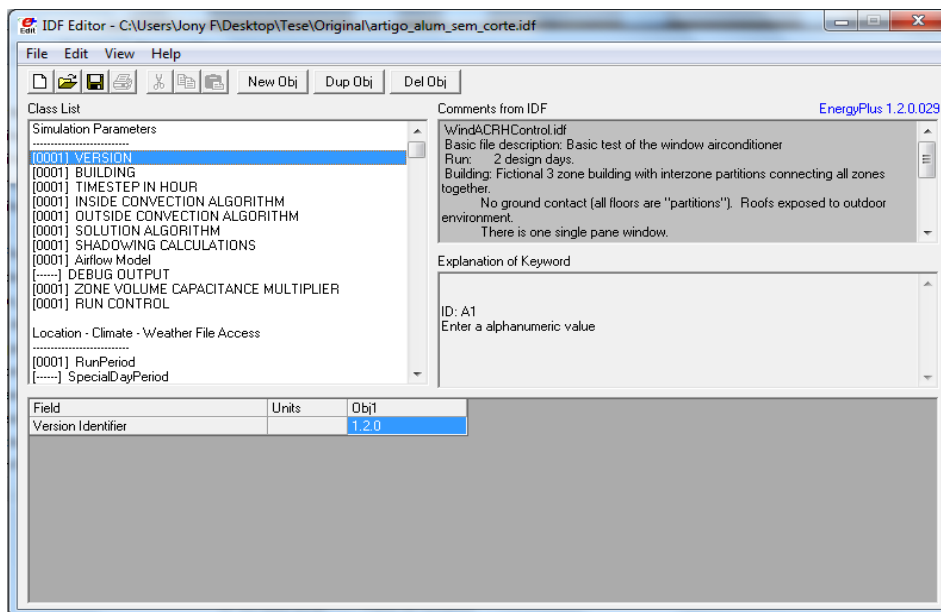
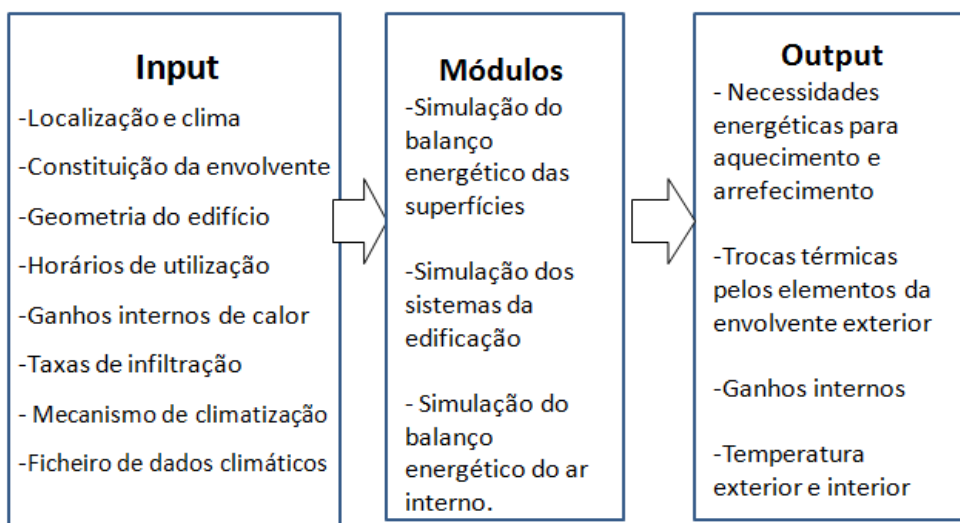


Figura 4.8 - Painel de entrada de dados do EnergyPlus [17]

Para obter a informação desejada sobre o comportamento térmico e/ou energético do edifício, o programa considera o objecto de estudo dividido em zonas térmicas sobre as quais executa os necessários balanços de calor e de massa (este último balanço é necessário, por

exemplo, no caso de um tratamento aprofundado dos fenómenos de infiltração e ventilação) para a determinação, em cada passo do tempo, das variáveis do problema. Por zona térmica entende-se um volume de ar onde a temperatura possa ser considerada uniforme. Resulta desta hipótese que cada zona térmica apresenta um sistema independente de controlo térmico.

Relativamente aos balanços térmicos, destaca-se o respeitante ao nó do ar representativo de cada zona térmica, que integra os ganhos internos da zona (ocupação, equipamentos, iluminação), os fluxos de calor convectivos com as superfícies envolventes e as trocas de calor por ventilação com o exterior e com o ar de outras zonas térmicas vizinhas. Para além do balanço térmico do volume de ar interior são também efectuados os balanços térmicos das superfícies que formam a envolvente térmica da zona, que passam pelo levantamento, em cada superfície, dos fluxos de calor envolvidos - condução, convecção e radiação - e pela aplicação do princípio de conservação da energia. Destes balanços resulta um sistema de equações que é resolvido em cada passo no tempo e fornece os valores das variáveis que constituem as incógnitas do problema, que no caso de uma simulação simples em regime livre, são essencialmente as temperaturas do ar de cada zona térmica e as temperaturas das suas superfícies envolventes. Para além dos balanços que envolvem os elementos de construção, o EnergyPlus permite também simular a interacção dos volumes de ar das zonas térmicas com os sistemas mecânicos de climatização nelas instalados, os quais, uma vez caracterizados, são tratados em módulo próprio. Na Figura 4.9 representa-se um esquema de funcionamento do programa muito simplificado.



**Figura 4.9 - Esquema resumido de funcionamento do EnergyPlus**

Para realizar os cálculos acima descritos, o *EnergyPlus* necessita de todos os dados relativos ao edifício, nomeadamente no que concerne à geometria, localização, materiais e características da ocupação, que são introduzidos pelo utilizador a partir de um editor de texto em formato IDF (Input Data File), e dos dados referentes ao clima do local, nomeadamente, temperaturas do ar, radiação solar, velocidade e direcção do vento e, eventualmente, a humidade relativa. Estes dados estão organizados em ficheiros com um formato específico, que é lido pelo EnergyPlus, e estão disponíveis para serem utilizados com o programa.

No que diz respeito à saída de resultados, depois de concluída a simulação, o programa gera um ficheiro que pode ser transformado em folha de cálculo e trabalhado pelo utilizador para produzir gráficos, estatísticas variadas, ou outras análises de interesse para o estudo.

Paralelamente, o programa fornece vários ficheiros com informação útil sobre o problema simulado: um ficheiro de erros para que, caso estes existam, o utilizador possa proceder à sua correcção; um ficheiro em formato CAD com a geometria do edifício, que é útil para confirmar a correcta introdução de dados; um ficheiro onde ficam registados os parâmetros da simulação; um ficheiro com os valores das funções de transferência por condução e por fim um ficheiro em que o programa lista todas variáveis que são possíveis de fazer sair numa simulação.

Como ficou patente nesta breve apresentação, o EnergyPlus pode ser utilizado para os mais variados estudos sobre o comportamento térmico e/ou energético de edifícios, desde os casos mais simples de funcionamento do edifício em regime livre até aos casos mais complexos envolvendo o uso de sistemas de climatização. O objectivo principal desta dissertação consiste numa análise de sensibilidade de factores construtivos que condicionam o comportamento térmico de um edifício, o que não exigirá o recurso a sistemas mecânicos de climatização. As simulações realizadas abrangerão uma abordagem de funcionamento do fogo em regime livre para a estação de arrefecimento, que recorre aos valores das temperaturas interiores para construir o índice de desempenho de Verão, e em regime de temperatura controlada na estação de aquecimento, onde, para a construção do índice de desempenho de Inverno, apenas são importantes as necessidades energéticas para a manutenção das condições de conforto térmico no fogo, não sendo por isso necessária a definição dos sistemas mecânicos que produzem e fornecem essa energia.

## Capítulo 5 – Resultados

### 5.1 – Funções objectivo

As funções objectivo que servirão de base à análise de sensibilidade desenvolvida neste trabalho são expressas, como já referido, através de indicadores de desempenho para a estação de aquecimento e de arrefecimento. Para a estação de aquecimento escolheu-se as necessidades de energia útil para aquecimento ( $N_u$ ) como indicador do desempenho, que no âmbito deste trabalho representam as necessidades de energia em aquecimento para assegurar a temperatura mínima de conforto térmico convencionada, que se admite ser de 20°C, de acordo com a regulamentação em vigor. Estas necessidades de energia útil serão calculadas em regime dinâmico, por unidade de área de pavimento, utilizando o programa de simulação computacional *EnergyPlus*, sumariamente descrito no capítulo 4. Simbolicamente, esta função objectivo fica representada por:

$$N_u = f(U_{par}, U_{env}, \frac{A_{env}}{A_{par}}, I_t, R_{ph}) = \frac{N_H}{A_u}, \text{ com } T_a \geq 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.1)$$

sendo  $T_a$  a temperatura do ar interior (°C),  $N_H$  as necessidades de energia útil para aquecimento da fracção (kWh), e  $A_u$  a área útil de pavimento (m<sup>2</sup>).

