

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Integração do método SLR na norma ISO 13790:
o caso das estufas

Catarina Miguel Correia Sabino

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Integração do método SLR na norma ISO 13790: o caso das estufas

Catarina Miguel Correia Sabino

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de
Susana Maria Lasbarreres Camelo (LNEG)
Marta João Nunes Oliveira Panão (FCUL)

2012

Abstract

The building sector is responsible for about one third of the European final energy consumption. Over the last few years its energy performance has been promoted, mainly through the 2010/31/EU directive. According to this directive, the energy performance of buildings determination should include passive systems and be based on current European standards, as ISO 13790, which supports the heating and cooling energy needs calculations.

In this work, a method to account for the solar gains of sunspaces, in the heating energy needs (HEN) calculations is analyzed. Despite the methodology presented for these systems in the referred standard, there are simpler methods, such as SLR method, which is based on empirical correlations. Therefore SLR correlations are determined for sunspaces for the Portuguese climate. A proposal to integrate the SLR method in the standard, to easily account the gains of sunspaces combined with direct gain systems, is also analyzed. To achieve this goal, the SLR method, initially defined for a monthly time basis, is generalized for an annual time basis. A simplified methodology for determining the terms used in the method is proposed, based on the methodology presented in the standard.

Overall 120 cases of sunspaces with different geometric and constructive characteristics were analyzed. The monthly determination of HEN, through the SLR correlations determined in this work, presents high errors. However, its annual determination, through the monthly method, is viable, with errors below 30 % for most cases. The generalization of the SLR method for an annual time basis is also viable. The annual HEN determined through the integration of SLR method in the standard is only viable for sunspaces with lower projected area.

Keywords: sunspaces, SLR method, ISO 13790

Resumo

Os edifícios representam cerca de um terço do consumo de energia final na Europa, tendo sido, nos últimos anos, promovida a melhoria do seu desempenho energético, nomeadamente através da diretiva 2010/31/EU. Segundo esta diretiva, o cálculo do desempenho energético dos edifícios deve contabilizar os sistemas passivos, devendo basear-se nas normas europeias em vigor, como a ISO 13790, que suporta o cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento.

Neste trabalho, analisa-se a contabilização dos ganhos provenientes de estufas no cálculo das necessidades de energia para aquecimento (NEPA). Apesar de, na referida norma, ser apresentada uma metodologia para esta contabilização, existem métodos mais simples, como o método SLR, que se baseia em correlações empíricas. Assim, neste trabalho, determinam-se correlações SLR para estufas, aplicadas ao clima de Portugal. Além disso, analisa-se também uma proposta de integração do método SLR na norma, por forma a contabilizarem-se, de forma simples, os ganhos provenientes de sistemas combinados de estufas e ganhos diretos. Para tal, generaliza-se a aplicação do método SLR, definido inicialmente para uma base temporal mensal, a uma base temporal anual, propondo-se assim uma metodologia de cálculo simplificada para a determinação dos termos utilizados no método SLR, tendo por base a metodologia apresentada na norma.

Analisaram-se 120 casos de estufas com diferentes características geométricas e construtivas. A determinação mensal das NEPA, através das correlações SLR determinadas neste trabalho, apresenta erros elevados. Contudo, a sua determinação anual, através do método mensal, é mais viável, com erros inferiores a 30 % na maioria dos casos. A generalização do método SLR para uma base de tempo anual também é viável. A determinação anual das NEPA através da integração do método SLR na norma, apenas é viável para as estufas com menor área projetada na fachada do edifício.

Palavras-chave: estufas, método SLR, ISO 13790

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e metodologia	2
1.3	Estrutura	2
1.4	Motivação e contribuição original	3
2	Sistemas solares passivos: estufas	4
2.1	Funcionamento	5
2.1.1	Tipo de estufas.....	5
2.1.2	Estratégias de controlo de perdas e ganhos indesejáveis.....	6
2.2	Trabalhos realizados anteriormente	7
3	Necessidades de energia para aquecimento	9
3.1	Norma ISO 13790.....	9
3.1.1	Método mensal quase-estacionário	9
3.1.2	Método dinâmico detalhado: simulação térmica dinâmica	12
3.2	Métodos alternativos: correlações.....	13
3.2.1	Método SLR	13
3.3	Integração do método SLR na norma ISO 13790	15
4	Determinação das necessidades de energia para aquecimento.....	17
4.1	Método mensal da norma ISO 13790	17
4.2	Método SLR – mensal	18
4.3	Método SLR – anual.....	20
4.4	Método integrado	20
4.4.1	Determinação de η e Q_{ht} (norma ISO 13790).....	20
4.4.2	Determinação de SHF e Q_{ref} (método SLR).....	20
5	Casos analisados.....	21
5.1	Descrição.....	21
5.1.1	Modelos.....	21

5.1.2	Soluções construtivas.....	22
5.1.3	Ganhos internos, climatização e ventilação	23
5.2	Simulações efetuadas.....	23
5.2.1	Determinação de <i>SHF</i> e <i>SLR</i> (método SLR).....	24
5.2.2	Sumário das simulações efetuadas	24
6	Apresentação e discussão de resultados.....	25
6.1	Coeficientes de correlação	25
6.1.1	Variação dos coeficientes de correlação	26
6.2	Necessidades de energia para aquecimento	28
6.2.1	Método mensal	28
6.2.2	Método anual	35
6.2.3	Método integrado.....	38
6.3	Influência da estufa no comportamento térmico do edifício	41
7	Conclusões e trabalho futuro	43
7.1	Conclusões	43
7.2	Trabalho futuro.....	44
8	Referências bibliográficas	45
	Anexos	49
	Anexo A – Formulação para o cálculo de Q_{sd} e Q_{si} (norma ISO 13790).....	49
	Anexo B – Formulação alternativa para o cálculo de Q_{nd} : norma ISO 13790.....	50
	Anexo C – Formulação para a integração dos dois métodos de cálculo	51
	Anexo D – Formulação para o cálculo dos termos Q_{lna} , Q_{pe} e Q_{pt}	52
	Anexo E – Formulação para o cálculo da radiação incidente numa superfície	53
	Anexo F – Características geométricas das estufas	54
	Anexo G – Soluções construtivas	55
	Anexo H – Coeficientes de correlação e r^2	56
	Anexo I – Valores absolutos dos erros anuais cometidos pela aplicação mensal do método SLR	58
	Anexo J – Valores absolutos dos erros anuais cometidos pela aplicação anual do método SLR	60
	Anexo K – Valores absolutos dos erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado	62

Anexo L – Erros cometidos pela aplicação do método SLR a várias orientações.....	63
Anexo M – Poupança de energia devida à estufa	64

Índice de tabelas

Tabela 1 – Modelos geométricos analisados	21
Tabela 2 – Planta dos modelos geométricos considerados	21
Tabela 3 – Variações construtivas dos modelos das estufas e nomes identificativos.....	22
Tabela 4 – Características das simulações efetuadas	23
Tabela 5 – Sumário das simulações efetuadas e respetivos resultados	24
Tabela 6 – Coeficientes b_1 e b_2 e r^2 : estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro simples (casos do tipo O_VS)	26
Tabela 7 – Necessidades mensais de energia para aquecimento: estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro duplo, analisadas para o clima de Bragança (casos do tipo O_VD)	29
Tabela 8 – Necessidades de energia para aquecimento anuais, determinadas através da aplicação mensal do método SLR, das estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro simples, analisadas para o clima do Porto (casos do tipo O_VS).....	31
Tabela 9 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30).....	32
Tabela 10 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30).....	32
Tabela 11 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas cuja fração de área projetada na fachada é 100 % (casos AB_100)	33
Tabela 12 – Cálculo de <i>SHF</i> para a aplicação do método SLR a várias orientações.....	34
Tabela 13 – Necessidades de energia para aquecimento para várias orientações: estufa anexa cuja fração de área projetada na fachada é 70 % e o ângulo de inclinação do seu vidro superior é 30° (caso A_70_30°) (kWh).....	34
Tabela 14 – Média do valor absoluto dos erros cometidos pela aplicação do método SLR a várias orientações	34
Tabela 15 – Necessidades de energia para aquecimento anuais determinadas pela aplicação anual do método SLR: estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro duplo, analisadas para o clima de Bragança (casos do tipo O_VD).....	35
Tabela 16 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30).....	36
Tabela 17 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30).....	37
Tabela 18 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas cuja fração de área projetada na fachada é 100 % (casos AB_100).....	37

Tabela 19 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)	39
Tabela 20 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30).....	39
Tabela 21 – Parâmetros γ , η , <i>SHF</i> e <i>SLR</i>	41
Tabela 22 – Necessidades de energia para aquecimento e respetivo erro	41
Tabela 23 – Poupança de energia devida à existência de uma estufa (%).....	41

Índice de figuras

Figura 1 – Exemplos de estufas	4
Figura 2 – Tipos de estufas: (a) tipo A e (b) tipo B	5
Figura 3 – Identificação das principais variáveis geométricas de uma estufa	6
Figura 4 – Exemplo de curvas de η_{gn} em função de γ para vários níveis de inércia.....	11
Figura 5 – Exemplo de uma curva de <i>SHF</i> em função de <i>SLR</i> para uma estufa	14
Figura 6 – Casos analisados	22
Figura 7 – Ajuste matemático realizado a uma estufa anexa com área projetada na fachada é 70 % e cujo ângulo de inclinação do seu vidro superior é 30° e cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituída por vidro simples (estufa A_70_30°, do tipo O_VS).....	25
Figura 8 – Curvas de correlação <i>SLR</i> obtidas para todos os casos	25
Figura 9 – Variação do coeficiente b_1 com θ_v : estufas integradas cuja fração da área projetada na fachada do edifício é 30 % (casos do tipo B_30).....	27
Figura 10 – Variação do coeficiente b_2 com θ_v : estufas anexas cuja fração da área projetada na fachada do edifício é 70 % (casos do tipo A_70).....	27
Figura 11 – Fator corretivo do termo Q_{abs}	28
Figura 12 – Fatores corretivo do termo Q_{abs} para todos os casos analisados.....	28
Figura 13 – Média dos erros mensais, cometidos na determinação das necessidades de energia para aquecimento através da aplicação mensal do método <i>SLR</i> (Bragança)	30
Figura 14 – Erro anual cometido na determinação das necessidades anuais de energia para aquecimento através da aplicação mensal do método <i>SLR</i> (Bragança)	30
Figura 15 – Erro anual cometido na determinação das necessidades anuais de energia para aquecimento através da aplicação anual do método <i>SLR</i> (Bragança).....	36
Figura 16 – Casos (sem estufa) analisados para a avaliação do erro do método mensal da norma: (a) caso 1; (b) caso 2	38
Figura 17 – Caso exemplo: edifício com um sistema combinado de estufa e ganhos diretos	40
Figura 18 – Influência da estufa na temperatura interior do edifício, comparativamente com uma situação (a) sem ganhos solares; (b) apenas com ganhos diretos.....	42

Abreviaturas

- EPBD: diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (*energy performance of buildings directive*), 1
- Estufas do tipo A: estufas anexas ao edifício, 6
- Estufas do tipo B: estufas integradas no edifício, 6
- GEE: gases com efeito de estufa, 1
- NEPA: necessidades de energia para aquecimento, 3
- nZEB: edifício com necessidades quase nulas de energia (*nearly zero energy buildings*), 1
- O_VD: estufa constituída por uma parede de contacto opaca e vidros duplos, 23
- O_VS: estufa constituída por uma parede de contacto opaca e vidros simples, 23
- RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, 18
- T_VD: estufa constituída por uma parede de contacto transparente e vidros duplos, 23
- T_VS: estufa constituída por uma parede de contacto transparente e vidros simples, 23
- X_YY_ZZ°: estufa do tipo X, cuja razão entre a área projetada da estufa e a área da fachada é YY % e cuja inclinação do vidro superior é ZZ°, 22

Nomenclatura

- C_p Calor específico do ar (J/kg/°C)
 g_{\perp} Fator solar do vidro, incidente na perpendicular (adim.)
RPH Número de renovações horárias do ar interior (h⁻¹)
 U_g Coeficiente de transmissão térmica global (W/m²/°C)
 ρ Massa volúmica do ar (kg/m³)

Norma ISO 13790:

- a Parâmetro numérico que reflete a inércia do edifício (adim.)
 b_{tr} Coeficiente de redução de perdas da estufa (adim.)
 $Q_{ab,s}$ Ganhos de calor absorvidos pelas superfícies da estufa (kWh)
 $Q_{gn,ISO}$ Ganhos de calor do edifício (kWh)
 $Q_{ht,ISO}$ Calor transferido entre o edifício e o exterior (kWh)
 Q_{int} Ganhos internos do edifício (kWh)
 $Q_{nd,ISO}$ Necessidades de energia para aquecimento do edifício (kWh)
 Q_{sb} Ganhos solares provenientes de elementos opacos e envidraçados que façam parte do edifício (kWh)
 Q_{sd} Ganhos diretos do edifício através da superfície de contacto entre o edifício e a estufa (kWh)
 $Q_{sd,p}$ Ganhos diretos provenientes de elementos opacos da estufa (kWh)
 $Q_{sd,w}$ Ganhos diretos provenientes de elementos transparentes da estufa (kWh)
 Q_{si} Ganhos indiretos provenientes da estufa (kWh)
 Q_{sol} Ganhos solares do edifício (kWh)
 Q_{ss} Ganhos solares provenientes de estufas (kWh)
 Q_{tr} Calor transferido por transmissão (kWh)
 Q_{ve} Calor transferido por ventilação (kWh)
 γ Heat-balance ratio: razão entre o termo de ganhos de calor do edifício e o termo de transferência de calor entre o edifício e o exterior (adim.)
 η_{gn} Fator de utilização dos ganhos térmicos (adim.)
 η_{ls} Fator de utilização das perdas térmicas (adim.)

Método SLR/ Método integrado:

- A_c Área de captação do sistema (m²)
 a_p Fração de área projetada na fachada do edifício (%)
 A_p/A_f Razão entre a área projetada da estufa e a área da fachada do edifício (%)
 b_1, b_2 e b_3 Coeficientes de correlação (adim.)
 BLC *Building load coefficient*: coeficiente global de perdas do edifício (kWh/°C/dia)
 DD Número de graus-dias de aquecimento mensais (°C·dia)
 G_j Radiação incidente numa superfície com orientação j (kWh/m²/mês)

H_{tot}	Condutância total do edifício excluindo as superfícies de contacto entre o edifício e a estufa ($W/°C$)
LCR	<i>Load collector ratio</i> : razão entre BLC e A_c ($kWh/m^2/°C/dia$)
LCR_s	LCR da estufa ($kWh/m^2/°C/dia$)
$Q_{abs,SLR}$	Calor absorvido pela estufa (kWh)
$Q_{gn,SLR}$	Ganhos solares mensais do edifício (kWh)
$Q_{hts,SLR}$	Calor transferido entre a estufa e o exterior (kWh)
$Q_{nd,SLR}$	Necessidades de energia para aquecimento do edifício (kWh)
$Q_{ref,SLR}$	Valores de referência do calor transferido entre o edifício e o exterior (kWh)
SHF	Solar heating fraction (adim.)
SLR	Solar load ratio (adim.)
θ_v	Inclinação do vidro superior da estufa ($°$)

RCCTE:

A	Área medida pelo interior (m^2)
A_{pav}	Área útil de pavimento (m^2)
A_s	Área coletora de radiação solar efetiva (m^2)
$A_{s,nj}$	Área coletora de radiação solar efetiva da superfície n com orientação j (m^2)
$A_{v\tilde{a}o}$	Área total do vão envidraçado (m^2)
DD_a	Número anual de graus-dia de aquecimento ($°C \cdot dia$)
F_f	Fator de sombreamento do envidraçado por elementos verticais adjacentes ao mesmo (adim.)
F_g	Fração envidraçada (adim.)
F_h	Fator de sombreamento do horizonte por obstruções longínquas exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício (adim.)
F_o	Fator de sombreamento do envidraçado por elementos horizontais sobrepostos ao mesmo (adim.)
F_s	Fator de obstrução (adim.)
F_w	Fator de correção devido à variação das propriedades dos vidros com o ângulo de incidência da radiação solar (adim.)
G_{sul}	Valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul, de área unitária, durante a estação de aquecimento ($kWh/m^2/mês$)
M	Duração média da estação convencional de aquecimento (mês)
P_d	Pé-direito médio do edifício (m)
Q_{ext}	Perdas de calor pelos elementos do edifício em contacto com o exterior (kWh)
Q_i	Ganhos internos do edifício (kWh)
q_i	Ganhos internos médios do edifício (W/m^2)
Q_{tna}	Perdas de calor dos elementos do edifício em contacto com zonas térmicas não aquecidas (kWh)
Q_{pe}	Perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo (kWh)
Q_{pt}	Perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício (kWh)
Q_s	Ganhos solares do edifício (kWh)
Q_t	Perdas de calor por transmissão através da envolvente do edifício (kWh)

- Q_v Perdas de calor resultantes da renovação de ar (kWh)
 η_{sist} Rendimento do sistema de recuperação de calor (adim.)
 X_j Fator de orientação (adim.)

Simulações térmicas dinâmicas:

- Q_C Necessidades de energia para arrefecimento do edifício determinadas por simulação térmica dinâmica (kWh)
 \dot{Q}_{conv} Calor transferido por convecção por todas as superfícies (W)
 $\dot{Q}_{conv,int}$ Cargas internas convectivas (W)
 Q_H Necessidades de energia para aquecimento do edifício determinadas por simulação térmica dinâmica (kWh)
 \dot{Q}_{inf} Calor transferido devido à infiltração de ar exterior (W)
 \dot{Q}_{mix} Calor transferido devido à mistura de ar do edifício com outras zonas térmicas (W)
 \dot{Q}_{sist} Calor transferido pelos sistemas de climatização (W)

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Os temas energéticos são atualmente merecedores de grande atenção, quer por parte da comunidade científica quer não-científica. Na base deste interesse atual e constante estão: 1) o facto dos combustíveis fósseis serem recursos finitos, 2) a necessidade de segurança no fornecimento de energia, ou seja, a não dependência exclusiva dos combustíveis fósseis e 3) as alterações climáticas (MacKay, 2007).

Segundo um esmagador consenso científico, a causa das alterações climáticas reside nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) resultantes das atividades humanas (European Union, 2012b). O aumento das temperaturas, a fusão dos glaciares, a multiplicação de episódios de seca e de inundações são alguns dos sinais que evidenciam que o processo está em curso (European Union, 2012c).

Uma das contribuições humanas para o aumento dos GEE é o consumo de energia elétrica, sendo que o setor dos edifícios (residenciais) é responsável por cerca de 30 % do consumo total de energia final na Europa (European Union, 2012d). Assim, reduzir as emissões de GEE neste setor apresenta-se como uma prioridade, com grande potencial para uma redução efetiva das emissões de GEE.

Com o propósito da redução das emissões de GEE, os Estados-Membros da União Europeia têm vindo a desenvolver um conjunto de medidas com vista a promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios (ADENE, 2012). Foi neste contexto que, em 2002, surgiu a diretiva 2002/91/CE, relativa ao desempenho energético dos edifícios, conhecida simplesmente por EPBD (*energy performance of buildings directive*). Em 2010, esta diretiva foi reformulada pela diretiva 2010/31/EU. Uma vez que a Europa tem como objetivos reduzir, até 2020, o consumo de energia em 20 % e de aumentar, na mesma proporção, o recurso a fontes de energia renováveis (European Union, 2012e), esta diretiva assume-se como uma ferramenta essencial para se alcançarem esses objetivos (European Union, 2012a).

Um dos novos conceitos da diretiva 2010/31/UE é o de edifício com necessidades quase nulas de energia ou *nearly zero energy buildings* (nZEB). Um nZEB é um edifício com um desempenho energético muito elevado, no qual as necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas devem ser cobertas maioritariamente por energia proveniente de fontes de energia renováveis. A partir de 31 de dezembro de 2020, todos os edifícios novos deverão ser deste tipo (European Commission, 2010).

O desempenho energético de um edifício define-se como a energia, calculada ou medida, necessária para satisfazer a procura de energia associada à utilização típica do edifício, que inclui, nomeadamente, a energia utilizada para aquecimento, arrefecimento, ventilação, preparação de água quente e iluminação (European Commission, 2010). Os sistemas de aquecimento e arrefecimento passivo constituem então um meio eficaz para a redução do consumo de energia dos edifícios e, conseqüentemente, para a melhoria do seu desempenho energético, uma vez que reduzem as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Está previsto na diretiva 2010/31/UE, que os sistemas de aquecimento e arrefecimento passivos sejam incluídos no cálculo do desempenho energético dos edifícios. Além disso, segundo a diretiva, a metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios deverá ter em conta as normas europeias em vigor. Uma das normas mais aceites e utilizadas para a determinação das necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios é a norma ISO 13790, relativa ao desempenho energético dos edifícios (Dijk, 2009).

O anexo E da norma ISO 13790 define um método de cálculo dos ganhos solares provenientes de sistemas de aquecimento passivo, tais como estufas. No entanto, o método apresentado é um método exaustivo. Existem outros métodos de cálculo para contabilizar a contribuição dos sistemas de aquecimento passivo.

Quando os recursos computacionais eram escassos, os métodos simplificados eram bastante utilizados para calcular a contribuição solar dos sistemas passivos. Esses métodos, hoje em dia, constituem uma alternativa simples e eficaz para o cálculo da contribuição da energia proveniente dos sistemas passivos. Alguns desses métodos são baseados em correlações empíricas pré-determinadas, e podem tornar-se bastante mais simples para os profissionais da área dos edifícios. Um desses métodos é conhecido como método SLR (*solar load ratio*).

Segundo a norma ISO 13790, para os casos de edifícios existentes que já têm estufas implementadas, caso a aquisição dos dados necessários para o cálculo não seja economicamente viável, pode ser utilizado um método de cálculo simplificado definido a nível nacional para a sua contabilização. O método SLR pode pois ser utilizado nessas situações.

1.2 Objetivos e metodologia

Existem essencialmente três aspetos distintos que podem ser abordados nos estudos relacionados com estufas, e com todos os sistemas passivos em geral: 1) os princípios de projeto, ou seja, os princípios que fazem com que a estrutura da estufa seja efetivamente capaz de produzir calor; 2) os princípios operacionais, ou seja, os princípios que fazem com que se tire o maior partido da estrutura da estufa; e 3) a análise do desempenho da estufa, ou seja, a estimativa da contribuição dos ganhos solares provenientes da estufa relativamente aos ganhos solares do edifício (Leenknecht & Saelens, 2010). Este trabalho centra-se exclusivamente no último ponto: a análise do desempenho energético da estufa.

Este estudo visa encontrar correlações empíricas para estufas, com base no método SLR, adaptadas ao clima de Portugal. Apesar do método SLR ser um método mensal, pretende-se, também, testar a sua aplicação numa base de tempo anual, discutindo a sua integração na regulamentação térmica de edifícios. Para tal, é analisada uma proposta recentemente apresentada para a integração do método SLR na norma ISO 13790. Assim, neste trabalho, são também analisados vários sistemas combinados de estufas e ganhos diretos, propondo-se um método de cálculo simplificado dos termos utilizados no método SLR, com base na metodologia apresentada na norma ISO 13790, por forma que os dois métodos possam ser integrados.

Um outro objetivo deste trabalho relaciona-se com as expressões de correlação. As expressões de correlação já conhecidas para estufas aplicam-se a estufas cuja superfície de contacto entre o edifício e a estufa seja um elemento de massa, opaco, não sendo conhecidas as correlações para uma superfície envidraçada. Neste sentido, pretende-se também estudar a validade das correlações, já conhecidas, para estufas com esse tipo de superfície. Adicionalmente, este trabalho pretende estudar a aplicação do método SLR para estufas com orientações diferentes de sul (SE/SO, E/O, NE/NO e N).

Como objetivo adicional, pretende-se também comparar a poupança de energia anual para aquecimento do edifício proporcionada pelos diversos tipos de estufas, incluindo as estufas com orientações diferentes de sul.

1.3 Estrutura

O presente capítulo faz uma introdução ao trabalho. É feito o enquadramento do mesmo e são referidos os seus objetivos e a sua contribuição original.

O capítulo 2 é dedicado ao sistema solar passivo em análise neste trabalho, a estufa. É feita uma breve descrição do sistema, do seu princípio de funcionamento e das principais variáveis que influenciam o seu comportamento térmico. Neste capítulo é também feita uma revisão bibliográfica dos trabalhos anteriormente realizados acerca deste tipo de sistema.

No capítulo 3 são apresentados três métodos de cálculo das necessidades de energia para aquecimento (NEPA): o método mensal da norma ISO 13790, o método SLR e uma proposta de integração destes dois métodos recentemente publicada.

Os métodos de cálculo utilizados neste trabalho, para a determinação das NEPA, são apresentados no capítulo 4.

No capítulo 5 são descritos os casos analisados neste trabalho, que foram utilizados para a determinação das correlações. São descritos os modelos de estufas analisadas e as simulações térmicas dinâmicas efetuadas para a determinação dos termos necessários para o cálculo das NEPA.

No capítulo 0 é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos. São apresentados os coeficientes de correlação obtidos e os erros cometidos pela aplicação dos diversos métodos. Neste capítulo, é também apresentado um exemplo de aplicação do método que integra o método SLR na norma ISO 13790.

As principais conclusões deste trabalho são realçadas no capítulo 0.

Por último, encontram-se os anexos A a M.

1.4 Motivação e contribuição original

Este trabalho contribui para a contabilização simplificada dos ganhos solares, provenientes de estufas, no cálculo das necessidades de energia de um edifício. Assim, são apresentadas correlações SLR para estufas, aplicadas ao clima de Portugal, que podem ser utilizadas para a determinação simples das NEPA de edifícios que tenham implementado este tipo de sistemas.

Relativamente ao método que integra o método SLR na norma ISO 13790, para a contabilização dos ganhos provenientes de sistemas passivos combinados, o método proposto neste trabalho, além de utilizar a metodologia simples do método SLR, proporciona a utilização da metodologia apresentada na norma ISO 13790, uma das metodologias mais utilizadas e aceites para a determinação das NEPA.

Embora os edifícios devam ser construídos com uma orientação adequada, por vezes, tal não se verifica, nomeadamente em prédios de zonas urbanas. Nestes prédios, as varandas e/ou marquises envidraçadas podem ser consideradas estufas. Neste sentido, neste trabalho, são propostos métodos para a aplicação do método SLR a orientações diferentes de sul, que poderão ser utilizadas, por exemplo, para a determinação simples das NEPA de edifícios existentes, com estufas implementadas, que não tenham sido projetados com a orientação mais adequada.

2 Sistemas solares passivos: estufas

Um edifício passivo é um edifício que consegue assegurar condições de conforto térmico, quer no verão, quer no inverno, utilizando uma quantidade mínima de combustíveis fósseis para a sua climatização (e iluminação). O seu princípio básico de funcionamento consiste na minimização das perdas térmicas no inverno e dos ganhos no verão (Gonçalves & Brotas, 2007a). Para que isso seja alcançado utilizam-se sistemas passivos, ou seja, sistemas que não necessitam de meios mecânicos artificiais para funcionar, ou caso utilizem, o consumo a eles associado é reduzido. Um edifício passivo puro não necessita de sistemas ativos (mecânicos e elétricos). No entanto, para o correto funcionamento dos sistemas passivos, por vezes é necessária a incorporação de alguns sistemas ativos, nomeadamente para funções de controlo (Gonçalves & Brotas, 2007a).

Os sistemas passivos podem ser projetados para aquecimento ou para arrefecimento e dividem-se em sistemas passivos de ganho direto, ganho indireto, ou de ganho isolado. Exemplos de sistemas de ganho direto são as janelas, onde a captação solar é feita no espaço útil, entrando a radiação solar diretamente no edifício através destas. As paredes de armazenamento, constituídas por materiais de elevada capacidade térmica, são exemplos de sistemas de ganho indireto. A parede de Trombe insere-se neste grupo. Nos sistemas de ganho isolado, a captação e o armazenamento da energia estão termicamente isolados do edifício.

Os sistemas solares passivos são principalmente baseados em elementos do edifício que coletam, armazenam e distribuem a energia solar. Uma estufa ou *sunspace*, por vezes também designada por solário (*solarium*)¹, é um tipo de sistema solar de aquecimento passivo que consiste num espaço adjacente ao edifício, com uma grande área de envidraçados, que armazena energia sob a forma de calor (J. Balcomb et al., 1982). Na Figura 1 encontram-se alguns exemplos de estufas.



Figura 1 – Exemplos de estufas²

¹ O termo *greenhouse* só é utilizado quando o principal objetivo da estufa é a produção vegetal (Jones & McFarland, 1982).

² (a) (Central Maryland Sunrooms, 2012); (b) (North Georgia Mountain Realty, 2012); (c) (Green Passive Solar Magazine, 2012); (d) (Dennis R. Holloway Architect, 2012)

As estufas são um dos tipos de sistemas de aquecimento passivo mais popular para utilização em edifícios residenciais. Têm uma grande capacidade de armazenamento, uma agradável aparência visual e a capacidade de distribuir o calor para espaços adjacentes (J. Balcomb et al., 1982). Além disso, podem ser utilizadas em remodelações de edifícios através da criação de uma nova zona, ou em casos de limitação de espaço através da colocação de vidros em varandas (Mihalakakou, 2002; Moita, 2010). Este facto é de grande importância, visto que os novos edifícios representam um aumento anual de apenas 1 % do total do parque edificado com necessidades de aquecimento, sendo que os restantes 99 % dos edifícios já estão construídos, e são responsáveis por uma grande fração do consumo energético (Power, 2008). Segundo Power (2008), pelo menos 80 % do parque edificado atual continuará de pé e em utilização até 2050.

As estufas sistemas contribuem para a redução das NEPA através de: 1) o efeito de isolamento térmico do edifício provocado pela estufa, que reduz as perdas térmicas do edifício para o exterior; 2) o fornecimento de ar para ventilação pré-aquecido e 3) o fornecimento de ar aquecido pelo sol durante o dia (Mihalakakou, 2002). Estima-se que o consumo global de energia para aquecimento de um edifício possa ser reduzido entre 15 a 30 % através da utilização de uma estufa (Moita, 2010). No entanto, em Asdrubali et al. (2012) são reportadas poupanças de 20 % e em Lumbis (1988) são reportadas poupanças que chegam aos 80 %.