A análise das necessidades de energia útil de aquecimento será realizada para a região climática de Bragança, pelo facto de apresentar condições de Inverno mais severas e assim melhor colocar em evidência os factores condicionantes do comportamento térmico da edificação nesta estação. Em correspondência com as disposições regulamentares (RCCTE), a estação de aquecimento, para efeitos de contabilização das necessidades de energia, foi tomada como o período com início no primeiro decêndio posterior a 1 de Outubro em que, para a localização de Bragança, a temperatura média diária é inferior a 15 °C e com fim no último decêndio anterior a 31 de Maio, em que a referida temperatura ainda é inferior a 15 °C. Com base no ficheiro climático do *EnergyPlus* para a região de Bragança, a aplicação desta definição conduz ao período com início em 11 de Outubro e final em 31 de Maio. A análise de sensibilidade na estação de aquecimento será realizada através de um plano factorial completo 2<sup>5</sup>, cuja forma de elaboração foi descrita no Capítulo 3

Enquanto no Inverno a utilização de energia é indispensável para manter a temperatura do ar acima do limite aceitável do conforto, no Verão a preocupação fundamental é evitar a ocorrência de sobreaquecimento do ambiente interior, o que acontece para temperaturas acima de dado limite, tomado neste trabalho como 25 °C, em correspondência com a legislação em vigor. Neste caso tomar-se-á como função objectivo, representativa do desempenho térmico da edificação, um índice que se designará por graus-hora de desconforto por sobreaquecimento (ODH - Overheating Degree Hours), definido pela soma das diferenças positivas entre a temperatura do ar interior e a temperatura de referência de 25 °C para o período considerado, ou seja:

$$ODH_{25} = f(U_{par}, \tau_{sol}, \frac{A_{env}}{A_{par}}, I_t, R_{ph}) = \sum (T_a - 25) \cdot \delta \quad (5.2)$$

com  $\delta = 1\text{h}$  se  $T_a > 25^\circ\text{C}$

$\delta = 0$  se  $T_a \leq 25^\circ\text{C}$

Quanto maior for o valor deste índice menor é o desempenho da edificação no que respeita à manutenção das condições de conforto no Verão. Relativamente a esta estação, considera-se que tem a duração de 4 meses, correspondente aos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, tendo-se escolhido a região de Lisboa como representativa de uma zona com condições climáticas de Verão apropriadas para o estudo de sensibilidade pretendido. O plano de experiências (simulações) escolhido para realizar este estudo foi um plano factorial fraccionado  $2^{5-1}_V$ , tendo a motivação desta escolha sido a de exemplificar a aplicação de um plano deste tipo a um caso concreto.

## 5.2 – Análise da estação de aquecimento

Como referido, a análise de sensibilidade na estação de aquecimento será baseada na aplicação de um plano factorial completo  $2^5$ , que implica a realização de 32 experiências, equivalentes neste estudo a simulações com o programa *EnergyPlus*, envolvendo 5 factores independentes e dois níveis de variação para cada um deles. A matriz de desenho deste plano é a que se indica no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Matriz de um desenho factorial completo  $2^5$

Simulação	Factor				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	-1
9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	-1
11	-1	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	-1
17	-1	-1	-1	-1	+1
18	+1	-1	-1	-1	+1
19	-1	+1	-1	-1	+1
20	+1	+1	-1	-1	+1
21	-1	-1	+1	-1	+1
22	+1	-1	+1	-1	+1



23	-1	+1	+1	-1	+1
24	+1	+1	+1	-1	+1
25	-1	-1	-1	+1	+1
26	+1	-1	-1	+1	+1
27	-1	+1	-1	+1	+1
28	+1	+1	-1	+1	+1
29	-1	-1	+1	+1	+1
30	+1	-1	+1	+1	+1
31	-1	+1	+1	+1	+1
32	+1	+1	+1	+1	+1

Por sua vez, a matriz de cálculo deste plano apresenta-se no Quadro 5.2. Executando as 32 simulações com os factores nos níveis indicados no Quadro 5.1 obtêm-se os valores para as necessidades úteis de energia que se indicam no Quadro 5.3.

Quadro 5.2 - Matriz de cálculo de um plano completo  $2^5$  (A=X<sub>1</sub>; B=X<sub>2</sub>; C=X<sub>3</sub>; D=X<sub>4</sub>; E=X<sub>5</sub>)

RUN	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	E	AE	BE	ABE	CE	ACE	BCE	ABCE	DE	ADE	BDE	ABDE	CDE	ACDE	BCDE	ABCDE	
1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
4	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
6	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	
7	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
8	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	
9	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	
10	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	
11	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	
12	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
13	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	
14	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	
15	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
17	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	
18	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	
19	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	
20	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
21	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	
22	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	
23	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
24	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
25	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	
26	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	
27	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
28	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	
29	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
30	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	
31	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

**Quadro 5.3 - Valores de  $N_u$  (kWh/m<sup>2</sup>) correspondentes às 32 simulações do plano factorial completo 2<sup>5</sup> estabelecido para o modelo**

Simulação								
	1	2	3	4	5	6	7	8
$N_u$	48.09	41.10	43.53	36.40	62.56	54.64	60.22	52.19
Simulação								
	9	10	11	12	13	14	15	16
$N_u$	45.71	38.74	41.23	34.18	62.14	54.22	59.79	51.78
Simulação								
	17	18	19	20	21	22	23	24
$N_u$	27.29	20.79	22.96	16.45	40.67	32.77	38.33	30.22
Simulação								
	25	26	27	28	29	30	31	32
$N_u$	25.03	18.61	20.82	14.48	39.98	32.06	37.63	29.62

A resolução do sistema de equações que tem como matriz dos coeficientes a que se indica no Quadro 5.2 e como termo independente os valores de  $N_u$  do Quadro 5.3, fornece para os coeficientes da equação representativa do modelo de cálculo para a estação de aquecimento os valores indicados no Quadro 5.4.

**Quadro 5.4 - Valores dos coeficientes da equação do modelo correspondente a um plano factorial completo 2<sup>5</sup>**

Factor								
	I	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$X_3$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$
Coef.	38.5691	-3.6795	-1.7052	-0.0198	7.6061	-0.3096	0.5023	-0.0107
Factor								
	$X_4$	$X_1 X_4$	$X_2 X_4$	$X_1 X_2 X_4$	$X_3 X_4$	$X_1 X_3 X_4$	$X_2 X_3 X_4$	$X_1 X_2 X_3 X_4$
Coef.	-0.6941	0.0147	0.0206	0.0087	0.4203	-0.0079	-0.0138	0.0002
Factor								
	$X_5$	$X_1 X_5$	$X_2 X_5$	$X_1 X_2 X_5$	$X_3 X_5$	$X_1 X_3 X_5$	$X_2 X_3 X_5$	$X_1 X_2 X_3 X_5$
Coef.	-10.5874	0.0717	0.0375	0.0060	-0.4292	-0.0756	-0.0433	-0.0122
Factor								
	$X_4 X_5$	$X_1 X_4 X_5$	$X_2 X_4 X_5$	$X_1 X_2 X_4 X_5$	$X_3 X_4 X_5$	$X_1 X_3 X_4 X_5$	$X_2 X_3 X_4 X_5$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5$
Coef.	-0.0097	0.0060	0.0053	0.0041	-0.0538	-0.0031	-0.00004	0.0026

Assim, a equação do modelo toma a forma geral:

$$\begin{aligned}
 N_u = & a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 + a_3 X_3 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 + a_{123} X_1 X_2 X_3 + a_4 X_4 + \\
 & + a_{14} X_1 X_4 + a_{24} X_2 X_4 + a_{124} X_1 X_2 X_4 + a_{34} X_3 X_4 + a_{134} X_1 X_3 X_4 + a_{234} X_2 X_3 X_4 + \\
 & + a_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4 + a_5 X_5 + a_{15} X_1 X_5 + a_{25} X_2 X_5 + a_{125} X_1 X_2 X_5 + a_{35} X_3 X_5 + a_{135} X_1 X_3 X_5 + \\
 & + a_{235} X_2 X_3 X_5 + a_{1235} X_1 X_2 X_3 X_5 + a_{45} X_4 X_5 + a_{145} X_1 X_4 X_5 + a_{245} X_2 X_4 X_5 + a_{1245} X_1 X_2 X_4 X_5 + \\
 & + a_{345} X_3 X_4 X_5 + a_{1345} X_1 X_3 X_4 X_5 + a_{2345} X_2 X_3 X_4 X_5 + a_{12345} X_1 X_2 X_3 X_4 X_5
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

com os coeficientes a dados no Quadro 5.4.

### 5.2.1 Significância dos efeitos e validação do modelo

Como foi referido no capítulo 3, os coeficientes da equação (5.3) representam os efeitos principais e de interacção dos diversos factores. Um dos pontos importantes de um plano de experiências prende-se com a significância destes efeitos na resposta produzida pelo modelo em análise. Por outras palavras, num plano de experiências poderão existir efeitos principais ou de interacção de factores que poderão ter impacte reduzido nos valores da resposta e, como tal, será admissível a sua não consideração na equação do modelo matemático, reduzindo a dimensão desta equação e assim simplificando o processo de cálculo. Num plano com repetição de experiências, a repetição de uma mesma experiência envolvendo os mesmos factores e nos mesmos níveis não conduz no caso geral ao mesmo resultado. Tal resulta do erro que estará sempre presente num processo experimental. Isto significa que a variação da resposta por motivo da variação de um factor não representa necessariamente um efeito desse factor, pois tal pode dever-se apenas ao erro inerente ao processo experimental. Existindo para a mesma experiência valores diferentes de resposta, impõe-se uma análise estatística onde sejam calculadas para todas as experiências as médias das respostas e as respectivas variâncias. A partir destes resultados é possível então estimar o desvio-padrão ( $\sigma$ ) que está associado a dado efeito. O conhecimento deste desvio-padrão é importante na medida em que é por comparação com ele que se torna possível avaliar o significado ou importância de um efeito no valor da resposta. Quanto maior for a relação entre um efeito e o respectivo desvio padrão maior a significância estatística desse efeito na resposta.