2.1 Funcionamento

Nas estufas, a radiação solar é transmitida para o seu interior através dos vidros e é absorvida pelas suas superfícies interiores, sendo convertida e armazenada sob a forma de calor. Uma fração desse calor é transferida por convecção natural para o ar interior da estufa, sendo outra fração armazenada nos elementos de massa da estufa, tais como paredes ou recipientes com água (J. Balcomb et al., 1982; Moita, 2010). O calor armazenado na estufa pode ser distribuído para o edifício por condução através da superfície de contacto entre o edifício e a estufa (por simplicidade, designada neste trabalho apenas por superfície de contacto) e/ou por convecção natural através de aberturas existentes nessa superfície (J. Balcomb et al., 1982). As estufas podem ser consideradas um tipo de sistema passivo isolado ou um sistema indireto, caso esteja ou não isolada termicamente do edifício. No caso de ser um sistema isolado a transferência de calor para o edifício ocorre apenas por convecção através das aberturas (J. Balcomb et al., 1982).

2.1.1 Tipo de estufas

Relativamente ao tipo de estufas, estas podem ser anexas ao edifício, designadas neste trabalho por estufas do tipo A, havendo neste caso apenas uma superfície de contacto, ou podem ser integradas no edifício, designadas por estufas do tipo B, sendo que, neste caso, existem três superfícies de contacto.

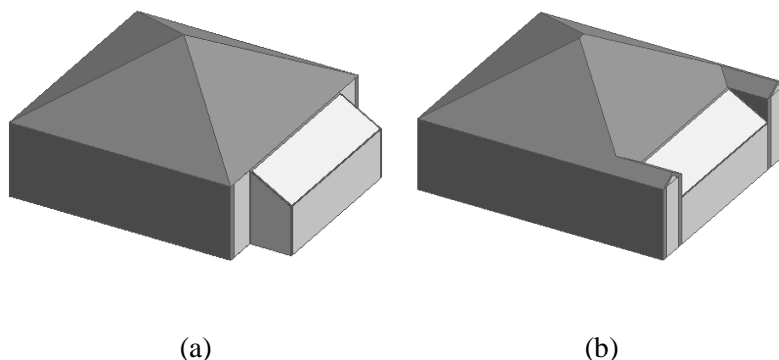


Figura 2 – Tipos de estufas: (a) tipo A e (b) tipo B

O comportamento térmico de uma estufa é influenciado por diversas variáveis, sejam estas respeitantes às suas características geométricas (como por exemplo, o seu volume, a sua largura ou o ângulo de inclinação do vidro superior), ao tipo de materiais empregues na sua construção (como por exemplo, o tipo de vidros e a sua espessura, a existência ou não de isolamento na superfície de contacto e a sua respetiva resistência térmica, ou a absorvidade do material da superfície de contacto), ou a outras características relevantes, tais como a sua orientação, o número de vidros, a temperatura de referência do edifício (*set-point* dos sistemas de climatização) ou a área das aberturas para convecção (J. Balcomb et al., 1982). Na Figura 3 identificam-se algumas das variáveis geométricas de uma estufa.

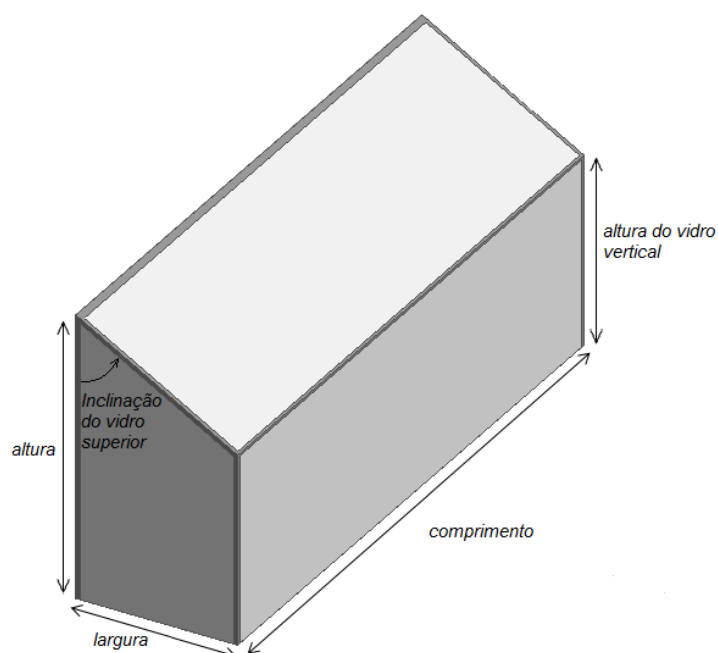


Figura 3 – Identificação das principais variáveis geométricas de uma estufa

2.1.2 Estratégias de controlo de perdas e ganhos indesejáveis

O calor armazenado na estufa durante o dia é facilmente perdido para o exterior durante o período noturno através das zonas envidraçadas. Para tal, por vezes, podem ser implementados mecanismos móveis de isolamento noturno por forma a reduzir estas perdas (J. D. Balcomb & Laboratory, 1980; Moita, 2010).

Por outro lado, no verão, podem ocorrer com facilidade situações de sobreaquecimento. Para evitar esta situação é essencial que sejam utilizadas estratégias de arrefecimento. Algumas das técnicas mais eficazes para o controlo dos problemas de sobreaquecimento são a ventilação natural da estufa (sobretudo a ventilação noturna), o seu sombreamento, a remoção ou substituição dos painéis de vidro que a constituem, a utilização de tubos enterrados ou a combinação de uma ou mais das técnicas referidas (Bataineh & Fayed, 2011; Mihalakakou, 2002; Moita, 2010; Patrício, 1997).

De acordo com Patrício (1997), a estratégia de arrefecimento mais importante é o sombreamento da estufa, sendo o impacto térmico da ventilação natural, face ao sombreamento, pouco relevante. Existem diversos tipos de sombreamento que podem ser aplicados à estufa, tais como a implementação de estores exteriores, palas de sombreamento, cortinados ou vegetação de folha caduca, sendo as duas últimas as opções mais simples e económicas (Mihalakakou, 2002; Moita, 2010).

2.2 Trabalhos realizados anteriormente

Uma das primeiras publicações sobre estufas data de 1980 (Chen et al., 1980). Desde então, e até aos dias de hoje, têm sido feitas diversas publicações que abordam este tema. Existem estudos sobre estufas para países como Itália, Grécia e Irlanda (Mihalakakou, 2002), Portugal (Patrício, 1997), Finlândia (Woolston et al., 1989), Inglaterra (Ho, 1995; Porteous & Ho, 1997), Canadá (Lumbis, 1988), Suíça (Blomsterberg & Wall, 1996) e Austrália (Todd, 1997).

Foram publicados alguns livros com capítulos dedicados a estufas (J. Balcomb et al., 1982; Hestnes et al., 2003; Moita, 2010; Reichenbach, 2007), e mesmo livros inteiramente dedicados a estufas (Mauldin, 1987; Parsons, 1983; Shapiro, 1985; Thomas, 1984). Além disso, também é possível encontrarem-se publicações de guias sobre projeto, construção e manutenção de estufas (Kent, 1982; Solar Center Information, 1998).

Existem inúmeros trabalhos científicos que estimam o desempenho térmico de estufas (Beckman et al., 1983; Blomsterberg & Wall, 1996; Weidt et al., 1983), sendo que alguns deles apresentam o desenvolvimento de modelos analíticos que permitem prever o seu desempenho térmico (Lumbis, 1988; Mottard & Fissore, 2007; Roux et al., 2004; Schoenau et al., 1990, 1991). Apesar de serem apresentados muitos trabalhos analíticos, também existem alguns trabalhos com uma componente experimental (Blomsterberg & Wall, 1996; Mottard & Fissore, 2007; Porteous & Ho, 1997; Roux et al., 2004; Schoenau et al., 1990, 1991; Torra et al., 1988; Werner, 1987).

Nalguns trabalhos é analisada a influência de alguns parâmetros de projeto das estufas no seu desempenho térmico (Bataineh & Fayez, 2011; Dirienzo & McGowan, 1980; Jones et al., 1982; Mihalakakou & Ferrante, 2000; Patrício, 1997; Werner, 1987), bem como a influência do comportamento dos utilizadores do edifício (Bourdeau, 1988; Porteous & Ho, 1997).

Foram também publicados alguns trabalhos onde são apresentados métodos para estimar a energia solar absorvida pelas estufas (Oliveti et al., 2012; Oliveti et al., 2008). Em Colliver & Parker (1983) é apresentado um modelo do fluxo energético numa estufa e Lemaire (1990) apresenta um estudo acerca do fluxo de ar e das temperaturas no seu interior. Em Bataineh & Fayez (2011) e Mihalakakou (2002) são abordados os problemas de sobreaquecimento da estufa nos meses de arrefecimento e são analisadas algumas soluções. E em Bakos & Tsgas (2000) é apresentada uma análise económica de uma estufa.

Também há alguns trabalhos que apresentam alguns novos conceitos de estufas: em Melih (1997) é apresentado o conceito de estufa oposta (*opposite sunspace*), que consiste na instalação de duas estufas no edifício: uma a sul e uma a norte. Este sistema funciona através da circulação de ar entre as duas estufas e funciona como um sistema passivo de aquecimento e de arrefecimento. E em Tiwari et al. (1988) é apresentado um estudo analítico sobre uma proposta de combinação de materiais de mudança de fase (*phase change materials* – PCM) com uma estufa.

Relativamente aos métodos de cálculo dos ganhos provenientes de uma estufa e da sua respetiva contabilização no cálculo do desempenho energético dos edifícios também existem inúmeros trabalhos realizados.

Existem diversos métodos para a contabilização dos ganhos das estufas nos cálculos energéticos do edifício, sendo que, nalguns trabalhos é feita uma breve descrição de alguns desses métodos (A. Oliveira, 1989; Passerini, 2012; Sommereux, 1985). Na norma ISO 13790 é apresentado um método de cálculo dos ganhos solares provenientes de elementos especiais, como é o caso das estufas (ISO, 2008). Existem também outros métodos de cálculo simplificados para a determinação do desempenho térmico de estufas, como por exemplo o método SLR (Jones & McFarland, 1982) e o método UU (*un-utilizability*) (Bakos & Tsgas, 2000; I. Blanc et al., 1987).

No método UU, traduzido como método da não-utilizabilidade, são definidos dois limites teóricos de inércia térmica do edifício: inércia térmica zero e infinita. No edifício com inércia térmica zero todos os ganhos solares em excesso, ou seja, os ganhos que já não contribuem para alcançar uma determinada temperatura, devem ser rejeitados. No edifício com inércia térmica infinita, todos os ganhos solares em excesso são armazenados e utilizados posteriormente (Isabelle Blanc et al., 1987).

O desempenho térmico do edifício com inércia térmica finita é então determinado através duma relação empírica dos dois limites definidos, utilizando-se o parâmetro da não-utilizabilidade, um parâmetro estatístico da radiação solar que quantifica a quantidade de radiação solar que é superior a um determinado valor (Sommereux, 1985).

Em Passerini (2012) são apresentadas algumas propostas de alteração do método de cálculo simplificado apresentado na norma ISO 13790, para o caso das estufas. Em Oliveira Panão et al. (2012) é apresentada uma proposta de integração do método SLR na norma ISO 13790, para a contabilização dos ganhos provenientes de sistemas combinados de estufas e ganho direto. E em Leenknecht & Saelens (2010) é sugerido um novo método de cálculo simplificado que engloba parâmetros do método SLR e do método UU.

Existem alguns trabalhos que apresentam uma comparação dos resultados obtidos através de vários métodos, como a comparação dos resultados dos métodos SLR e UU (Bakos, 2003), dos resultados dos métodos da norma ISO 13790 e da norma alemã DIN18599-2:2007 (Leenknecht & Saelens, 2010), ou dos resultados dos métodos dinâmicos e estacionários (Asdrubali et al., 2012).

3 Necessidades de energia para aquecimento

As necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento de um edifício são calculadas com base no balanço energético do mesmo. O balanço energético de um edifício inclui os termos de transferência de calor por condução e por convecção, ganhos de calor internos, ganhos solares e armazenamento de calor.

3.1 Norma ISO 13790

Segundo a norma ISO 13790, o método de cálculo das NEPA pode ser quase-estacionário ou dinâmico. No método quase-estacionário, é feito o balanço energético relativo a um período de tempo suficientemente longo, tipicamente um mês ou toda a estação de aquecimento. Neste caso, os efeitos dinâmicos são tidos em conta através de um fator de utilização dos ganhos solares, determinado empiricamente. No método dinâmico, é feito o balanço energético com passos de tempo pequenos, tipicamente uma hora. Este método considera o calor armazenado e libertado pela massa do edifício, além dos termos de transferência de calor (condução e convecção) e os ganhos (internos e solares).

A norma ISO 13790, designada nos capítulos seguintes apenas por norma, fornece procedimentos de cálculo das necessidades anuais de energia para aquecimento através da descrição de três métodos:

- 1) Método mensal (ou sazonal) quase-estacionário
- 2) Método horário simplificado (dinâmico)
- 3) Método dinâmico detalhado (simulação térmica dinâmica)

As metodologias para cálculo das NEPA do edifício englobam o cálculo das condições internas e ambientais, as características para a transferência de calor por condução e por convecção, os ganhos de calor internos, os ganhos solares e os parâmetros dinâmicos.

3.1.1 Método mensal quase-estacionário

No âmbito deste trabalho, o método relevante para o cálculo das NEPA é o método mensal quase-estacionário (ISO, 2008), pelo que em seguida se faz uma descrição desse método, incluindo a contribuição dos ganhos provenientes de estufas.

As necessidades de energia para aquecimento, $Q_{nd,ISO}$, podem ser determinadas através de³:

$$Q_{nd,ISO} = Q_{ht,ISO} - \eta_{gn} Q_{gn,ISO} \quad (1)$$

onde $Q_{ht,ISO}$ é o termo de transferência de calor entre o edifício e o exterior (kWh)⁴, η_{gn} é o fator de utilização dos ganhos térmicos, e $Q_{gn,ISO}$ corresponde ao termo de ganhos de calor do edifício (kWh).

O termo $Q_{ht,ISO}$ é a soma dos termos de transferência de calor por condução (Q_{tr}) e por convecção (Q_{ve}). E o termo dos ganhos corresponde à soma dos ganhos internos do edifício (Q_{int}) e aos ganhos solares (Q_{sol}):

$$Q_{ht,ISO} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (2)$$

$$Q_{gn,ISO} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (3)$$

³ Equação válida apenas para condições de aquecimento contínuo.

⁴ Uma vez que o método se refere ao cálculo das necessidades de energia para aquecimento, e portanto, à estação de aquecimento, este termo é, por vezes, designado simplesmente pelo termo de perdas térmicas do edifício.