Num plano de experiências sem repetição, que é o tipo de plano que está em causa quando as experiências são executadas por simulação computacional - uma simulação computacional com os mesmos valores das variáveis produz sempre o mesmo resultado - não há lugar à estimação de desvios-padrão, o que inviabiliza a avaliação da significância dos efeitos nos moldes atrás descritos. No entanto, ainda assim, e mediante dadas hipóteses, é possível avaliar aquela significância, utilizando-se o processo que a seguir se descreve, que usualmente é representado na forma gráfica. No caso limite de nenhum dos efeitos ter significado na resposta, então as observações são repetições aleatórias da resposta do modelo. Os efeitos principais e interacções resultariam neste caso de diferenças de médias de valores de resposta aleatórios, que, pelo Teorema do Limite Central, teriam uma distribuição aproximadamente Normal e de média nula. Assim, um gráfico de Probabilidade Normal dos efeitos apareceria como uma sucessão de pontos dispostos em linha recta. Se algum dos efeitos tivesse significado, então não respeitaria a distribuição Normal, o que em termos gráficos se traduziria por um afastamento em relação à recta referida. A utilização deste processo no presente estudo, relativo à estação de aquecimento, está sintetizada na Figura 5.1, em que em lugar do gráfico de Probabilidade Normal se optou por um gráfico de Probabilidade Semi-Normal ou Probabilidade Normal Positiva, assim designado por considerar apenas os valores positivos da variável normal padrão  $z = (x - \mu) / \sigma$ . Este tipo de representação é muitas vezes preferido em relação ao gráfico de Probabilidade Normal pelo facto de agrupar todos os pontos afastados da recta no mesmo quadrante do gráfico, neste caso o superior direito.

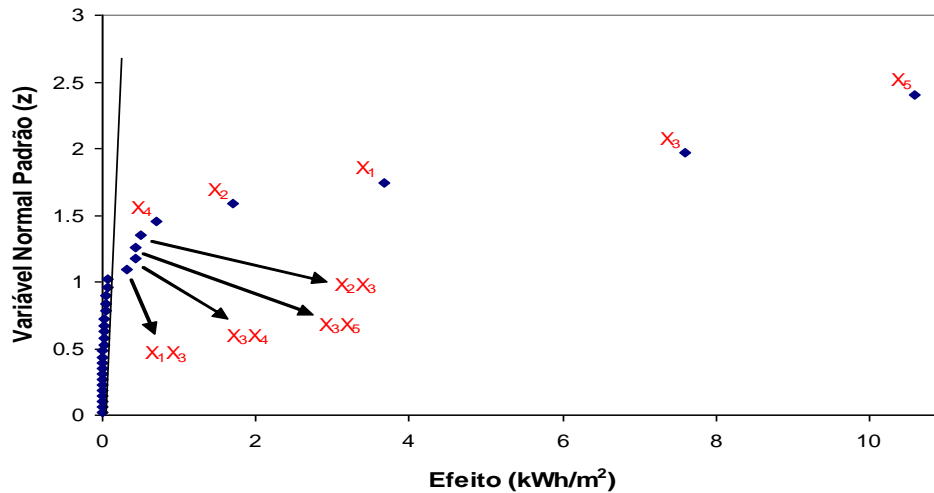


Figura 5.1 - Gráfico de Probabilidade Normal Positiva dos Efeitos principais e Interações referente à análise de Inverno

Da observação do gráfico da Figura 5.1 ressalta que os efeitos que influenciam mais significativamente a resposta do modelo são os efeitos principais dos factores  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  e  $X_5$ , e as interações  $X_1X_3$ ,  $X_2X_3$ ,  $X_3X_4$  e  $X_3X_5$ . Desta forma, a equação representativa do modelo poderia ser reescrita de forma muito mais simples e sem perda de precisão significativa, como:

$$N_u = 38.57 - 3.68X_1 - 1.71X_2 + 7.61X_3 - 0.69X_4 - 10.59X_5 - 0.31X_1X_3 + 0.50X_2X_3 + 0.42X_3X_4 - 0.43X_3X_5 \quad (5.4)$$

Como também se verifica, todas as interações de ordem superior à segunda são completamente desprezáveis, o que vai ao encontro do que era esperado.

Uma vez estabelecida a equação do modelo, na sua forma completa - Equação (5.3) - ou mais simplificada - Equação (5.4) - importa validar o seu comportamento para outros cenários diferentes dos utilizados para a sua dedução. Na Figura 5.2 mostram-se para 37 cenários diferentes, os resultados obtidos por aplicação da equação completa do modelo - Equação (5.3) - e por simulação com o programa EnergyPlus. Como é fácil verificar existe uma excelente concordância entre os resultados obtidos por ambos os métodos, o que confirma a representatividade da equação para o caso de estudo e para os domínios de variação dos factores admitidos.

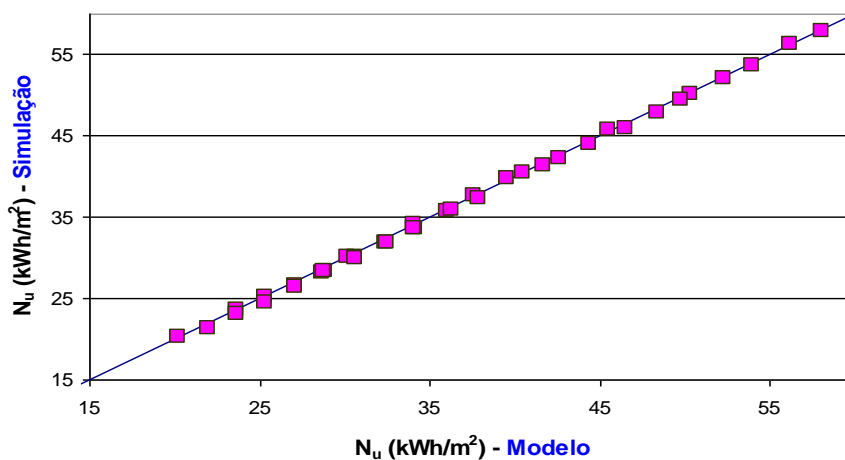


Figura 5.2 - Comparação dos resultados obtidos por simulação e por aplicação da equação completa do modelo - Equação (5.3)

## 5.2.2 Análise dos efeitos principais e interacções

O método da análise factorial, pela forma como organiza os cálculos e estrutura os resultados, permite evidenciar de forma clara, através de representações gráficas simples, a importância dos efeitos dos factores na resposta, bem como das interacções existentes entre eles. Na Figura 5.3 sumarizam-se os efeitos principais dos factores nas necessidades de energia útil de aquecimento, que constitui a resposta do modelo para estação de Inverno.

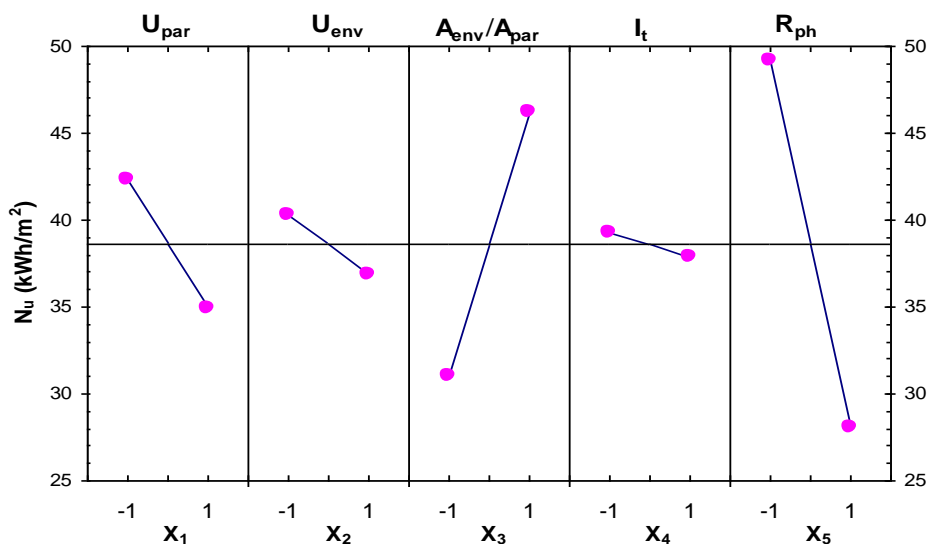


Figura 5.3 - Efeitos principais dos factores na estação de aquecimento

Verifica-se que no caso dos coeficientes de transmissão térmica - de paredes e envidraçados -, inércia térmica e taxa de ventilação, uma variação positiva do seu nível - passagem do nível baixo (maior valor dos coeficientes, menor valor da inércia e maior valor da taxa) para o nível alto (menor valor dos coeficientes, maior valor da inércia e menor valor da taxa) induz uma variação negativa na resposta, o que é desejável tendo em conta o objectivo de economia de energia que deve estar sempre subjacente a um projecto. Contrariamente, a diminuição da área envidraçada face à área opaca da parede Sul produz uma variação positiva da resposta, o que é indesejável pois conduz ao aumento das necessidades energéticas. Por observação da Figura 5.3 é possível verificar que o impacto negativo nas necessidades energéticas da redução da área envidraçada da parede Sul - de que resulta o decréscimo dos ganhos solares directos - não é compensado pelo aumento das características isolantes da fachada - partes opaca e envidraçada. Os factores de menor e maior impacto nas necessidades energéticas são, respectivamente, a inércia térmica e a taxa de ventilação, produzindo ambos um abaixamento das necessidades energéticas quando passam do nível baixo - inércia fraca e taxa de ventilação elevada - para o nível alto - inércia forte e taxa de ventilação baixa.

Nas Figuras 5.4 - 5.7 mostram-se os efeitos de interacção entre os factores que foram seleccionados para integrar a equação do modelo. Como foi referido anteriormente, a diferença de declive das rectas representativas da interacção de dois factores constitui uma medida visual eficaz da importância dessa interacção. O paralelismo de rectas é sinónimo de inexistência de interacção e quanto maior for a diferença de declive maior a importância da interacção.

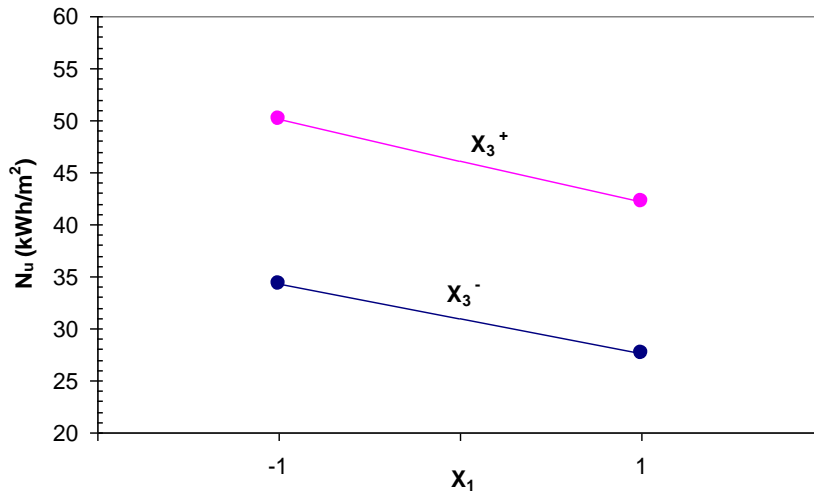


Figura 5.4 - Interação  $X_1X_3$  - Coeficiente de transmissão térmica das partes opacas/Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul (estação de aquecimento)

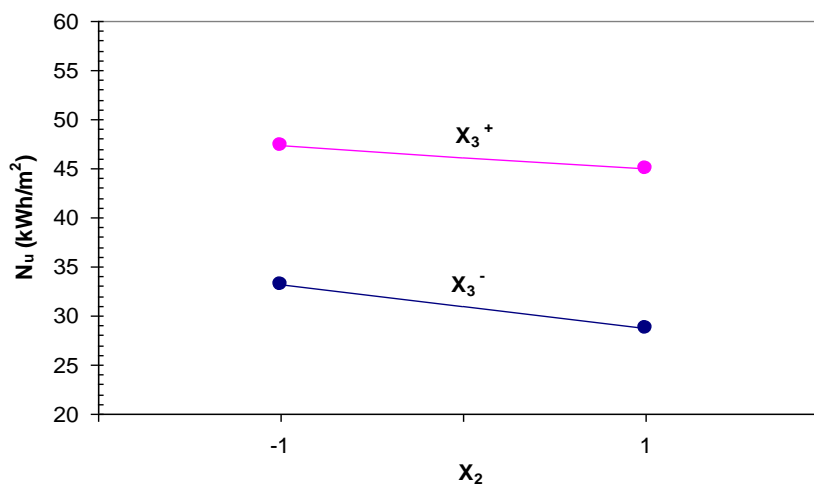


Figura 5.5 - Interação  $X_2X_3$  - Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados/Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul (estação de aquecimento)

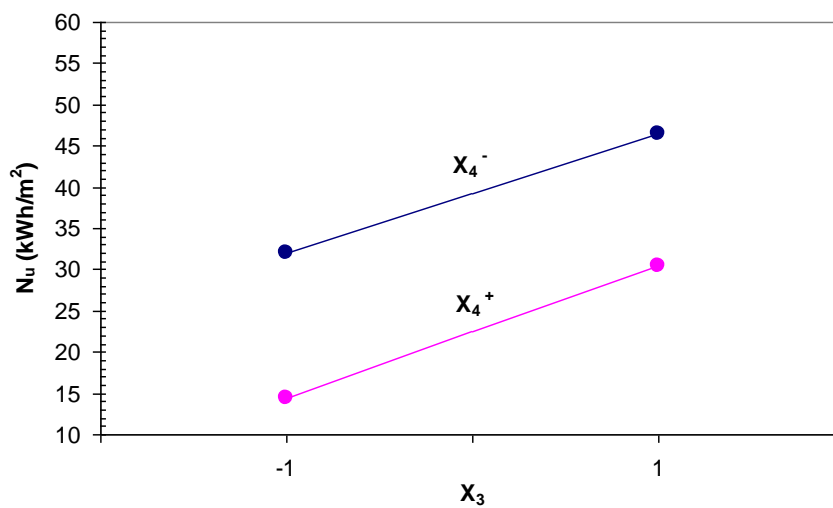


Figura 5.6 - Interação  $X_3X_4$  - Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul/Inércia térmica (estação de aquecimento)

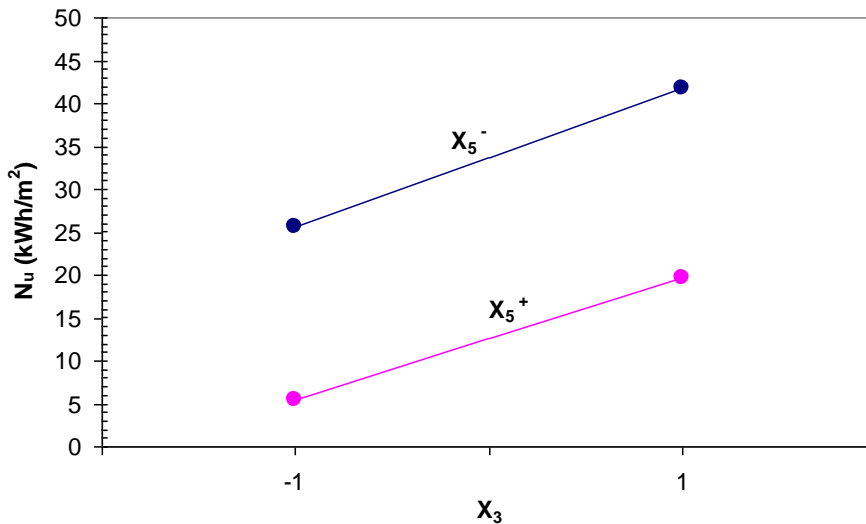


Figura 5.7 - Interação  $X_3X_5$  - Inércia térmica/Taxa de renovação horária (estação de aquecimento)

Como comentário geral das Figuras 5.4 - 5.7, pode afirmar-se que as interações mostradas são no geral fracas. Tal significa que o efeito de um factor praticamente não varia, ou varia pouco, com o nível em que se encontra o outro factor. Esta constatação permite concluir que a análise de sensibilidade na estação de aquecimento poderia basear-se apenas no levantamento e comparação dos efeitos principais dos factores. As interações dos factores pouco interferem nos resultados desta análise.

### 5.3 – Análise da estação de arrefecimento

Como se referiu, a análise de sensibilidade na estação de arrefecimento utilizará um plano factorial fraccionado  $2^{5-1}_V$ . A utilização deste plano permite estudar os mesmos 5 factores mas apenas com 16 experiências, ou seja, com metade do esforço exigido pelo plano factorial completo. Em contrapartida, haverá associação de efeitos, pelo que se diminui a qualidade da informação obtida. Neste plano é utilizada a matriz de cálculo do plano factorial completo  $2^4$ , mas em que se faz a equivalência  $X_5 = X_1X_2X_3X_4$ , que constitui o gerador do desenho. Nestas condições, a relação definidora do desenho é  $I = X_5 \bullet X_5 = X_1X_2X_3X_4 X_5$  e a estrutura de *aliases* é a que se indica:

$1 \bullet I = 1 \bullet 12345 = 1^22345 = 2345$	$3 \bullet I = 3 \bullet 12345 = 123^245 = 1245$
$2 \bullet I = 2 \bullet 12345 = 12^2345 = 1345$	$31 \bullet I = 31 \bullet 12345 = 1^223^245 = 245$
$12 \bullet I = 12 \bullet 12345 = 1^22^2345 = 345$	$32 \bullet I = 32 \bullet 12345 = 12^23^245 = 145$
$312 \bullet I = 312 \bullet 12345 = 1^22^23^245 = 45$	$42 \bullet I = 42 \bullet 12345 = 12^234^25 = 135$
$4 \bullet I = 2 \bullet 12345 = 1234^25 = 1235$	$412 \bullet I = 412 \bullet 12345 = 1^22^234^25 = 35$
$41 \bullet I = 41 \bullet 12345 = 1^2234^25 = 235$	$43 \bullet I = 43 \bullet 12345 = 123^24^25 = 125$
$431 \bullet I = 431 \bullet 12345 = 1^223^24^25 = 25$	
$432 \bullet I = 432 \bullet 12345 = 12^23^24^25 = 15$	
$4312 \bullet I = 4312 \bullet 12345 = 1^22^23^24^25 = 5$	



Resumindo, as associações de efeitos são as seguintes:

1+2345	12+345	123+45
2+1345	13+245	124+35
3+1245	14+235	134+25
4+1235	23+145	234+15
	24+135	1234+5
	34+125	

que foram já apresentadas no capítulo 3 para este plano fraccionado. Como se trata de um plano de resolução V, nenhum efeito principal ou interacção de dois factores está associado a qualquer outro efeito principal ou interacção de dois factores. Os efeitos principais estão associados a interacções de 4 factores e as interacções de dois factores estão associadas a interacções de 3 factores.