Na equação (3) o termo dos ganhos solares, Q_{sol} , está subdividido em ganhos solares provenientes de elementos opacos e envidraçados que façam parte do edifício (Q_{sb}) e ganhos solares provenientes de estufas⁵ (Q_{ss}):

$$Q_{sol} = Q_{sb} + Q_{ss} \quad (4)$$

Segundo o anexo E da norma, o termo de ganhos solares provenientes da estufa (Q_{ss}), corresponde à soma dos ganhos diretos do edifício através da superfície de contacto (Q_{sd}), e dos ganhos indiretos provenientes da estufa (Q_{si})⁶:

$$Q_{ss} = Q_{sd} + Q_{si} \quad (5)$$

A fração dos ganhos diretos (Q_{sd}) divide-se em ganhos diretos provenientes de elementos opacos ($Q_{sd,p}$), isto é, provenientes das superfícies opacas da superfície de contacto e do pavimento, e ganhos diretos provenientes de elementos transparentes ($Q_{sd,w}$):

$$Q_{sd} = Q_{sd,p} + Q_{sd,w} \quad (6)$$

A fração dos ganhos indiretos (Q_{si}) corresponde aos ganhos de calor absorvidos pelas superfícies da estufa ($Q_{ab,s}$) descontando a fração de ganhos diretos provenientes das superfícies opacas da superfície de contacto ($Q_{sd,p}$):

$$Q_{si} = (1 - b_{tr})Q_{ab,s} - Q_{sd,p} \quad (7)$$

onde b_{tr} é o coeficiente de redução de perdas da estufa.

Na equação (7), o fator $(1 - b_{tr})$ corresponde à fração dos ganhos solares da estufa que são transferidos para o interior do edifício através da superfície de contacto. O fator de ajuste b_{tr} pode ser determinado segundo métodos descritos na norma ISO 13789.

O fator de utilização dos ganhos térmicos, o parâmetro η_{gn} apresentado na equação (1), é um parâmetro dinâmico, adimensional, que engloba o facto de apenas uma fração dos ganhos ser realmente utilizável para o nível de aquecimento desejado. Este parâmetro depende de outros dois: a , que é um parâmetro numérico que depende da inércia do edifício e γ , que é a razão entre o termo de ganhos de calor do edifício e o termo de transferência de calor entre o edifício e o exterior (*heat-balance ratio*). O parâmetro η_{gn} pode ser determinado através das seguintes expressões:

$$\eta_{gn} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} & (\text{se } \gamma > 0 \text{ e } \gamma \neq 1) \\ \frac{a}{a + 1} & (\text{se } \gamma = 1) \\ \frac{1}{\gamma} & (\text{se } \gamma < 0) \end{cases} \quad (8)$$

⁵ Quando existem ganhos solares provenientes de elementos especiais, como estufas, a contabilização dos ganhos provenientes da estufa, Q_{ss} , nos ganhos solares do edifício, Q_s , não está muito explícita no método de cálculo apresentado na norma ISO 13790. Não há concordância entre a nomenclatura apresentada no capítulo 11 (ganhos solares do edifício) e o anexo E (ganhos solares de elementos especiais).

⁶ No Anexo A encontra-se a formulação, apresentada na norma ISO 13790, necessária para a determinação dos termos Q_{sd} e Q_{si} .

O parâmetro γ determina-se através de⁷:

$$\gamma = \frac{Q_{gn,ISO}}{Q_{ht,ISO}} \quad (9)$$

No entanto, a determinação de η_{gn} por parte dos profissionais da área de edifícios pode ser mais simples. Existe um outro método para a determinação de η_{gn} que consiste na consulta de curvas existentes de η_{gn} em função de γ para vários níveis de inércia. Na Figura 4 encontra-se um exemplo português desse tipo de curvas (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 2006). Quanto maior for a razão entre os ganhos e as perdas térmicas do edifício, menor é o fator de utilização de ganhos térmicos.

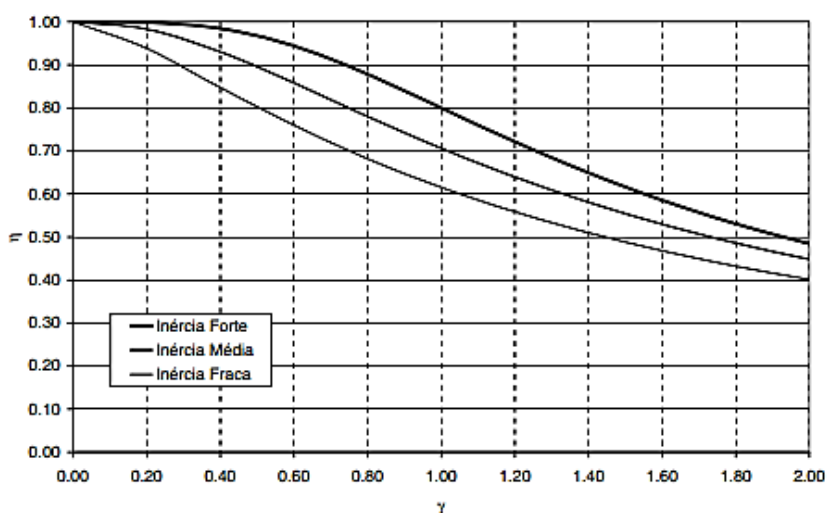


Figura 4 – Exemplo de curvas de η_{gn} em função de γ para vários níveis de inércia

Apesar do parâmetro η_{gn} ser determinado através da equação (8), é possível fazer uma boa aproximação deste parâmetro através dos resultados mensais das necessidades de energia para aquecimento e/ou arrefecimento determinados através do método dinâmico detalhado (simulações térmicas dinâmicas).

Assim, é possível obter-se de forma simples os termos $Q_{nd,ISO}$, $Q_{ht,ISO}$ e $Q_{gn,ISO}$ através da realização de algumas simulações, e posteriormente os valores de η_{gn} e γ através das equações (1) e (9), respetivamente.

No anexo I da norma são descritos os procedimentos para a determinação de $Q_{nd,ISO}$, $Q_{ht,ISO}$ e $Q_{gn,ISO}$ a partir dos resultados das necessidades de energia para aquecimento (Q_H) e arrefecimento (Q_C) obtidos através de simulações térmicas dinâmicas⁸.

⁷ Este parâmetro é equivalente à razão entre os ganhos e as perdas térmicas do edifício (ver nota 4).

⁸ Neste trabalho, considera-se que os termos Q_H e Q_C são ambos valores positivos.

3.1.2 Método dinâmico detalhado: simulação térmica dinâmica

Existem diversos *softwares* de simulação térmica dinâmica de edifícios. No entanto, as linhas gerais de simulação dos vários *softwares* são semelhantes, sendo sempre necessário fazer uma descrição global do edifício, englobando isto a caracterização da sua envolvente, dos seus espaços interiores, da sua utilização e dos seus sistemas de climatização. Neste trabalho, a simulação térmica dinâmica dos diversos conjuntos edifício-estufa, foi feita através do *software EnergyPlus*, pelo que em seguida se faz uma breve descrição do seu método de cálculo.

3.1.2.1 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um *software* de análise energética e simulação das cargas térmicas do edifício. Neste *software*, os cálculos são feitos através da simulação do edifício e dos vários sistemas de climatização associados (e centrais, caso estas existam), quando estes são expostos a diferentes condições ambientais, bem como a diferentes condições de operação. Uma característica própria deste *software* é o facto de ser um *software* de simulação integrada, isto é, o edifício em si e os seus sistemas de climatização são simulados em simultâneo. Assim, os impactos causados pelos sistemas influenciam diretamente a resposta térmica do edifício (EnergyPlus, 2011).

O *EnergyPlus* é constituído por um conjunto de vários módulos de simulação que se encontram interligados. Existe um módulo que gere a simulação propriamente dita e um módulo que gere a solução integrada. Este último encontra-se subdividido em três módulos globais: um módulo que gere o balanço térmico das superfícies, um que gere o balanço térmico do ar, e um que gere a simulação dos sistemas do edifício. Cada um destes módulos globais contém módulos mais específicos, como por exemplo, o módulo de transferência de calor por condução, o módulo de sombreamento solar e o módulo de gestão dos sistemas de climatização (EnergyPlus, 2011).

A interligação entre os sistemas de climatização do edifício e o próprio edifício é feita através do balanço térmico do ar através da resolução de duas equações para cada zona térmica considerada: 1) balanço de calor sensível (equação (10)) e 2) balanço de calor latente (EnergyPlus, 2011).

$$C \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{conv,int} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{mix} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{sist} \quad (10)$$

onde $C \frac{dT}{dt}$ corresponde à energia armazenada no ar, $\dot{Q}_{conv,int}$ às cargas internas convectivas, \dot{Q}_{conv} ao calor transferido por convecção por todas as superfícies, \dot{Q}_{mix} ao calor transferido devido à mistura de ar com outras zonas térmicas, \dot{Q}_{inf} ao calor transferido devido à infiltração de ar exterior e \dot{Q}_{sist} ao calor transferido pelos sistemas de climatização.

Tanto para o caso do calor sensível como do calor latente, o *EnergyPlus* determina a temperatura da zona considerada através de um procedimento de previsão e posterior correção dos valores, tendo como base de cálculo a equação (10). Assim, para cada hora é feita uma estimativa da energia necessária para o balanço da equação, com a temperatura do ar igual à temperatura de referência dos sistemas⁹. Em seguida, são simulados os sistemas de climatização, tendo em conta a previsão anterior da energia necessária. Determinada a energia efetivamente fornecida pelos sistemas, é determinada a temperatura final da zona considerada¹⁰ (EnergyPlus, 2011).

⁹ Para esta estimativa consideram-se condições estacionárias, ou seja, o termo $C \frac{dT}{dt}$ é nulo.

¹⁰ Para tal, o termo da derivada é substituído por uma aproximação de terceira ordem.

3.2 Métodos alternativos: correlações

A simulação térmica dinâmica é uma ferramenta precisa e versátil para a determinação das NEPA, representando o desempenho dos sistemas solares passivos com uma boa precisão, no entanto requerem dados climáticos horários correspondentes à estação de aquecimento ou a todo o ano e é necessária a utilização de *software* de simulação.

Um método alternativo às simulações é a utilização de correlações. As correlações são consideradas uma ferramenta simples e de fácil utilização. Com esta ferramenta obtêm-se estimativas para períodos maiores, como por exemplo um mês. Nestes métodos, alguns parâmetros e dados climáticos são empiricamente correlacionados com a fração de energia solar utilizável para aquecimento ou *solar heating fraction* (SHF), também designada por vezes por *solar saving fraction* (Sommereux, 1985).

3.2.1 Método SLR

O método SLR (*solar load ratio*) é um dos métodos simplificados que utilizam correlações empíricas. Este método foi inicialmente desenvolvido para a análise de coletores solares térmicos, pelo *Los Alamos Scientific Laboratory* (LASL) em 1976 (Schnurr et al., 1980). Posteriormente, o método foi desenvolvido para a análise de sistemas solares passivos: em 1978 foi desenvolvido para paredes de armazenamento (J. D. Balcomb & McFarland, 1978), em 1979 para sistemas de ganho direto (O. Wray, 1980), e, finalmente, em 1980 o método foi desenvolvido para estufas (McFarland & Jones, 1980). Neste método, os parâmetros que são correlacionados são a SHF e o SLR. Em J. Balcomb et al. (1982) são apresentadas correlações SLR para os referidos sistemas.

As correlações são utilizadas para determinar graficamente (ou numericamente) os valores mensais de SHF. Posteriormente, as NEPA podem ser então determinadas através da seguinte equação:

$$Q_{nd,SLR} = (1 - SHF)Q_{ref,SLR} \quad (11)$$

onde $Q_{nd,SLR}$ corresponde às NEPA do edifício (kWh), sem se considerarem os ganhos térmicos internos, e $Q_{ref,SLR}$ corresponde ao termo de transferência de calor de referência entre o edifício e o exterior¹¹ (kWh), isto é, não considerando os ganhos internos, excluindo a superfície de contacto e assumindo uma temperatura de referência constante.

Embora o método SLR não tenha sido inicialmente desenvolvido para sistemas solares passivos, a sua precisão é melhorada quando aplicado a este tipo de sistemas (J. D. Balcomb & McFarland, 1978).

A precisão do método SLR não é frequentemente apresentada nos trabalhos publicados sobre o método. No entanto, em J. Balcomb (1980), é mencionado que o desvio padrão dos erros mensais dos métodos de correlação é tipicamente $\pm 8\%$, sendo o desvio padrão do erro anual de $\pm 3\%$. Relativamente ao método SLR, em J. Balcomb (1980), é também mencionado que o desvio padrão dos erros, varia, tipicamente, entre 3 e 4 %, relativamente aos resultados obtidos por simulações horárias. Em Lovins (2007) é referido que, segundo o *ASHRAE Application Handbook (2003)*, o desvio padrão dos erros do método SLR varia entre 2 e 4 %, quando comparado com simulações horárias. Por último, são apresentados resultados que demonstram que o método SLR, quando comparado com os resultados obtidos por simulações, apresenta um erro de -4 % quando aplicado a sistemas de ganho direto (Armando Oliveira & Fernandes, 1992), de $\pm 3\%$ quando aplicado a paredes de armazenamento (J. D. Balcomb & McFarland, 1978) e de -3 % quando aplicado a estufas (Sommereux, 1985).

O parâmetro SLR é uma variável que incorpora informação suficiente acerca do edifício e da sua localização, permitindo assim a determinação das NEPA com uma precisão aceitável (J. Balcomb et al., 1982).

¹¹ Ver nota 4.

Genericamente, o parâmetro SLR pode ser expresso por:

$$SLR = \frac{Q_{gn,SLR}}{Q_{ref,SLR}} \quad (12)$$

onde $Q_{gn,SLR}$ corresponde aos ganhos solares mensais do edifício (kWh)¹². A expressão para a determinação de $Q_{gn,SLR}$ depende do tipo de sistema passivo em questão.

O método SLR foi desenvolvido para um determinado conjunto de sistemas passivos de referência, com características fixas e inalteráveis. No caso particular das estufas, o método SLR foi desenvolvido para 28 tipos de estufas diferentes, orientadas a sul (J. Balcomb et al., 1982). Em 1980 foram apresentadas as primeiras correlações SLR para estufas (McFarland & Jones, 1980), as quais foram revistas em 1982 (J. Balcomb et al., 1982; Jones & McFarland, 1982).

O facto de haver um número limitado de correlações, para um conjunto de estufas com características fixas, constitui uma das desvantagens do método. Quando a estufa em análise tem algumas alterações face à estufa de referência, para a qual existem as correlações SLR, é necessário fazer-se uma análise de sensibilidade para que essas alterações sejam tidas em consideração. Uma outra desvantagem deste método é o facto da inércia térmica do edifício não ser diretamente incluída nos cálculos como uma variável (Sommereux, 1985).

As correlações são obtidas através do ajuste matemático de funções conhecidas aos resultados obtidos através de simulações térmicas dinâmicas, tal como se exemplifica na Figura 5 (J. D. Balcomb & Laboratory, 1980).

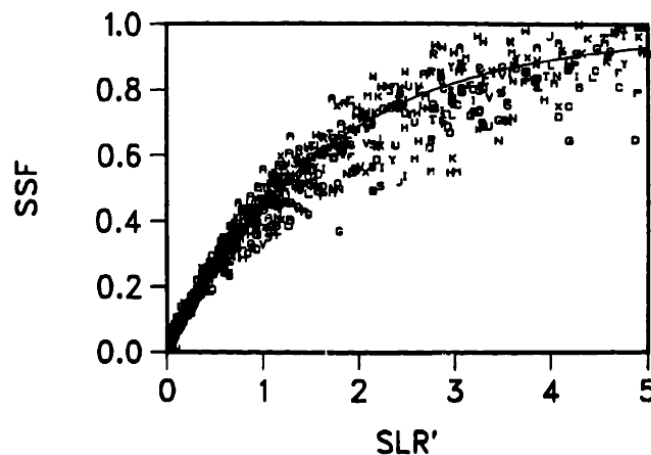


Figura 5 – Exemplo de uma curva de SHF em função de SLR para uma estufa

No caso das estufas, a correlação entre os parâmetros SHF e SLR é expressa por:

$$SHF = 1 - b_1 \exp(b_2 SLR) \quad (13)$$

onde b_1 e b_2 correspondem aos coeficientes de correlação. Esta expressão apenas é válida para superfícies de contacto opacas.