A matriz de desenho deste plano é a mesma do plano factorial completo  $2^4$  com a coluna adicional da interacção  $X_1X_2X_3X_4$  em representação do factor  $X_5$ . Esta matriz está representada no Quadro 5.5.

**Quadro 5.5 - Matriz do desenho factorial fraccionado  $2_{V}^{5-1}$ .**

Simulação	Factor				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	-1	-1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	+1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	-1
9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1

Por sua vez, a matriz de cálculo de um plano fraccionado  $2_{V}^{5-1}$  está representada no Quadro 5.6, juntamente com as associações de efeitos a que este plano dá lugar.

Quadro 5.6 - Matriz de cálculo do plano fraccionado  $2^{5-1}_V$  (A=X<sub>1</sub>; B=X<sub>2</sub>; C=X<sub>3</sub>; D=X<sub>4</sub>; E=X<sub>5</sub>).

RUN	I	A =BCDE	B =ACDE	AB =CDE	C =ABDE	AC =BDE	BC =ADE	ABC =DE	D =ABCE	AD =BCE	BD =ACE	ABD =CE	CD =ABE	ACD =BE	BCD =AE	ABCD =E
1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
4	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
6	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
7	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
11	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
12	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
13	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
15	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

A execução das 16 simulações com os factores nos níveis indicados no Quadro 5.5 forneceu os valores para os graus-hora de desconforto por sobreaquecimento que se indicam no Quadro 5.7.

**Quadro 5.7 - Valores de ODH<sub>25</sub> (°Ch) correspondentes às 16 simulações do plano factorial fraccionado  $2^{5-1}$  estabelecido para o modelo**

		Simulação							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ODH <sub>25</sub>		11032	7580	2433	5145	1950	4361	1626	868
		Simulação							
		9	10	11	12	13	14	15	16
ODH <sub>25</sub>		6755	12860	4379	2409	3603	1720	680	1398

A resolução do sistema de equações que tem por matriz dos coeficientes a que se indica no Quadro 5.6 e como termo independente os valores de ODH do Quadro 5.7, fornece para os coeficientes da equação representativa do modelo de cálculo para a estação de arrefecimento os valores indicados no Quadro 5.8.

**Quadro 5.8 - Valores dos coeficientes da equação do modelo correspondente a um plano factorial fraccionado  $2^{5-1}$**

		Factor							
		I	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub> X <sub>5</sub>
Coef.		4300.06	242.56	-1932.69	-154.87	-2274.28	-181.69	1049.85	83.98
		Factor							
		X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub> X <sub>5</sub>	X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>5</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>5</sub>	X <sub>5</sub>
Coef.		-74.51	128.50	-76.43	-529.37	-101.10	-480.80	147.74	1250.60

Assim, a equação do modelo, na sua forma completa, tem o seguinte desenvolvimento:

$$ODH_{25} = l_0 + l_1 X_1 + l_2 X_2 + l_3 X_3 + l_4 X_4 + l_5 X_5 + l_{12} X_1 X_2 + l_{13} X_1 X_3 + l_{14} X_1 X_4 + l_{15} X_1 X_5 + l_{23} X_2 X_3 + l_{24} X_2 X_4 + l_{25} X_2 X_5 + l_{34} X_3 X_4 + l_{35} X_3 X_5 + l_{45} X_4 X_5 \quad (5.5)$$

Com as seguintes associações de coeficientes:

$$\begin{aligned} l_1 &= a_1 + a_{2345} & l_2 &= a_2 + a_{1345} & l_3 &= a_3 + a_{1245} & l_4 &= a_4 + a_{1235} \\ l_5 &= a_5 + a_{1234} & l_{12} &= a_{12} + a_{345} & l_{13} &= a_{13} + a_{245} & l_{14} &= a_{14} + a_{235} \\ l_{15} &= a_{15} + a_{234} & l_{23} &= a_{23} + a_{145} & l_{24} &= a_{24} + a_{135} & l_{25} &= a_{25} + a_{134} \\ l_{34} &= a_{34} + a_{125} & l_{35} &= a_{35} + a_{124} & l_{45} &= a_{45} + a_{123} & l_1 &= a_1 + a_{2345} \end{aligned}$$

### 5.3.1 Significância dos efeitos e validação do modelo

A análise da significância dos efeitos e interacções nos moldes referidos anteriormente conduz ao gráfico de probabilidade semi-normal que se mostra na Figura 5.8.

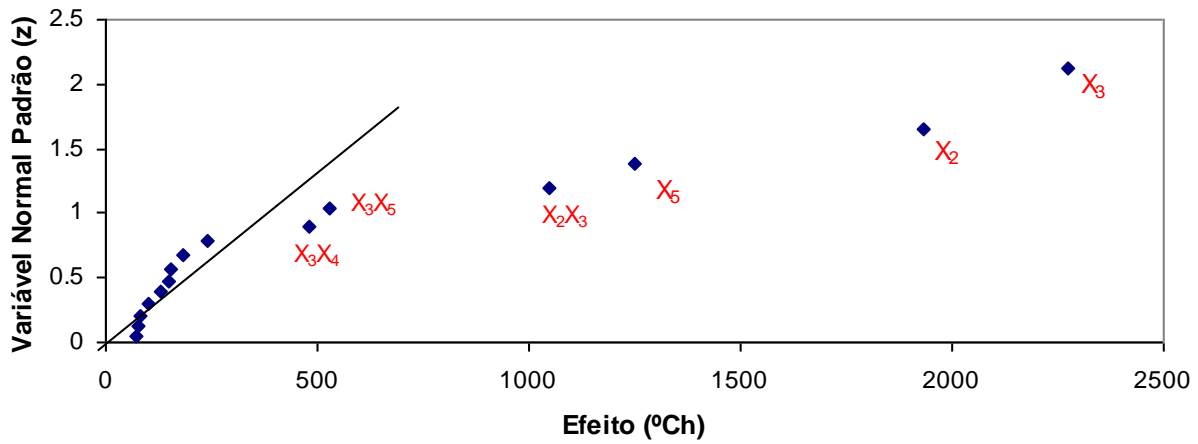


Figura 5.8 - Gráfico de Probabilidade Normal Positiva dos Efeitos e Interações referente à análise de Verão

Embora neste caso o alinhamento dos pontos não seja tão marcado como no caso da estação de aquecimento, o que não permite um traçado de recta perfeitamente alinhado com os pontos, fica no entanto bem visível a diferença de importância dos efeitos  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_5$  e  $X_2X_3$  em relação aos restantes. Já relativamente aos efeitos  $X_3X_4$  e  $X_3X_5$  não é tão imediato ajuizar sobre a sua significância. Sem a inclusão destes últimos termos, a equação simplificada para traduzir a resposta do modelo seria:

$$ODH_{25} = 4300.1 - 19327X_2 - 2274.3X_3 + 1250.6X_5 + 10499X_2X_3 \quad (5.6)$$

Admitindo que a equação completa do modelo (5.5), com todos os efeitos principais e interações, à semelhança da estação de aquecimento, reproduz fielmente o comportamento real do modelo, apresenta-se na Figura 5.4 a comparação entre os valores estimados por esta equação e pela equação simplificada (5.6), apenas com os termos mais significativos.

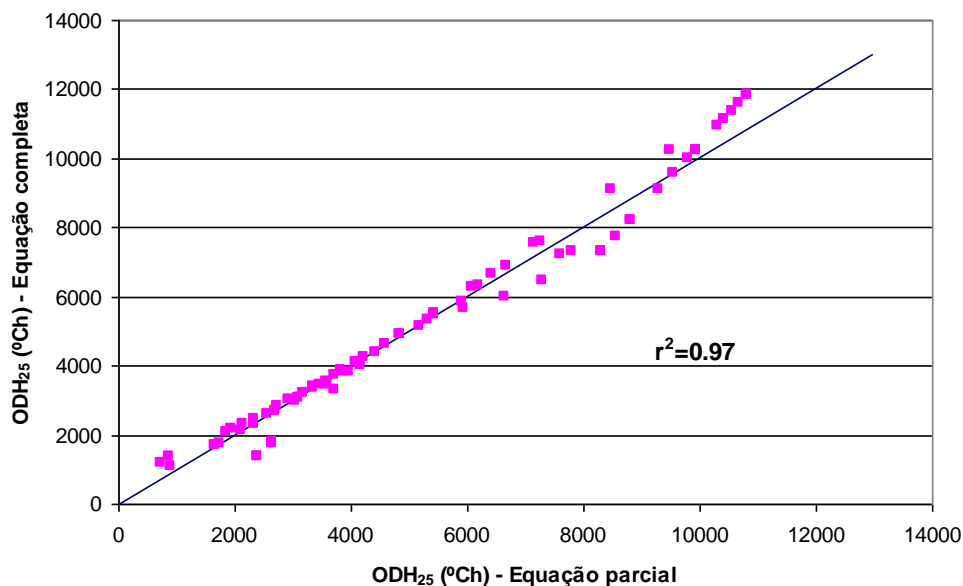


Figura 5.9 - Comparação entre os valores estimados pela equação simplificada (5.6) e a equação completa (5.5) integrando todos os efeitos principais e interações

Como se observa, a equação parcial, que só contém uma pequena parte dos termos da equação completa, constitui ainda assim uma boa estimativa da resposta do modelo, como indica o coeficiente de determinação calculado que se mostra na Figura 5.9.

### 5.3.2 Análise dos efeitos principais e interacções

Na Figura 5.10 apresentam-se na forma gráfica os efeitos principais dos factores no valor dos Graus-hora de desconforto por sobreaquecimento, que constitui a resposta do modelo para a estação de Verão.

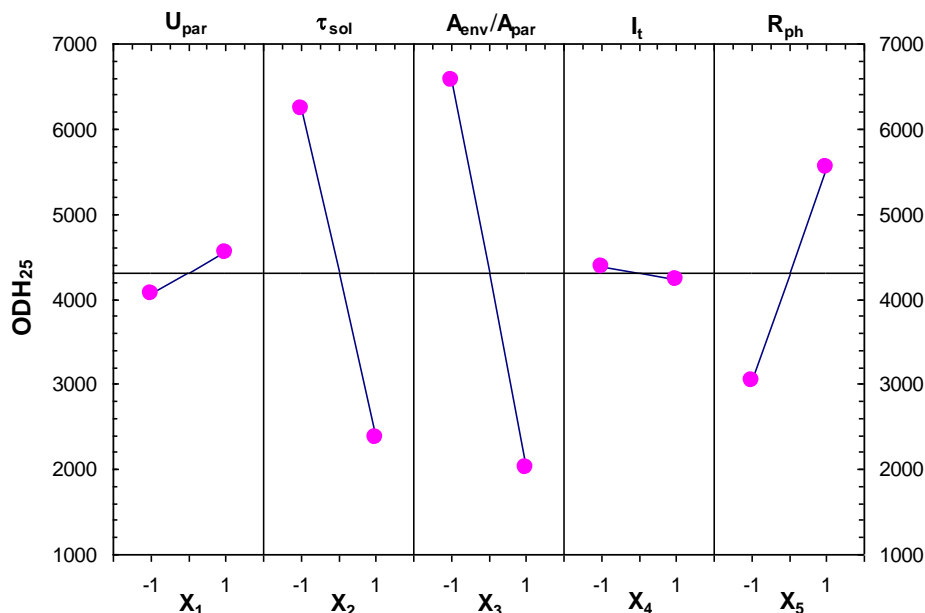


Figura 5.10 - Efeitos principais dos factores na estação de arrefecimento

O primeiro aspecto interessante a assinalar prende-se com o efeito da variação do coeficiente de transmissão térmica. Embora sem ser muito importante, é possível observar que a diminuição deste coeficiente, que era vantajosa na estação de aquecimento, conduz na estação quente a um maior número de situações de sobreaquecimento, facto aliás reportado em outros estudos [18]. De facto, se os ganhos solares forem elevados, o calor acumulado no interior da edificação encontra tanto maior resistência em dissipar-se para o exterior quanto maior for o isolamento térmico da envolvente. O resultado deste facto é uma maior duração dos períodos de sobreaquecimento e um maior afastamento, nesses períodos, das temperaturas interiores da temperatura limite do conforto.

Os factores com maiores efeitos no valor da resposta, e que são sensivelmente da mesma ordem de grandeza, são a transmissão solar dos envidraçados e a relação entre a área envidraçada e área fachada Sul. A uma variação positiva do nível destes factores (uma variação positiva do nível implica uma variação negativa dos valores reais dos factores) corresponde uma variação negativa da resposta, ou seja, um menor valor dos graus-hora de desconforto por sobreaquecimento, que é o comportamento desejável na estação de arrefecimento.

O aumento de inércia térmica é mais uma vez benéfico do ponto de vista do conforto e economia de energia, embora o seu impacto seja bastante inferior ao de outros factores.

Finalmente, em relação à taxa de renovação horária, a uma variação positiva de nível corresponde também uma variação positiva da resposta. Em termos reais significa que a redução da taxa de ventilação faz aumentar o número de graus-hora de desconforto por sobreaquecimento e portanto tem um efeito negativo para o conforto.

Nas Figuras 5.11 - 5.13 mostram-se as interações de factores assinaladas na Figura 5.8. Ao contrário da estação de aquecimento, na estação de arrefecimento a existência de interações é notória, embora com importâncias diferentes na resposta.

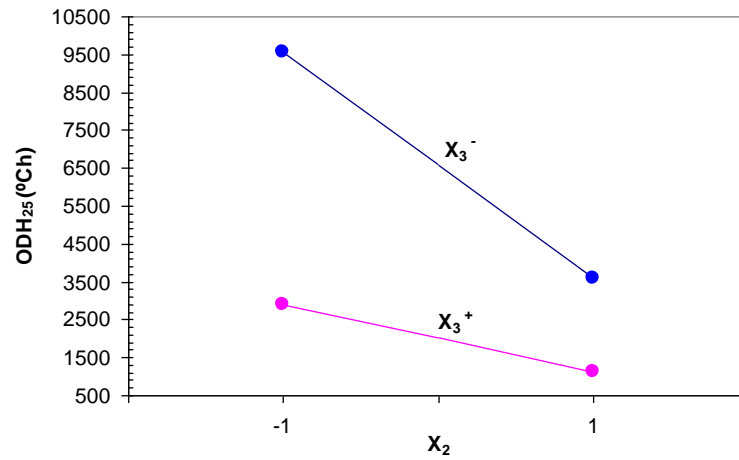


Figura 5.11 - Interação  $X_2X_3$  - Transmissão solar dos vãos a Sul/ Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul (estação de arrefecimento)

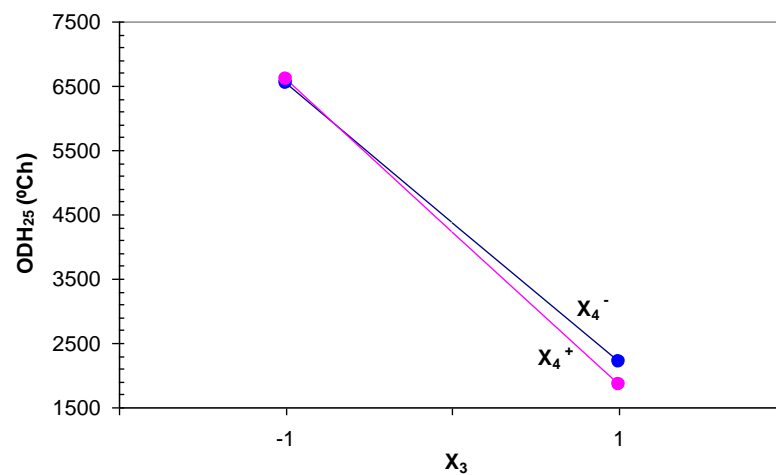


Figura 5.12 - Interação  $X_3X_4$  - Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul/Inércia térmica (estação de arrefecimento)

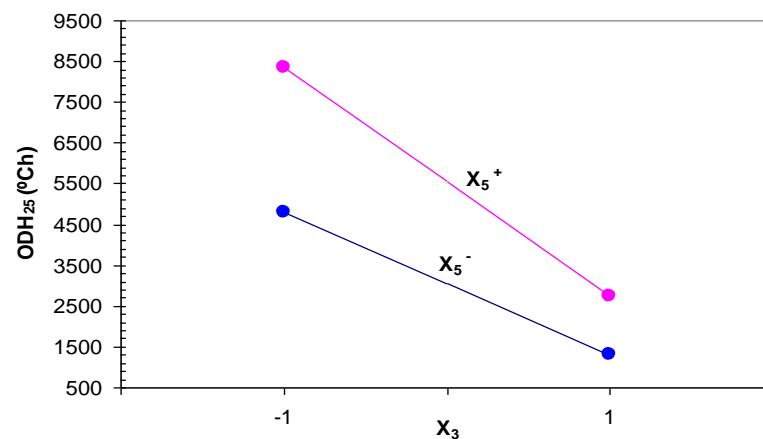


Figura 5.13 - Interação  $X_3X_5$  - Relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul/Taxa de ventilação (estação de arrefecimento)

Da análise das figuras conclui-se que a interacção mais forte é a que ocorre entre a transmitância dos vãos envidraçados a Sul ( $X_2$ ) e a relação entre a área envidraçada e a área de fachada também a Sul ( $X_3$ ), interacção designada por  $X_2X_3$ . Desta interacção  $X_2X_3$  verifica-se que o efeito de  $X_2$  é maior quando  $X_3$  está no nível baixo e menor quando  $X_3$  está no nível alto.

Existe também interacção entre a relação das áreas envidraçada e de fachada ( $X_3$ ) e a taxa de ventilação, embora o seu impacto nos graus-hora de desconforto por sobreaquecimento seja menor do que o da interacção anterior. Verifica-se que o efeito de diminuição de  $ODH_{25}$  pelo aumento de nível de  $X_3$  (diminuição da relação entre área envidraçada e área de fachada) é maior quando o factor taxa de ventilação ( $X_5$ ) está no nível alto, ou seja, quando o número de renovações horárias toma o valor mais elevado ( $1.0 \text{ h}^{-1}$ ).

Finalmente, a interacção da relação entre área envidraçada e área de fachada com a inércia térmica é a mais fraca das apresentadas. Ainda assim, o efeito da relação de áreas é um pouco mais elevado (maior declive) quando a inércia térmica se encontra no nível alto - inércia forte.