¹² No método SLR não são considerados os ganhos internos do edifício.

Para o caso das estufas, o parâmetro SLR é expresso pela seguinte expressão:

$$SLR = \frac{Q_{gn,SLR}}{Q_{ref,SLR}} = \frac{Q_{abs,SLR} - b_3 Q_{hts,SLR}}{Q_{ref,SLR}} \quad (14)$$

sendo que o termo $Q_{gn,SLR}$ corresponde à diferença entre o calor absorvido pela estufa ($Q_{abs,SLR}$) e o termo de transferência de calor entre a estufa e o exterior ($Q_{hts,SLR}$) corrigido por um parâmetro de ajuste, b_3 .

De modo semelhante ao descrito no capítulo 3.1, os termos $Q_{nd,SLR}$, $Q_{ref,SLR}$, $Q_{hts,SLR}$ e $Q_{abs,SLR}$, necessários para a determinação dos parâmetros mensais SLR e SHF , também podem ser obtidos a partir dos resultados das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento obtidos por simulações dinâmicas.

Para a obtenção dos termos $Q_{ref,SLR}$ e $Q_{hts,SLR}$ faz-se uma simulação, tanto do edifício como da estufa, considerando sistemas de aquecimento e arrefecimento (ambos com a temperatura de referência da estação de aquecimento), e não considerando ganhos solares. Desta simulação obtêm-se como resultados Q_H^1 e Q_C^1 , referentes ao edifício, e $Q_{H,s}^1$ e $Q_{C,s}^1$ referentes à estufa. Para esta simulação não se consideram as trocas de calor entre o edifício e a estufa, pelo que, nesta simulação, a superfície de contacto deve ser adiabática.

O termo de transferência de calor de referência entre o edifício e o exterior (Q_{ref}) é obtido através de:

$$Q_{ref,SLR} = Q_H^1 - Q_C^1 \quad (15)$$

O termo de transferência de calor entre a estufa e o exterior ($Q_{hts,SLR}$) obtêm-se através de:

$$Q_{hts,SLR} = Q_{H,s}^1 - Q_{C,s}^1 \quad (16)$$

O calor absorvido pela estufa, $Q_{abs,SLR}$, corresponde à diferença entre o calor transferido por esta, quando se consideram e quando não se consideram ganhos solares. Assim, faz-se uma simulação idêntica à anterior (apenas da estufa), mas considerando os ganhos solares, e obtêm-se como resultados $Q_{H,s}^2$ e $Q_{C,s}^2$. É possível determinar-se o termo $Q_{abs,SLR}$ através de:

$$Q_{abs,SLR} = Q_{hts,SLR} - (Q_{H,s}^2 - Q_{C,s}^2) \quad (17)$$

Faz-se uma terceira simulação, do edifício, considerando apenas sistemas de aquecimento, obtendo-se como resultado desta simulação Q_H^3 , que corresponde às NEPA:

$$Q_{nd,SLR} = Q_H^3 \quad (18)$$

3.3 Integração do método SLR na norma ISO 13790

Em Oliveira Panão et al. (2012) é apresentado um método que integra o método SLR na norma ISO 13790. O método apresentado permite a contabilização dos ganhos provenientes de um sistema combinado de elementos solares passivos, cujas correlações SLR sejam conhecidas, e de elementos de ganho direto, habitualmente contabilizados através dos métodos descritos na norma. Nos capítulos seguintes deste trabalho, este método é simplesmente designado por método integrado.

Segundo a norma, as NEPA são determinadas de acordo com a equação (1).

No entanto, também é possível a utilização de uma formulação alternativa para a sua determinação¹³:

$$Q_{nd,ISO} = (1 - \eta_{ls})Q_{ht,ISO} \quad (19)$$

onde η_{ls} é o fator de utilização das perdas, que pode ser determinado através de:

$$\eta_{ls} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma^{-a}}{1 - \gamma^{-(a+1)}} & (se \gamma > 0 e \gamma \neq 1) \\ \frac{a}{a + 1} & (se \gamma = 1) \\ 1 & (se \gamma < 0) \end{cases} \quad (20)$$

Em Oliveira Panão et al. (2012) foi demonstrado que o parâmetro η_{ls} da equação (19) – norma ISO 13790 – é fisicamente equivalente ao parâmetro SHF da equação (11) – método SLR. Assim, a utilização da equação (19) facilita a integração dos dois métodos de cálculo, uma vez que as equações para a determinação de Q_{nd} de ambos os métodos são semelhantes:

$$\begin{cases} Q_{nd,ISO} = (1 - \eta_{ls})Q_{ht,ISO} \\ Q_{nd,SLR} = (1 - SHF)Q_{ref,SLR} \end{cases} \quad (21)$$

Assumindo que as NEPA determinadas a partir dos dois métodos são equivalentes, tem-se que:

$$(1 - \eta_{ls})Q_{ht,ISO} = (1 - SHF)Q_{ref,SLR} \quad (22)$$

Relativamente à contabilização da contribuição dos ganhos provenientes de vários sistemas, de acordo com Oliveira Panão et al. (2012), é possível determinar o parâmetro SHF de vários sistemas solares combinados através da soma do parâmetro SHF de cada sistema pesado pela respetiva fração de área projetada na fachada, a_p :

$$SHF_{total} = \sum_i a_{pi} SHF_i \quad (23)$$

Assim, aplicando a equação (11) a dois sistemas solares, tendo em conta a equação (23) tem-se:

$$Q_{nd} = (1 - a_{p1}SHF_1 - a_{p2}SHF_2)Q_{ref,SLR} \quad (24)$$

Considerando que o sistema 1 é um sistema de ganho direto e o sistema 2 é um sistema solar passivo¹⁴ cujas correlações SLR são conhecidas, através das equações (22) e (24) obtém-se a expressão¹⁵:

$$Q_{nd} = a_{pi}(1 - \eta_{ls_i})Q_{ht,ISO} + (1 - a_{pi} - a_{pj}SHF_j)Q_{ref,SLR} \quad (25)$$

Através da equação (25) é possível determinar as NEPA através do método integrado, contabilizando-se os ganhos solares diretos (norma) e os ganhos de sistemas solares passivos cujas correlações SLR sejam conhecidas (método SLR). Para tal, apenas é necessária a determinação dos parâmetros η , $Q_{ht,ISO}$, SHF e $Q_{ref,ISO}$.

A equação (25) pode também ser generalizada para o cálculo da contribuição dos ganhos provenientes de vários sistemas cujas correlações SLR sejam conhecidas:

$$Q_{nd} = a_{pi}(1 - \eta_{ls_i})Q_{ht,ISO} + \left[1 - a_{pi} - \sum_j (a_{pj}SHF_j) \right] Q_{ref,SLR} \quad (26)$$

¹³ No Anexo B encontra-se a derivação da expressão.

¹⁴ De ganho direto ou de ganho isolado.

¹⁵ No Anexo C encontra-se a derivação da expressão.

4 Determinação das necessidades de energia para aquecimento

4.1 Método mensal da norma ISO 13790

O Decreto-Lei 80/2006 (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 2006) é um Decreto-Lei português, definido de acordo com as disposições da norma ISO 13790, e constitui o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) de Portugal. O método apresentado no RCCTE é baseado, e equivalente, ao método mensal apresentado na norma, embora seja aplicado numa base de tempo sazonal.

Assim, por simplicidade, neste trabalho, considera-se a metodologia de cálculo das necessidades anuais de energia para aquecimento apresentada no RCCTE.

Segundo o RCCTE, o termo $Q_{ht,ISO}$ é determinado através de¹⁶:

$$Q_{ht,ISO} = 0,024 \cdot (Q_t + Q_v) \quad (27)$$

onde o termo Q_t corresponde às perdas de calor por condução através da envolvente do edifício (kWh) e o termo Q_v às perdas de calor resultantes da renovação de ar (kWh).

O termo Q_t pode ser determinado através de:

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \quad (28)$$

onde Q_{ext} corresponde às perdas de calor pelos elementos do edifício em contacto com o exterior; Q_{lna} às perdas de calor dos elementos do edifício em contacto com zonas não aquecidas; Q_{pe} às perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo e o termo Q_{pt} às perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício.

O termo Q_{ext} pode ser determinados através da seguinte equação¹⁷:

$$Q_{ext} = \sum U_g \cdot A \cdot DD_a \quad (29)$$

onde U_g corresponde ao coeficiente de transmissão térmica global do elemento considerado ($W/m^2/^\circ C$), A à sua área (m^2), medida pelo interior, e DD_a é o número anual de graus-dia de aquecimento¹⁸ ($^\circ C \cdot dia$), determinado com uma temperatura base, T_b , de $20^\circ C$.

O termo Q_v pode ser determinado através de:

$$Q_v = \left(\rho \frac{C_p}{3600} \cdot RPH \cdot A_{pav} \cdot P_d \right) \cdot DD_a \cdot (1 - \eta_{sist}) \quad (30)$$

onde ρ e C_p são, respetivamente, a massa volúmica (kg/m^3) e o calor específico do ar ($J/kg/^\circ C$), RPH o número de renovações horárias do ar interior (h^{-1}), A_{pav} a área útil de pavimento (m^2), P_d o pé-direito médio do edifício (m) e η_{sist} é o rendimento do sistema de recuperação de calor, caso exista.

Relativamente ao termo $Q_{gn,ISO}$, este é composto por dois termos: ganhos internos do edifício, Q_i , e ganhos solares, Q_s :

$$Q_{gn,ISO} = Q_i + Q_s \quad (31)$$

¹⁶ O fator 0,024 é o fator de conversão de $W \cdot dia$ para kWh.

¹⁷ No Anexo D encontram-se as equações necessárias para o cálculo dos termos Q_{lna} , Q_{pe} e Q_{pt} .

¹⁸ Graus-dias de aquecimento (*degree-days*) é um número que caracteriza a severidade de um clima durante a estação de aquecimento. Determina-se através do somatório das diferenças positivas registadas entre uma dada temperatura de base e a temperatura (horária) do ar exterior durante a estação de aquecimento (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 2006).

O termo Q_i é determinado através da equação:

$$Q_i = q_i \cdot M \cdot A_{pav} \cdot 0,720 \quad (32)$$

sendo q_i os ganhos internos médios do edifício (W/m^2), cujos valores já se encontram pré-determinados no RCCTE para alguns tipos de edifícios e M a duração média da estação convencional de aquecimento (meses), cujos valores também se encontram pré-definidos no RCCTE¹⁹.

Relativamente ao termo Q_s , quando este se refere apenas a sistemas de ganho direto, pode ser determinado através de:

$$Q_s = G_{sul} \sum_j \left(X_j \sum_n A_{s_{nj}} \right) \cdot M \quad (33)$$

onde G_{sul} é o valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul, de área unitária, durante a estação de aquecimento ($kWh/m^2/mês$), X_j é o fator de orientação e $A_{s_{nj}}$ é a área coletora de radiação solar efetiva da superfície n com orientação j (m^2).

Relativamente ao fator de orientação, X_j , de acordo com o RCCTE, apenas se consideram superfícies horizontais e verticais²⁰, sendo que uma superfície é considerada vertical quando a sua inclinação é superior a 60° .

Para cada superfície com uma determinada orientação, a área coletora de radiação solar efetiva, A_s , determina-se através de:

$$A_s = A_{v\tilde{a}o} F_s F_g F_w g_\perp \quad (34)$$

onde $A_{v\tilde{a}o}$ corresponde à área total do vão envidraçado, F_g à fração envidraçada, g_\perp ao fator solar do vão envidraçado (para radiação incidente na perpendicular) e F_w é o fator de correção devido à variação das propriedades dos vidros com o ângulo de incidência da radiação solar. F_s é o fator de obstrução, que pode ser determinado através de:

$$F_s = F_h F_o F_f \quad (35)$$

sendo F_h o fator de sombreamento do horizonte por obstruções longínquas exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício; F_o o fator de sombreamento por elementos horizontais sobrepostos ao envidraçado e F_f o fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado.

4.2 Método SLR – mensal

Os termos necessários para a determinação das NEPA, através do método SLR, são os termos mensais $Q_{gn,SLR}$ e $Q_{ref,SLR}$ ²¹.

Quando se analisam ou estudam sistemas solares passivos, como os sistemas de ganho direto, as paredes de Trombe, ou as estufas, existem alguns parâmetros úteis que devem ser conhecidos: a área de captação do sistema, A_c , ou seja, a área de vidro do sistema em análise, projetada na fachada do edifício (m^2); o coeficiente global de perdas do edifício, ou seja, o coeficiente de transferência de calor entre o edifício e o ambiente exterior, designado no âmbito do método *SLR* por *building load coefficient (BLC)*²²; e a razão entre estes dois parâmetros, designada por *load collector ratio (LCR)*, expressa em $kWh/m^2/^\circ C/dia$.

¹⁹ 0,720 é um fator de conversão de $W \cdot mês$ para kWh .

²⁰ O ângulo de inclinação considerado no âmbito do RCCTE corresponde ao ângulo complementar de θ_v .

²¹ O método SLR original não utiliza os valores absolutos dos termos de transferência de calor (kWh), utilizando todos os termos de transferência de calor por unidade de área coletora projetada na fachada (kWh/m^2).

²² É determinado pela soma das perdas térmicas diárias pelas paredes exteriores, pelos envidraçados, pelo pavimento e por ventilação (renovação de ar), e expressa-se em $kWh/^\circ C/dia$.

De acordo com J. Balcomb et al. (1982), os termos $Q_{gn,SLR}$ e $Q_{ref,SLR}$, podem ser determinados a partir destes parâmetros através de:

$$Q_{gn,SLR} = Q_{abs,SLR} - b_3 LCR_s \cdot A_c \cdot DD \quad (36)$$

$$Q_{ref,SLR} = BLC \cdot DD = LCR \cdot A_c \cdot DD \quad (37)$$

onde DD são os graus-dias de aquecimento mensais, b_3 é um parâmetro de ajuste determinado através de correlações matemáticas e LCR_s o parâmetro LCR da estufa ($\text{kWh/m}^2/\text{°C}/\text{dia}$).

Assim, através das equações (36) e (37), o parâmetro SLR expressa-se por:

$$SLR = \frac{Q_{gn,SLR}}{Q_{ref,SLR}} = \frac{Q_{abs,SLR} - b_3 LCR_s \cdot DD}{BLC \cdot DD} \quad (38)$$

Uma vez que o método SLR não considera os ganhos internos do edifício é necessária uma correção do termo $Q_{ref,SLR}$. Assim, o número de graus-dia de aquecimento utilizado para o cálculo de $Q_{ref,SLR}$ baseia-se numa temperatura base reduzida, que reflete esse facto²³. A temperatura reduzida, T_{ref} , utilizada para o cálculo do número de graus-dias corrigido pode determinar-se através de:

$$T_{ref} = T_b - \frac{q_i}{H_{tot}} \quad (39)$$

onde H_{tot} corresponde à condutância total do edifício excluindo as superfícies de contacto²⁴ ($\text{W}/\text{°C}$).