## Capítulo 6 - Conclusões e propostas de estudos futuros

---

### 6.1 – Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma análise de sensibilidade a alguns factores que influenciam o comportamento térmico dos edifícios. O método utilizado foi o do desenho factorial, que é uma técnica originalmente desenvolvida para experiências laboratoriais mas que nesta dissertação foi aplicada a simulações computacionais. Ao contrário de uma experiência, uma simulação computacional, ao basear-se num modelo de cálculo matemático, é por natureza determinística, ou seja, a repetição de uma simulação com os mesmos parâmetros de entrada produz sempre o mesmo resultado. Por esta razão, não são aplicáveis aos resultados das simulações computacionais, nos moldes em que aqui são discutidas (obtenção de resultados para parâmetros determinísticos), as análises estatísticas que são características dos desenhos factoriais com repetição de experiências. No entanto, a análise de um modelo por simulação computacional pode ser encarada como um estudo experimental sem repetição de ensaios e, nesta medida, pode recorrer a algumas técnicas particulares que existem para este tipo de experimentação, por exemplo, para avaliar a importância dos factores que influenciam a resposta do modelo ou, mais rigorosamente, a significância dos seus efeitos no valor desta resposta.

Os desenhos factoriais são aplicáveis a sistemas onde se pretenda estudar as relações causa-efeito entre um dado conjunto de variáveis (factores) e uma grandeza de interesse (variável dependente), que constitui a resposta do sistema. Para tal, são definidos os níveis de variação desses factores e efectuadas experiências com combinações desses níveis, ficando cada experiência e o seu resultado associados a uma dada combinação de níveis dos factores. No caso do desenho ou plano factorial envolver todas as combinações possíveis dos factores, designa-se por plano factorial completo, correspondendo ao caso em que se obtém a informação mais detalhada e rigorosa sobre o comportamento do sistema. No caso do desenho ou plano factorial envolver apenas algumas combinações de factores, então toma a designação de plano fraccionado, que tem a vantagem de exigir menos recursos por envolver menos experiências, mas tem a desvantagem de não permitir aceder a toda a informação sobre o comportamento do sistema.

No presente estudo, estas duas variantes do desenho factorial foram exemplificadas através de duas aplicações da análise de sensibilidade distintas: uma primeira aplicação para a estação de aquecimento, em que foram analisados, através de um plano factorial completo com  $2^5=32$  experiências, os efeitos de 5 factores, com dois níveis cada, sobre as necessidades úteis de aquecimento de uma fracção autónoma tomada como caso de estudo; uma segunda aplicação para a estação de arrefecimento, em que, para a mesma fracção autónoma, foram analisados também os efeitos de 5 factores com dois níveis cada, mas agora sobre o número de graus-hora de desconforto por sobreaquecimento e utilizando um plano fraccionado envolvendo  $2^{5-1} = 16$  experiências.

Os factores seleccionados para as análises de sensibilidade referidas foram: o coeficiente de transmissão térmica das partes opacas, a relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul, a inércia térmica da construção, a taxa de renovação horária da fracção autónoma, o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados e a transmitância solar dos vãos



orientados a Sul. Os quatro primeiros factores foram comuns a ambas as análises, de Inverno e Verão, enquanto o quinto e o sexto factor foram incluídos apenas nas análises de Inverno e Verão, respectivamente. De forma a melhor fazer realçar os efeitos na estação de aquecimento e arrefecimento, as análises foram realizadas para regiões geográficas com um clima representativo dessas estações, tendo-se escolhido Bragança para o primeiro caso e Lisboa para o segundo.

As análises de sensibilidade realizadas permitiram estimar os efeitos principais dos factores bem como as interacções que se estabelecem entre eles. A representação gráfica da distribuição de probabilidade semi-normal dos efeitos permitiu identificar, sob a forma visual, a significância dos efeitos principais e de interacção. Foram também deduzidas e validadas as equações matemáticas representativas dos comportamentos dos modelos relativos à estação de aquecimento e arrefecimento. Estas equações são importantes pois permitem obter respostas dos modelos para outros níveis dos factores compreendidos entre os definidos como “alto” e “baixo”.

Para a estação de aquecimento, o estudo realizado mostrou que a redução dos coeficientes de transmissão térmica da envolvente - partes opacas e envidraçadas - e da taxa de renovação do ar, por um lado, e o aumento da inércia térmica, por outro, têm um efeito benéfico em termos da economia de energia para conforto térmico, na medida em que contribuem para a redução das necessidades de energia útil de aquecimento. De entre estes, os factores com maior e menor impacto são a taxa de renovação do ar e a inércia térmica da construção, respectivamente.

Contrariamente, a diminuição da relação entre a área envidraçada e a de fachada a Sul, por implicar o decréscimo dos ganhos solares directos, provoca um aumento das necessidades energéticas para aquecimento.

Relativamente aos efeitos de interacção entre factores, eles têm pouco significado na estação de aquecimento. Um efeito de interacção existe quando o efeito de um factor depende do nível em que se encontra outro factor. Na estação de aquecimento, as interacções dos factores pouco interferem nos resultados da análise de sensibilidade.

Relativamente ao peso que os diferentes factores têm nas necessidades energéticas do caso de estudo, mostra-se na Figura 6.1 a variação percentual da resposta do modelo (Necessidades de energia útil  $N_u$ ) quando se faz variar cada factor entre o seu nível “médio” (0) e o seu nível “alto” (+1) com os restantes factores mantidos no seu nível “médio” (0).

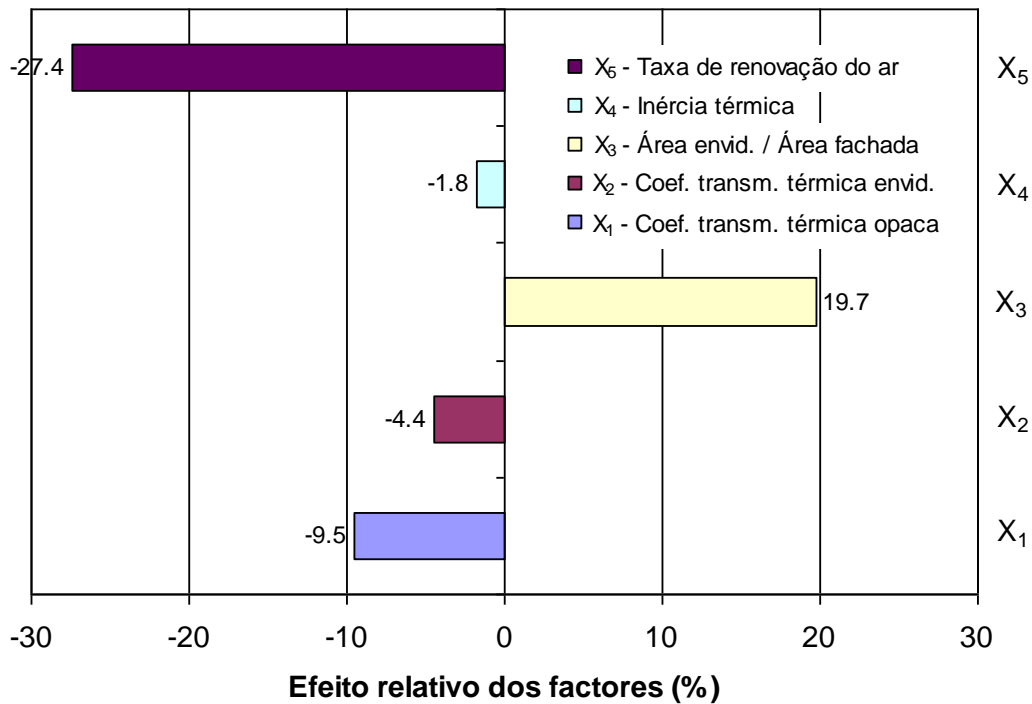


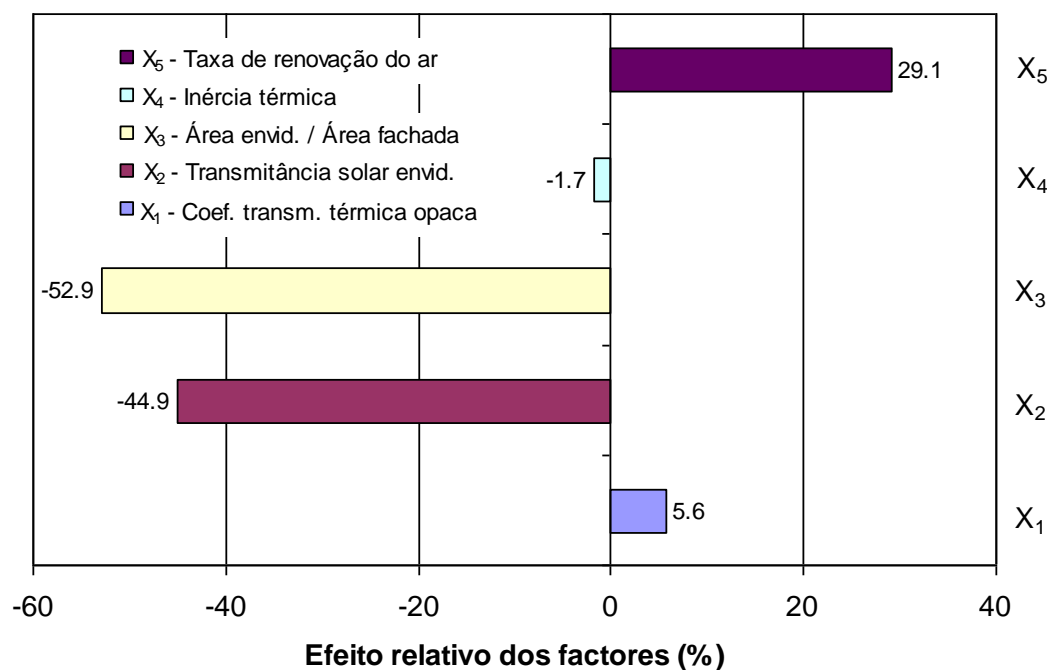
Figura 6.1 - Variação percentual das necessidades de energia (Nu)

É visível pela Figura 6.1 o grande peso da taxa de renovação do ar e da relação entre área envidraçada e área de fachada a Sul no valor das necessidades energéticas de aquecimento, sendo que a variação positiva destes factores produz efeitos contrários na resposta, no primeiro caso contribuindo para a redução das necessidades energéticas e no segundo caso para o seu acréscimo.