Relativamente ao termo $Q_{gn,SLR}$, é necessária a determinação do termo $Q_{abs,SLR}$. No método SLR original este termo é determinado através de correlações empíricas adicionais.

Neste trabalho, considera-se que o calor absorvido pela estufa, numa primeira aproximação, pode ser obtido pela soma dos ganhos solares individuais de cada uma das suas superfícies envidraçadas. Assim, para a determinação dos valores mensais de $Q_{abs,SLR}$, utilizou-se uma metodologia semelhante à apresentada no RCCTE (capítulo 4.1), com algumas modificações. Tendo em conta a equação (33) considera-se que o termo $Q_{abs,SLR}$, para cada mês, pode ser aproximado por:

$$Q_{abs,SLR} = \sum_j \left(G_j \sum_n A_{s_{nj}} \right) \quad (40)$$

onde G_j corresponde à radiação mensal incidente numa superfície com orientação j .

A radiação mensal incidente numa superfície com uma determinada orientação e inclinação foi calculada de acordo com a formulação apresentada no Anexo E, considerando-se, também, apenas superfícies verticais e horizontais.

²³ O conceito de temperatura reduzida é considerado no método integrado apresentado em Oliveira Panão et al. (2012). No entanto, este conceito foi primeiramente apresentado em J. Balcomb et al. (1982).

²⁴ É determinada pela soma dos coeficientes de transferência de calor das paredes exteriores e da cobertura ($\text{W}/\text{°C}$).

4.3 Método SLR – anual

Aplicou-se o método SLR anualmente, determinando-se apenas um valor anual dos parâmetros SLR e SHF .

Determinou-se o termo $Q_{ref,SLR}$ de modo semelhante ao utilizado no método SLR aplicado mensalmente. Para tal, utilizou-se a equação (37), mas considerando-se o número anual de graus-dia de aquecimento. O número anual de graus-dia de aquecimento foi calculado considerando apenas os meses de outubro a maio.

O termo $Q_{abs,SLR}$ também foi determinado de modo semelhante ao utilizado no método SLR mensalmente. Determinou-se este termo através de algumas modificações da equação (40):

$$Q_{abs,SLR} = \sum_j \left(G_j \sum_n A_{s_{nj}} \right) \times M \quad (41)$$

sendo, neste caso, G_j a média anual da radiação mensal incidente numa superfície com orientação j , e M a duração média da estação de aquecimento. Por simplicidade, considera-se que o valor de M é igual a 8 meses.

4.4 Método integrado

Para a determinação das NEPA segundo o método integrado é necessária a determinação de quatro termos: η e Q_{ht} , que são determinados segundo o método mensal da norma, e SHF e Q_{ref} , que são determinados através do método SLR.

4.4.1 Determinação de η e Q_{ht} (norma ISO 13790)

O parâmetro η determina-se através da equação (20) a partir dos parâmetros γ e a , sendo que, o parâmetro γ se determina através dos termos $Q_{ht,ISO}$ e $Q_{gn,ISO}$.

Estes termos podem ser determinados através da metodologia apresentada na norma. No âmbito deste trabalho, estes termos são determinados segundo essa metodologia, através da aplicação direta do método de cálculo do RCCTE apresentado no capítulo 4.1.

4.4.2 Determinação de SHF e Q_{ref} (método SLR)

O parâmetro SHF é determinado com base no parâmetro SLR através de correlações empíricas pré-determinadas, sendo que, o parâmetro SLR é determinado, segundo a equação (14), através dos termos $Q_{ref,SLR}$ e $Q_{abs,SLR}$.

Determinaram-se os termos $Q_{ref,SLR}$ e $Q_{abs,SLR}$ através das equações (37) e (40), respetivamente.

5 Casos analisados

5.1 Descrição

De entre as inúmeras variáveis que influenciam o comportamento térmico de uma estufa as que foram analisadas neste trabalho foram o tipo de estufa, a razão entre a área projetada da estufa e a área da fachada (A_p/A_f), a inclinação do vidro superior da estufa (θ_v), o material da superfície de contacto e o tipo de vidro da estufa.

Os modelos dos edifícios e das estufas foram construídos e caracterizados através da interface gráfica *DesignBuilder* do software *EnergyPlus*.

5.1.1 Modelos

Em todos os casos analisados, utilizaram-se modelos de edifícios constituídos por uma única zona com uma área útil de 100 m². Relativamente às estufas, construíram-se nove modelos de estufas geometricamente diferentes, sendo que o que difere entre eles é a razão A_p/A_f e o ângulo θ_v . Na Tabela 1 encontram-se as diferenças entre cada modelo de estufa e no Anexo F encontram-se as respetivas características geométricas de cada um.

Tabela 1 – Modelos geométricos analisados

Modelo	A_p/A_f (%)	θ_v (°)
1	30	30
2		60
3		90
4	70	30
5		60
6		90
7	100	30
8		60
9		90

Com o propósito de comparar o comportamento das estufas do tipo A e do tipo B utilizaram-se os mesmos modelos geométricos de estufas em ambos os casos, perfazendo um total de 18 modelos de estufas. Como se ilustra na Tabela 2, o caso extremo das estufas dos tipos A e B (modelos 7, 8 e 9) são idênticos, o que implica a necessidade de construção de apenas 15 modelos. Por simplicidade, neste trabalho, cada um dos modelos de estufa é identificado por um nome representativo com base na informação apresentada na Tabela 1. Assim, como exemplo, uma estufa do tipo B com 70 % de A_p/A_f e uma inclinação do vidro, θ_v , de 30 ° é representada por B_70_30°.

Tabela 2 – Planta dos modelos geométricos considerados

A_p/A_f (%)	100	70	30
Tipo A			
Tipo B			

Com base nos modelos apresentados na Tabela 1 construíram-se 120 casos de estudo, através da variação do material da superfície de contacto e do tipo de vidro da estufa. Na Figura 6 encontram-se esquematizados os casos que foram analisados. Relativamente à variação do material da superfície de contacto considerou-se que esta podia ser opaca, sendo neste caso constituída por uma parede de betão, ou transparente, sendo neste caso toda a superfície de contacto uma janela interior de vidro simples. Quanto à variação do tipo de vidro da estufa, considerou-se que este podia ser vidro simples ou vidro duplo²⁵. Para maior simplicidade na identificação destes casos, cada uma das situações é identificada neste trabalho de acordo com os nomes apresentados na Tabela 3.

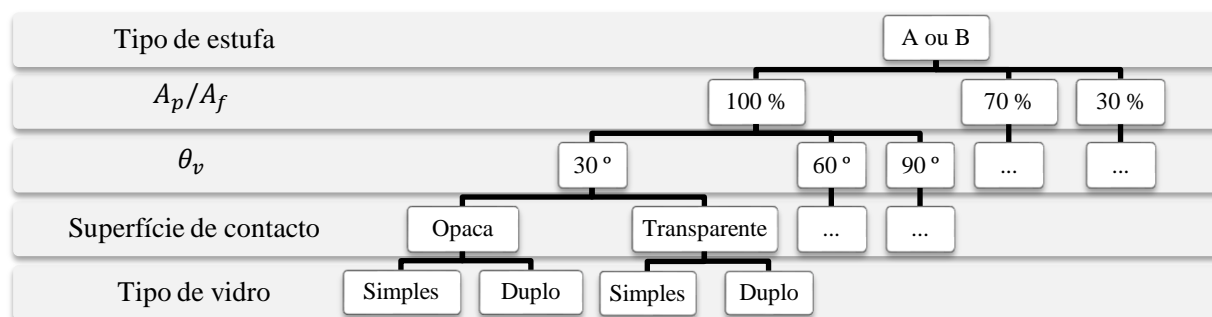


Figura 6 – Casos analisados

Tabela 3 – Variações construtivas dos modelos das estufas e nomes identificativos

Superfície de contacto	Tipo de vidro	Nome identificativos
Opaca (betão)	Simples	O_VS
	Duplo	O_VD
Transparente (vidro)	Simples	T_VS
	Duplo	T_VD

Os casos apresentados na Figura 6 foram analisados para uma orientação sul. Para o caso O_VD foram analisadas outras orientações: SE, E, NE, N, NO, O e SO.

Utilizaram-se os modelos descritos anteriormente para a aplicação do método SLR. Para a aplicação do método integrado, utilizaram-se modelos semelhantes, mas considerando sistemas de ganho direto (janelas) na fração da fachada não ocupada pela estufa²⁶.

5.1.2 Soluções construtivas

Os edifícios são construídos por paredes exteriores duplas cujo coeficiente de transmissão térmica global (U_g) é $0,506 \text{ W/m}^2\text{°C}$. O pavimento dos edifícios e das estufas tem um U_g de $1,549 \text{ W/m}^2\text{°C}$, englobando acabamento interior, enrocamento e betonilha de regularização (Moita, 2010; Santos & Matias, 2006). A cobertura dos edifícios é inclinada com isolamento contínuo sobre a esteira horizontal. É constituída por revestimento exterior descontínuo (telhas), revestimento interior e um desvão não habitado fortemente ventilado. O U_g da cobertura exposta é de $2,930 \text{ W/m}^2\text{°C}$. A cobertura semi-exposta engloba isolamento, uma esteira horizontal em laje maciça e revestimento do teto, sendo o U_g desta igual a $0,575$ (Santos & Matias, 2006).

Nos casos em que a superfície de contacto é uma parede considera-se que esta é constituída apenas por betão, com uma espessura de $0,020 \text{ m}$ e um U_g de $3,704 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

²⁵ No caso em que o material da superfície de contacto é vidro, este continua a ser do tipo simples, independentemente do tipo de vidro da estufa.

²⁶ Apenas aplicável aos casos de estufas com A_p/A_f igual a 30 e 70 %.

Para os casos para os quais foi analisado o método integrado, ou seja, casos com sistemas combinados de estufas e ganhos diretos, apenas existem vãos na fachada onde a estufa se encontra. Os vãos envidraçados dos edifícios são constituídos por vidro duplo incolor com fator solar (g_{\perp}) igual a 0,7 e por uma caixilharia de alumínio sem corte térmico (com 0,040 m de largura) cujo U_g é 5,881 W/m²/°C. As estufas são constituídas por vidro simples incolor com f_s igual a 0,819 ou por vidro duplo semelhante ao dos edifícios.

No Anexo G encontra-se um resumo das soluções construtivas adotadas, bem como das características térmicas dos materiais utilizados.

5.1.3 Ganhos internos, climatização e ventilação

Tendo por base os ganhos internos totais médios de um edifício passivo em Portugal sugeridos em Gonçalves & Brotas (2007b), consideraram-se ganhos internos totais de 4 W/m² contínuos ao longo de todo o dia, englobando os ganhos relativos aos ocupantes, aos equipamentos e à iluminação.

Os sistemas de aquecimento e arrefecimento são elétricos e funcionam continuamente ao longo de todo o dia. São sistemas ideais, ou seja, com COP igual a 1. Este facto permite que o valor das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento obtidos por simulação correspondam aos valores efetivamente necessários, e não a consumos elétricos dependentes do rendimento dos equipamentos utilizados.

As estufas e o sótão são espaços não ocupados, portanto, sem ganhos internos. A taxa de renovação de ar do edifício e da estufa é de 0,6 RPH e do sótão é de 5 RPH (Gonçalves & Brotas, 2007b).

5.2 Simulações efetuadas

Uma vez que se pretende fazer uma análise apenas para o período de aquecimento, as temperaturas de referência para aquecimento e arrefecimento utilizadas são ambas de 20 °C.

Fizeram-se simulações das necessidades de energia para aquecimento (Q_H) e arrefecimento (Q_C) das estufas/edifícios através do *software DesignBuilder/EnergusPlus*. Fizeram-se simulações mensais para o período de um ano. Uma vez que os modelos em estudo estão localizados em Portugal considerou-se que, por simplicidade, a duração da estação de aquecimento é a estação convencional de aquecimento portuguesa, isto é, os meses de outubro a maio.

Efetuar-se quatro simulações diferentes para cada conjunto edifício-estufa. As principais diferenças entre cada uma das simulações referem-se à existência ou não de sistema de arrefecimento, de ganhos internos e de ganhos solares. Na Tabela 4 encontram-se as diferenças entre cada simulação. Encontra-se também indicado se a simulação se aplica ao edifício, à estufa ou a ambos. As simulações 1 e 2 foram realizadas considerando a superfície de contacto adiabática²⁷. Nas simulações sem ganhos solares foram usados dados climáticos horários com valores de radiação nulos.

Para a determinação das correlações e posterior aplicação do método SLR, efetuou-se a simulação 3, para a obtenção das NEPA, não considerando sistemas de ganho direto. Para a aplicação do método integrado, efetuou-se uma simulação semelhante mas considerando sistemas de ganho direto.

Tabela 4 – Características das simulações efetuadas

Simulação	Sistema de aquecimento	Sistema de arrefecimento	Ganhos internos	Ganhos solares	Superfície adiabática	Resultados da simulação
1 (edifício)	Sim	Sim	-	-	Sim	Q_H^1 e Q_C^1
1 (estufa)	Sim	Sim	-	-	Sim	$Q_{H,s}^1$ e $Q_{C,s}^1$
2 (estufa)	Sim	Sim	-	Sim	Sim	$Q_{H,s}^2$ e $Q_{C,s}^2$
3 (edifício sem janelas)	Sim	-	-	Sim	-	Q_H^3 (método SLR)
3 (edifício com janelas)						Q_H^3 (método integrado)

²⁷ No caso das estufas do tipo B consideram-se adiabáticas as três superfícies de contacto.

Para a determinação dos parâmetros SHF e SLR , para cada um dos conjuntos edifício-estufa, realizaram-se as simulações 1, 2 e 3 para seis localizações portuguesas distintas: Bragança, Coimbra, Évora, Faro, Lisboa e Porto. Os resultados das simulações para as seis localizações geográficas foram utilizados para a determinação de uma única curva SLR.

5.2.1 Determinação de SHF e SLR (método SLR)

Determinou-se o parâmetro SHF a partir dos termos $Q_{ref,SLR}$ e $Q_{nd,SLR}$ através da equação (11). Para tal, obtiveram-se estes termos a partir dos resultados das simulações 1 e 3 através das equações (15) e (18), respetivamente.

Para a determinação do parâmetro SLR através da equação (14) é necessário determinar o calor absorvido pela estufa ($Q_{abs,SLR}$), o termo de transferência de calor entre a estufa e o exterior ($Q_{ht,s}$) e o coeficiente b_3 . Determinaram-se os termos $Q_{ht,s,SLR}$ e $Q_{abs,SLR}$ a partir dos resultados das simulações 1 e 2 através das equações (16) e (17), respetivamente.

Para a determinação do coeficiente b_3 combinaram-se as equações (13) e (38) e fez-se um ajuste matemático da equação resultante aos dados conhecidos:

$$SHF = 1 - b_1 \exp\left(b_2 \frac{Q_{abs,SLR} - b_3 LCR_s \cdot DD}{BLC \cdot DD}\right) \quad (42)$$

Para a obtenção dos coeficientes de correlação b_1 , b_2 e b_3 , ajustaram-se os dados à equação (42) pelo método *Least Absolute Residuals* (LAR) através do algoritmo *Trust-Region* utilizando-se o *software* MATLAB.

Inicialmente, juntaram-se as equações (13) e (14) e tentou fazer-se um ajuste com três variáveis $\left(\frac{Q_{abs,SLR}}{Q_{ref}}, \frac{Q_{ht,s,SLR}}{Q_{ref}}, SHF\right)$ em vez de duas ($Q_{abs,SLR}$ e SHF):

$$SHF = 1 - b_1 \exp\left(-b_2 \left(\frac{Q_{abs,SLR}}{Q_{ref}} - b_3 \frac{Q_{ht,s,SLR}}{Q_{ref}}\right)\right) \quad (43)$$

Esta alternativa foi abandonada uma vez que o ajuste não era viável para o número de casos analisados neste trabalho. Para o ajuste dos dados à equação (43) seria necessário fazer um ajuste não linear a uma superfície, e esse tipo de ajuste revela-se muito dependente da estimativa inicial dos coeficientes. Além disso, esta alternativa exige a realização de simulações para a determinação dos termos $Q_{ht,s,SLR}$ e Q_{ref} , que podem ser aproximados por parâmetros simples.

5.2.2 Sumário das simulações efetuadas

Na Tabela 5 encontra-se um sumário das simulações efetuadas para a determinação dos parâmetros η e γ , no âmbito da norma, e dos parâmetros SHF e SLR , no âmbito do método SLR. Encontram-se sumarizados, para cada simulação, os resultados obtidos e os termos calculados a partir desses resultados. Como explicado anteriormente, os resultados da simulação 1, relativos ao edifício, não foram utilizados.

Tabela 5 – Sumário das simulações efetuadas e respetivos resultados

Simulação	Resultados da simulação	Termos calculado	Método	
1 (estufa)	$Q_{h,s}^1$ e $Q_{c,s}^1$	$Q_{abs,SLR}$	SLR	integrado
2 (estufa)	$Q_{h,s}^2$ e $Q_{c,s}^2$		SLR	integrado
3	(edifício sem janelas)	$Q_{nd,SLR}^3$	SLR	-
	(edifício com janelas)	Q_{h}^3	-	integrado

6 Apresentação e discussão de resultados

6.1 Coeficientes de correlação

Para a determinação dos coeficientes de correlação b_1 , b_2 e b_3 que conduzissem a um menor erro na determinação das NEPA testaram-se diferentes constrangimentos nestes coeficientes, sendo que, para cada situação testada se avaliou o erro relativo entre as NEPA mensais determinadas através das curvas SLR e as obtidas através das simulações. Nesta avaliação, utilizaram-se os termos mensais de $Q_{abs,SLR}$, obtidos por simulações, para a determinação do parâmetro SLR.

Concluiu-se que, para todos os casos analisados, o erro mínimo era obtido quando o coeficiente b_3 da equação (42) era nulo. Assim, a equação (42) utilizada para o ajuste dos dados, foi simplificada, e em todos os casos, se utilizou a seguinte equação no ajuste dos dados:

$$SHF = 1 - b_1 \exp\left(-b_2 \frac{Q_{abs,SLR}}{BLC \cdot DD}\right) \quad (44)$$

Além disso, conclui-se, também, que se obtinham melhores resultados na obtenção das correlações se não fossem considerados os meses de março, abril e maio, para além dos meses de junho, julho, agosto e setembro, nunca considerados neste trabalho²⁸.

Na Figura 7 encontra-se, a título de exemplo, o ajuste feito à estufa A_70_30°, do tipo O_VS. As restantes curvas obtidas neste trabalho são semelhantes, como se apresenta na Figura 8.

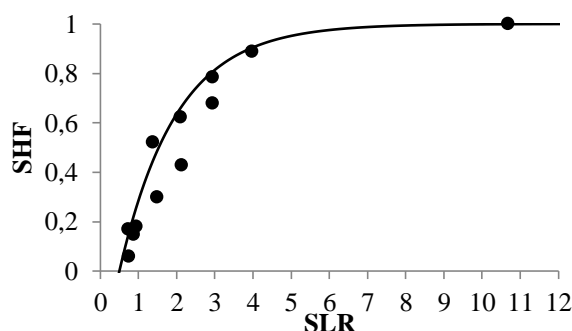


Figura 7 – Ajuste matemático realizado a uma estufa anexa com área projetada na fachada é 70 % e cujo ângulo de inclinação do seu vidro superior é 30° e cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituída por vidro simples (estufa A_70_30°, do tipo O_VS)

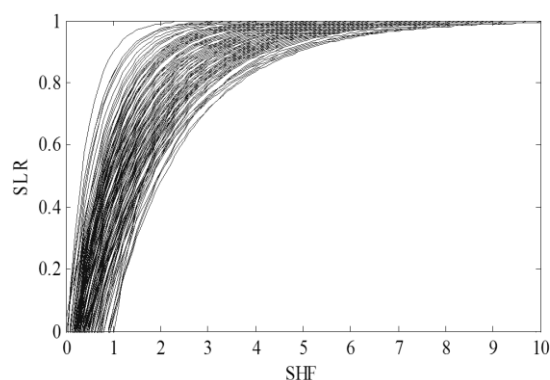


Figura 8 – Curvas de correlação SLR obtidas para todos os casos

²⁸ Em Oliveira & Fernandes (1992) são apresentados resultados relativos à aplicação do método SLR, a um sistema de ganhos diretos, num clima português, em que apenas são considerados 5 meses de aquecimento.

Na Tabela 6 encontram-se os coeficientes b_1 e b_2 , relativos às estufas do tipo O_VS, obtidos através do ajuste da equação (44) aos dados simulados, e os respetivos coeficiente de determinação, r^2 , e desvio padrão. No Anexo H encontram-se os valores de todos os coeficientes obtidos neste trabalho.

Tabela 6 – Coeficientes b_1 e b_2 e r^2 : estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro simples (casos do tipo O_VS)

Estufa	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)
A_70_30°	1,400	0,673	0,840	0,137
A_70_60°	1,503	0,654	0,983	0,043
A_70_90°	1,486	0,599	0,983	0,044
A_30_30°	1,204	0,876	0,897	0,094
A_30_60°	1,189	0,724	0,890	0,095
A_30_90°	1,195	0,681	0,873	0,100
B_70_30°	1,405	0,735	0,870	0,133
B_70_60°	1,421	0,677	0,854	0,133
B_70_90°	1,535	0,710	0,853	0,138
B_30_30°	1,343	1,289	0,978	0,046
B_30_60°	1,392	1,200	0,979	0,046
B_30_90°	1,412	1,148	0,980	0,045
AB_100_30°	2,167	0,855	0,823	0,143
AB_100_60°	1,857	0,671	0,882	0,118
AB_100_90°	1,712	0,596	0,880	0,120

Quando o valor mensal das NEPA determinado através das simulações é inferior a 50 kWh ($0,5 \text{ kWh/m}^2$), o valor das necessidades de energia estimado através das curvas SLR pode ser excessivamente sobrestimado, conduzindo a erros próximos de 100 %, sendo que, quando este é inferior a 20 kWh, os erros são superiores a 100 %. Esta última situação ocorre apenas para alguns casos, para a localização de Faro e, ocasionalmente, Lisboa, no mês de outubro. Assim, esses casos não foram tidos em consideração na avaliação da qualidade do método e do seu erro.

A média dos erros relativos determinados para todos os casos analisados é 16 %, sendo o desvio padrão médio 23 %. Quando se analisa a média dos valores absolutos dos erros, estes valores são ligeiramente superiores: 26 e 30 %, respetivamente.

Esta análise preliminar dos erros, permite concluir que, na determinação das NEPA, as próprias correlações serão uma fonte de erro não desprezável.

Relativamente à qualidade das correlações, verifica-se que, para todos os casos analisados²⁹, o coeficiente r^2 varia entre 0,78 e 0,99, e o desvio padrão entre 0,04 e 0,22, sendo este, superior para as estufas com maior valor de A_p/A_f . A média do coeficiente r^2 é 0,895 e do desvio padrão 0,096 kWh. Considerando apenas os casos analisados para a orientação sul, o coeficiente r^2 varia entre 0,78 e 0,98 e o desvio padrão entre 0,04 e 0,16. Este facto indica que as correlações obtidas para orientações diferentes de sul se ajustam igualmente bem³⁰.

6.1.1 Variação dos coeficientes de correlação

A variação dos coeficientes de correlação com as características construtivas da estufa (o seu tipo de vidro e o material da superfície de contacto), é pouco significativa quando comparada com a sua variação com as características geométricas (A_p/A_f e θ_v).

²⁹ Excluiu-se apenas o caso da estufa A_70_30° do tipo O_VD.

³⁰ Na determinação das NEPA dos casos com orientações diferentes de sul (SE, E, NE, N, NO, O e NO), verificou-se que as NEPA dos edifícios com as seguintes orientações eram idênticas entre si: SE e SO, E e O, e NE e NO. Assim, neste trabalho consideram-se apenas quatro orientações diferentes em vez de seis: SE/SO, E/O, NE/NO e N.

A variação dos coeficientes de correlação com as características construtivas das estufas é mais acentuada nos casos AB_100.

Para os restantes casos, pode concluir-se que, o tipo de superfície de contacto influencia essencialmente o coeficiente b_1 , sendo este pouco influenciado pelo tipo de vidro da estufa. No caso do coeficiente b_2 verifica-se a situação inversa, sendo este mais influenciado pelo tipo de vidro da estufa. Assim, para os casos A_30, A_70, B_30 e B_70, os coeficientes b_1 das estufas dos tipos O_VS e O_VD são semelhantes, assim como os das estufas dos tipos T_VS e T_VD. Relativamente aos coeficientes b_2 , estes são semelhantes nas estufas dos tipos O_VS e T_VS, assim como nas estufas dos tipos O_VD e T_VD. O coeficiente b_1 obtido para estufas do tipo O_VD difere dos coeficientes obtidos para estufas do tipo O_VS em média em cerca de 4 %, sendo a sua variação média inferior a 1 % entre os casos dos tipos T_VS e T_VD. Quanto ao coeficiente b_2 , o obtido para estufas do tipo T_VS difere dos coeficientes obtidos para estufas do tipo O_VS em média em cerca de 1 %, variando, em média, cerca de 2 % entre as estufas dos tipos T_VS e T_VD.

Em alguns casos, para um determinado valor de A_p/A_f , a variação dos coeficientes b_1 e b_2 com θ_v apresenta uma relação linear. Desta situação, excluem-se os casos do tipo AB_100, para ambos os coeficientes. Na Figura 9 apresenta-se um exemplo desta situação, relativamente ao coeficiente b_1 e na Figura 10, relativamente ao coeficiente b_2 .

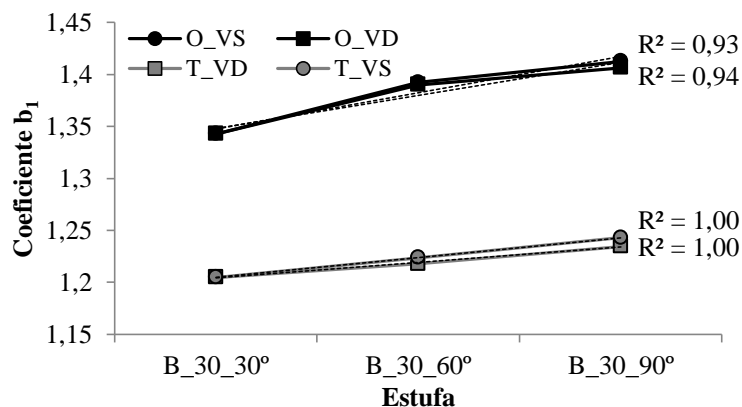


Figura 9 – Variação do coeficiente b_1 com θ_v : estufas integradas cuja fração da área projetada na fachada do edifício é 30 % (casos do tipo B_30)

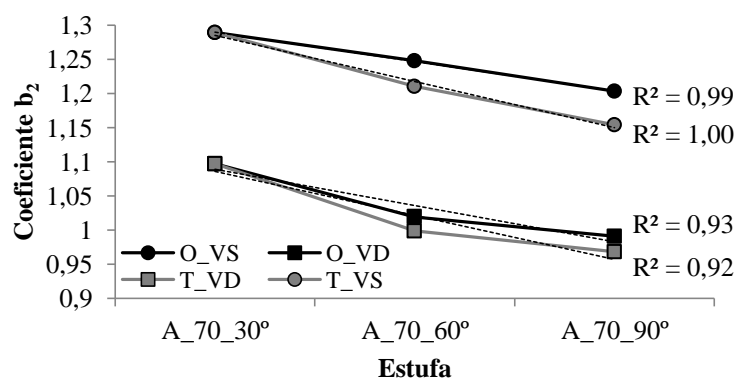


Figura 10 – Variação do coeficiente b_2 com θ_v : estufas anexas cuja fração da área projetada na fachada do edifício é 70 % (casos do tipo A_70)

6.2 Necessidades de energia para aquecimento

Foram determinadas as NEPA dos edifícios para todos os casos descritos no capítulo 5. Determinaram-se as NEPA através do método SLR aplicado mensalmente (capítulo 4.2), do método SLR aplicado anualmente (capítulo 4.3) e do método integrado (capítulo 4.4).

6.2.1 Método mensal

Determinaram-se as NEPA mensais, segundo o método descrito no capítulo 4.2, para todos os casos descritos no capítulo 5, não considerando sistemas de ganho direto.

Devido à aproximação do termo $Q_{abs,SLR}$, referida no capítulo 4.2, os erros cometidos na sua determinação são excessivamente elevados. A aproximação utilizada considera que o calor absorvido pela estufa, posteriormente utilizável para aquecer o edifício, é equivalente ao calor transmitido para o seu interior. Este facto não corresponde à realidade, uma vez que apenas parte do calor absorvido pelas suas superfícies absorvedoras corresponde ao calor útil. Desta forma, o valor de $Q_{abs,SLR}$ é sobrestimando em todos os casos. Além disso, também é feita uma aproximação em relação à inclinação da superfície de contacto, sendo apenas consideradas superfícies verticais e horizontais.

Verificou-se uma relação linear entre os valores de $Q_{abs,SLR}$ determinados por simulação e os determinados pelo método descrito no capítulo 4.2. Assim, por forma a diminuir o erro cometido na sua determinação, determinou-se, para cada estufa, um fator corretivo do termo $Q_{abs,SLR}$. Determinou-se esse fator com base na relação linear existente, sendo este igual ao declive da reta obtida, como se ilustra na Figura 11, para o caso da estufa A_70_90° do tipo O_VS. Na Figura 12 apresentam-se os fatores corretivos obtidos para todos os casos analisados.