Em relação à estação de arrefecimento, o estudo realizado mostrou que a diminuição do coeficiente de transmissão térmica das partes opacas, ao contrário da estação de aquecimento, é prejudicial, pois conduz a desconforto térmico por sobreaquecimento da temperatura do ar interior. Na mesma linha de análise, também é prejudicial na estação de arrefecimento, mas com uma importância muito superior à do coeficiente de transmissão térmica, a diminuição da taxa de ventilação. Ao contrário, a diminuição da área de vãos a Sul, acompanhada da diminuição da transmitância solar dos envidraçados, é benéfica em termos de conforto de Verão. Também a inércia térmica da construção tem uma influência positiva no conforto térmico, embora sem o impacto dos dois anteriores factores.

Relativamente aos efeitos de interacção entre factores, são mais acentuados na estação de arrefecimento do que na de aquecimento, sendo de realçar o que ocorre entre a transmitância dos vãos envidraçados da fachada Sul (X<sub>2</sub>) e a relação entre a área desses vãos e a respectiva área de fachada. Verifica-se que o efeito de X<sub>2</sub> é maior quando X<sub>3</sub> está no nível baixo e menor quando X<sub>3</sub> está no nível alto.

Relativamente ao peso que os factores referidos têm nos graus-hora de desconforto por sobreaquecimento do caso de estudo, mostra-se na Figura 6.2 a variação percentual da resposta do modelo (graus-hora de desconforto ODH<sub>25</sub>) quando se faz variar cada factor entre o seu nível “médio” (0) e o seu nível “alto” (+1) com os restantes factores mantidos no seu nível “médio” (0).



**Figura 6.2 - Variação percentual dos graus-hora de desconforto por sobreaquecimento (ODH<sub>25</sub>)**

Pela Figura 6.1 verifica-se que a taxa de renovação do ar, a relação entre área envidraçada e área de fachada e a transmitância solar dos envidraçados têm um peso nos graus-hora de desconforto por sobreaquecimento incomparavelmente superior aos dos outros factores - coeficiente de transmissão térmica das partes opacas e inércia térmica da construção -, pelo que é essencialmente sobre eles que se deve intervir se o projecto térmico for condicionado pela estação de Verão.

Em resumo, é interessante verificar, e as Figuras 6.1 e 6.2 assim o evidenciam, que, com excepção da inércia térmica, os factores comuns à estação de aquecimento e arrefecimento apresentam efeitos contrários nas duas estações - o que é vantajoso para a estação de aquecimento é desfavorável para a estação de arrefecimento: na estação de aquecimento, do ponto de vista das necessidades energéticas para o conforto térmico, é favorável reduzir o coeficiente de transmissão térmica das partes opacas e a taxa de ventilação e aumentar a relação entre a área envidraçada e a área opaca da fachada Sul; por sua vez, na estação de arrefecimento, o número de graus-hora de desconforto diminui com o aumento do coeficiente de transmissão térmica e da taxa de ventilação e com a redução da relação entre a área envidraçada e a área de fachada a Sul. Este comportamento dos factores, que tem uma tendência diferente nas duas estações, abre caminho para o estudo da sua optimização se o objectivo for o de maximizar o desempenho térmico duma edificação do ponto de vista global, ou seja, ao longo de todo o ano, envolvendo simultaneamente as estações de Inverno e de Verão.

## 6.2 – Propostas de estudos futuros

Como propostas de estudos futuros refere-se a aplicação da metodologia do desenho factorial a outros casos de fracções habitacionais, com orientações e condições de exposição diferentes (orientação Este-Oeste e fracção sob cobertura, por exemplo), bem como em zonas climáticas variadas (Porto e Faro, por exemplo). A inclusão de mais factores no plano factorial (um coeficiente de transmissão térmica por elemento da envolvente, por exemplo) de forma a refinar as análises, pode também contribuir para um melhor conhecimento dos efeitos dos factores e respectivas interacções. Sugere-se também realizar o mesmo tipo de estudo mas com

funções objectivo diferentes, por exemplo, em lugar dos Graus-hora de desconforto por sobreaquecimento no Verão, utilizar como variável dependente as necessidades de energia útil de arrefecimento, ou substituir as necessidades de energia útil de aquecimento no Inverno por uma variável que expresse as condições de conforto térmico no modo de funcionamento livre do edifício. Finalmente, como foi referido atrás, constituiria um contributo importante para o projecto térmico de edifícios uma análise de sensibilidade que procurasse a combinação de níveis óptima dos factores do ponto de vista da maximização das condições de conforto interior sem fornecimento de energia (maximização do número de horas com temperatura entre 20°C e 25 °C, por exemplo), ou da minimização das necessidades de energia (de aquecimento e arrefecimento) para a manutenção de dadas condições de conforto térmico.

## Referências bibliográficas

---

- [1] Comissão Europeia (CE), Directiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios, Jornal Oficial da União Europeia (JOUE), L 153, Junho de 2010;
- [2] Eficiência Energética nos Edifícios, Direcção Geral de Energia - Ministério da Economia, Fevereiro de 2002;
- [3] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei N° 80/2006, Lisboa, 4 de Abril de 2006;
- [4] Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), Diário da Republica, Decreto-Lei N° 79/2006, Lisboa, 4 de Abril de 2006;
- [5] Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), Decreto-Lei nº78/2006, Lisboa, 4 de Abril de 2006;
- [6] Pires, L.; Silva, P.D.; Castro Gomes, J. P.; A importância do consumo energético dos edifícios na Europa: soluções propostas para a sua redução; Universidade da Beira Interior, Covilhã , 2007;
- [7] Direcção Geral de Energia e Geologia, Balanço Energético de 2005, 2005;
- [8] Barros, H. D. A.; Estudo e avaliação das componentes térmicas na utilização de energia em edifícios; Universidade da Madeira, Funchal, Novembro de 2009;
- [9] Comissão Europeia (CE), Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios, Jornal Oficial da Comunidade Europeia (JOCE), L 1, Janeiro de 2003;
- [10] Comissão Europeia (CE), Directiva 93/76/CEE do Conselho de 13 de Setembro de 1993 relativa à limitação das emissões de dióxido de carbono através do aumento da eficácia energética, Jornal Oficial da Comunidade Europeia (JOCE), L 237, Setembro de 1993;
- [11] Comissão Europeia (CE), Directiva 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de Abril de 2006 relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos e que revoga a Directiva 93/76/CEE do Conselho, Jornal Oficial da União Europeia (JOUE), L 114, Abril de 2006;
- [12] Certificação Energética e Ar Interior Edifícios; Eficiência Energética, O Sistema de Certificação Energética e o seu Impacto; Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; 8 de Fevereiro de 2010;
- [13] Certificação Energética e Ar Interior Edifícios; Seminário Fachadas Energeticamente Eficientes; Agência para a Energia; 15 de Novembro de 2011;
- [14] Hamby, D.M. 1994. "A Review of Techniques for Parameter Sensitivity Analysis of Environmental Models," Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 32, no. 2, pp. 135-154;
- [15] Lawson J., Erjavec J. - Modern Statistics for Engineering and Quality Improvement, 1st ed., Duxbury Thompson Learning. 2001;

[16] Fisher, R.A., The Design of Experiments. New York: Hafner; 1935;

[17] Lawrence Berkeley National Laboratory - EnergyPlus Engineering Document: The Reference to EnergyPlus Calculations, 2010;

[18] Chvatal K., Corvacho, H. - The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption, Journal of Building Performance Simulation, Vol, 2, No. 4, 2009.

## Sites consultados

---

[http://www.apfac.pt/eventos/seminario\\_fachadas\\_energeticamente\\_eficientes/2%20ADENE%20%20Seminario%20ETICS.pdf](http://www.apfac.pt/eventos/seminario_fachadas_energeticamente_eficientes/2%20ADENE%20%20Seminario%20ETICS.pdf)

[http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier\\_artigo/eduardo20malsonaro14871638444d22ff978935a.pdf](http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/eduardo20malsonaro14871638444d22ff978935a.pdf)

[http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/apresentacoes/Paulo\\_Santos\\_Energia2020.pdf](http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/apresentacoes/Paulo_Santos_Energia2020.pdf)

[http://www.apfac.pt/eventos/seminario\\_fachadas\\_energeticamente\\_eficientes/2%20ADENE%20%20Seminario%20ETICS.pdf](http://www.apfac.pt/eventos/seminario_fachadas_energeticamente_eficientes/2%20ADENE%20%20Seminario%20ETICS.pdf)

<http://lge.deec.uc.pt/ensino/geei/Docs/ProgramaEffEdificios.pdf>

<http://www.adene.pt/pt-pt/Publicacoes/Paginas/welcome.aspx>

<http://construcaosustentavel.pt/index.php?/O-Livro-%7C%7C-Construcao-Sustentavel/Certificacao/Certificacao-Energetica-em-Portugal>

<http://www.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SCE/Documentacao/Maisrecentes/Documents/ConceitosBioclim%C3%A1ticos.pdf>

[http://www.certigreen.pt/ce\\_certificado.aspx](http://www.certigreen.pt/ce_certificado.aspx)