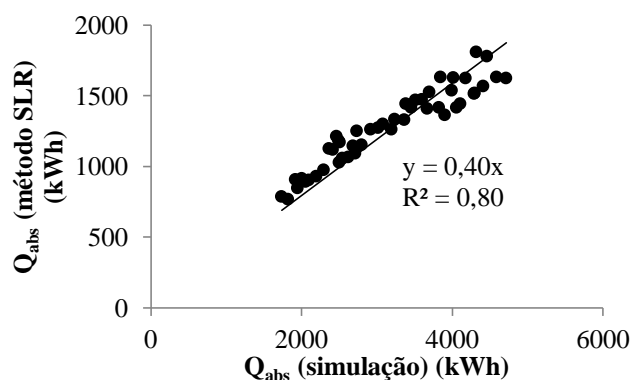


Figura 11 – Fator corretivo do termo Q_{abs}

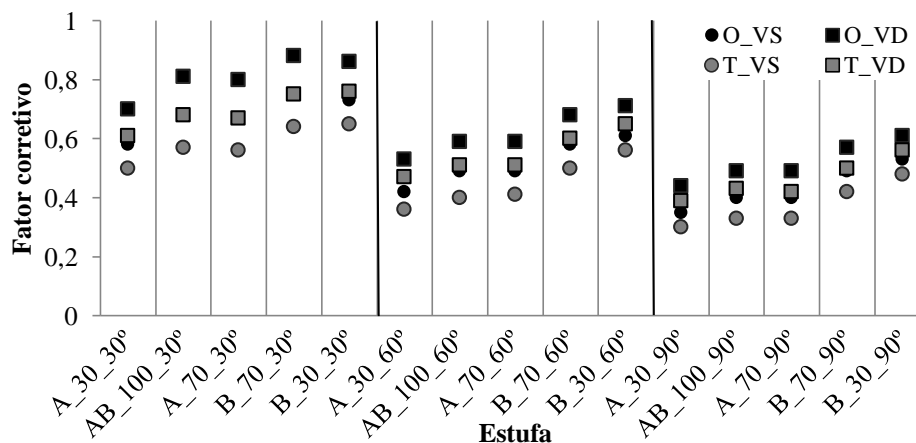


Figura 12 – Fatores corretivos do termo Q_{abs} para todos os casos analisados

Os fatores corretivos da radiação, obtidos para todos os casos, variam entre 0,30 e 0,88. Como era de esperar, devido à aproximação feita em relação à inclinação do vidro superior da estufa, θ_v , este é o parâmetro que mais influência tem. No entanto, verifica-se, também, que este fator varia com o tipo de estufa, sendo superior para as estufas do tipo B. A sua variação com A_p/A_f é reduzida.

Relativamente ao erro cometido na determinação mensal das NEPA, verifica-se que este varia consoante o clima. No entanto, é possível observar-se que, para um determinado clima, o erro varia bastante ao longo do ano, apresentando uma variação semelhante para a maioria dos casos.

Os casos analisados para o clima de Bragança apresentam um comportamento ligeiramente diferente dos casos analisados para os restantes climas. Para estes casos, de uma forma geral, o erro cometido na determinação mensal das NEPA é mais elevado nos meses de novembro a janeiro, sendo este sobrestimado. Nos meses de fevereiro a maio, o valor mensal as NEPA é subestimado, e o erro cometido na sua determinação é inferior.

Para os restantes climas analisados, de uma forma geral, os erros são mais elevados nos meses de abril e maio. O valor mensal das NEPA é subestimado nos meses de fevereiro a maio, sendo sobrestimado nos meses de novembro a janeiro. Apenas os casos de estufas do tipo AB_100_30° apresentam um comportamento diferente, sendo nestes casos, o valor das NEPA sempre sobrestimado e apresentando erros menores nos meses de fevereiro a maio.

Mensalmente, o erro cometido na determinação das NEPA, varia, sobretudo, com a inclinação do vidro superior da estufa.

Na Tabela 7 encontram-se, a título de exemplo, os erros mensais cometidos na determinação das NEPA para três casos distintos de estufas do tipo O_VD, para o clima de Bragança. Os erros médios anuais, apresentados na Tabela 7, são concordantes com os erros obtidos para os mesmos casos analisados para os restantes climas.

Tabela 7 – Necessidades mensais de energia para aquecimento: estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro duplo, analisadas para o clima de Bragança (casos do tipo O_VD)

Mês	A_30_90°			A_70_90°			AB_100_90°		
	Q_{nd} (kWh)		Erro (%)	Q_{nd} (kWh)		Erro (%)	Q_{nd} (kWh)		Erro (%)
	Simulação	Mét. SLR		Simulação	Mét. SLR		Simulação	Mét. SLR	
Janeiro	1723	2217	29	2010	2224	11	1415	2082	47
Fevereiro	1585	1509	-5	1857	1519	-18	1237	1239	0
Março	1225	764	-38	1700	849	-50	782	442	-43
Abril	1216	742	-39	1567	664	-58	762	344	-55
Mai	479	136	-72	843	111	-87	140	18	-87
Outubro	105	141	34	254	215	-16	51	55	7
Novembro	738	1314	78	997	1354	36	560	1109	98
Dezembro	1335	1864	40	1557	1870	20	1092	1733	59
Anual	8407	8687	3	10785	8807	-18	6039	7022	16

Para os três casos apresentados na Tabela 7, a média dos valores absolutos dos erros mensais, é de cerca de 39 %. Os erros cometidos na determinação mensal das NEPA são relativamente elevados. No entanto, a sua determinação anual apresenta erros mais aceitáveis. Para os casos referidos na Tabela 7, a média dos valores absolutos dos erros cometidos na determinação anual das NEPA é 12 %.

Na Figura 13, encontra-se a média dos erros mensais de todos os casos analisados para o clima de Bragança.

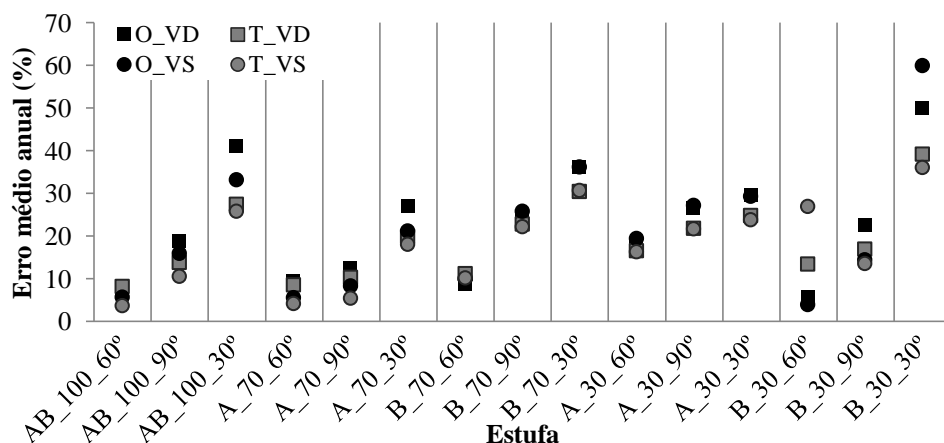


Figura 13 – Média dos erros mensais, cometidos na determinação das necessidades de energia para aquecimento através da aplicação mensal do método SLR (Bragança)

Os valores apresentados na Figura 13 referem-se aos casos analisados para o clima de Bragança, no entanto, este padrão repete-se para os restantes climas analisados.

Observa-se que, o erro cometido na determinação das NEPA é superior para os casos das estufas cujo θ_v é 30°. Esta situação deve-se ao facto do vidro superior deste tipo de estufa ser considerado uma superfície vertical na aproximação feita no cálculo do termo $Q_{abs,SLR}$.

Em termos nas NEPA anuais, ou seja, a soma das necessidades mensais, o padrão de erros é semelhante, como é apresentado na Figura 14. Na Tabela 8 são apresentados, como exemplo, os valores das NEPA anuais, calculados pelo método SLR e por simulação, para as estufas do tipo O_VS, para o clima do Porto. No Anexo I encontram-se tabelados os valores dos erros anuais obtidos para todos os casos analisados.

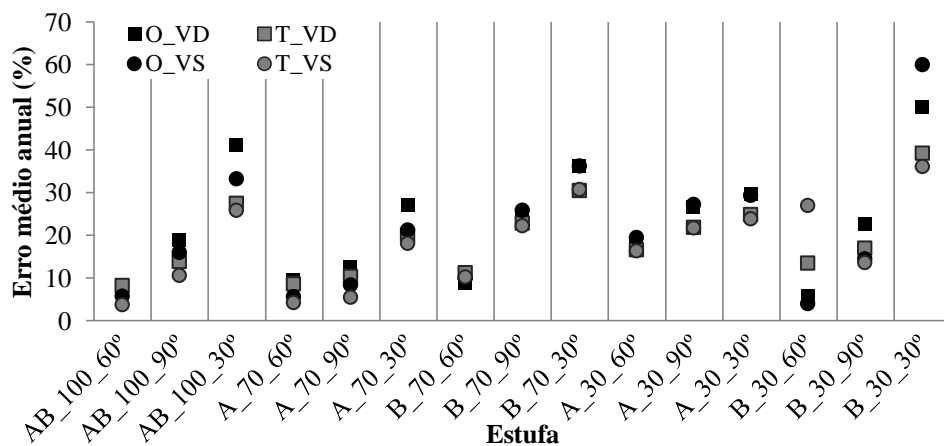


Figura 14 – Erro anual cometido na determinação das necessidades anuais de energia para aquecimento através da aplicação mensal do método SLR (Bragança)

Tabela 8 – Necessidades de energia para aquecimento anuais, determinadas através da aplicação mensal do método SLR, das estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro simples, analisadas para o clima do Porto (casos do tipo O_VS)

Estufa	Q_{nd} (kWh)		Erro (%)
	Método SLR	Simulação	
AB_100_30°	9547	6452	48
AB_100_60°	6567	7631	-14
AB_100_90°	8172	8176	0
A_70_30°	9871	9615	3
A_70_60°	7773	10486	-26
A_70_90°	9227	10840	-15
B_70_30°	9803	9181	7
B_70_60°	7914	9863	-20
B_70_90°	9658	10201	-5
A_30_30°	10898	11508	-5
A_30_60°	9377	11862	-21
A_30_90°	9831	11986	-18
B_30_30°	11111	11122	0
B_30_60°	9955	11261	-12
B_30_90°	10945	11346	-4

Conclui-se que, a determinação anual das NEPA, através da aplicação mensal do método SLR é viável, embora, para alguns casos analisados para o clima de Faro, o erro seja demasiado elevado.

De uma forma geral, para as estufas dos tipos A e B, o erro cometido na determinação anual das NEPA varia, sobretudo com o clima. Assim, de uma forma geral, o valor anual das NEPA é sobrestimado para os casos analisados para o clima de Bragança, sendo subestimado nos casos analisados para os restantes climas. Verifica-se que os casos analisados para o clima de Faro apresentam erros ligeiramente superiores. Este facto é favorável à aplicação do método, uma vez que este clima é o menos frio, e portanto, é o clima cujos edifícios necessitam menos da implementação de estufas.

Para as estufas do tipo AB_100, na determinação do valor anual das NEPA, o tipo de estufa tem uma influência superior à do clima. Nestes casos, o valor anual das NEPA é subestimado para as estufas cujo θ_v é 60°, sendo sobrestimado para as estufas com θ_v igual a 30° e 90°. É de salientar que, em termos absolutos, o erro obtido para as estufas com θ_v igual a 30° é, em média, cerca de 40 pontos percentuais superior. Este facto deve-se à aproximação feita para este tipo de estufas, já referida anteriormente.

Considerando todos os casos analisados, para os seis climas, em termos absolutos, o erro anual é inferior a 50 % em 95 % dos casos, sendo inferior a 30 % em 78 % dos casos. A média do erro anual obtida para todos os casos analisados é de 20 % e o desvio padrão é 16 %. Na Tabela 9 encontra-se o erro anual obtido para as estufas do tipo A, na Tabela 10 para as estufas do tipo B e na Tabela 11 para as estufas do tipo AB. No Anexo I encontram-se tabelados os valores absolutos dos erros apresentados nessas tabelas.

Tabela 9 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)

	Tipo de estufa	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°
Bragança	O_VS	33%	6%	16%	21%	6%	8%
	O_VD	41%	8%	19%	27%	9%	12%
	T_VD	27%	8%	14%	20%	8%	10%
	T_VS	26%	4%	11%	18%	4%	5%
Coimbra	O_VS	0%	-30%	-18%	-7%	-23%	-20%
	O_VD	1%	-30%	-17%	-4%	-22%	-19%
	T_VD	-1%	-22%	-14%	-6%	-19%	-17%
	T_VS	-2%	-25%	-17%	-8%	-23%	-22%
Évora	O_VS	2%	-28%	-17%	-6%	-23%	-20%
	O_VD	3%	-28%	-16%	-4%	-22%	-18%
	T_VD	1%	-20%	-13%	-5%	-18%	-16%
	T_VS	0%	-24%	-16%	-7%	-23%	-22%
Faro	O_VS	-28%	-56%	-46%	-34%	-48%	-45%
	O_VD	-55%	-71%	-63%	-50%	-62%	-59%
	T_VD	-27%	-46%	-39%	-31%	-43%	-42%
	T_VS	-28%	-49%	-42%	-33%	-48%	-46%
Lisboa	O_VS	-11%	-39%	-27%	-16%	-31%	-28%
	O_VD	21%	-19%	-4%	6%	-16%	-11%
	T_VD	-11%	-30%	-23%	-15%	-27%	-25%
	T_VS	-12%	-34%	-26%	-17%	-31%	-30%
Porto	O_VS	3%	-26%	-15%	-5%	-21%	-18%
	O_VD	5%	-25%	-14%	-2%	-20%	-16%
	T_VD	1%	-19%	-13%	-5%	-17%	-15%
	T_VS	-1%	-23%	-16%	-7%	-21%	-20%

Tabela 10 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30)

	Tipo de estufa	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
Bragança	O_VS	36%	10%	26%	29%	19%	27%
	O_VD	36%	9%	24%	30%	18%	26%
	T_VD	30%	11%	23%	25%	17%	22%
	T_VS	31%	10%	22%	24%	16%	22%
Coimbra	O_VS	4%	-23%	-7%	-2%	-14%	-5%
	O_VD	4%	-24%	-9%	-2%	-16%	-7%
	T_VD	4%	-20%	-7%	-2%	-12%	-6%
	T_VS	4%	-20%	-6%	-3%	-12%	-5%
Évora	O_VS	8%	-21%	-6%	-1%	-13%	-5%
	O_VD	7%	-21%	-6%	-1%	-15%	-6%
	T_VD	7%	-18%	-4%	-1%	-11%	-5%
	T_VS	7%	-18%	-4%	-2%	-11%	-5%
Faro	O_VS	-23%	-48%	-36%	-33%	-43%	-36%
	O_VD	-23%	-48%	-36%	-33%	-45%	-37%
	T_VD	-21%	-45%	-33%	-29%	-38%	-32%
	T_VS	-20%	-45%	-32%	-30%	-38%	-32%
Lisboa	O_VS	-8%	-33%	-19%	-14%	-25%	-17%
	O_VD	-8%	-34%	-20%	-14%	-27%	-18%
	T_VD	-7%	-30%	-18%	-13%	-22%	-16%
	T_VS	-7%	-30%	-17%	-14%	-22%	-16%
Porto	O_VS	7%	-20%	-5%	0%	-12%	-4%
	O_VD	7%	-21%	-6%	0%	-13%	-5%
	T_VD	5%	-17%	-5%	-1%	-10%	-5%
	T_VS	6%	-18%	-5%	-2%	-10%	-4%

Tabela 11 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas cuja fração de área projetada na fachada é 100 % (casos AB_100)

	Tipo de estufa	AB_100_30°	AB_100_60°	AB_100_90°
Bragança	O_VS	60%	4%	14%
	O_VD	50%	6%	22%
	T_VD	39%	13%	17%
	T_VS	36%	27%	14%
Coimbra	O_VS	49%	-16%	1%
	O_VD	44%	-15%	7%
	T_VD	26%	-5%	9%
	T_VS	38%	-12%	1%
Évora	O_VS	66%	-8%	8%
	O_VD	61%	-6%	16%
	T_VD	54%	5%	19%
	T_VS	53%	-2%	10%
Faro	O_VS	91%	-18%	3%
	O_VD	97%	-14%	13%
	T_VD	67%	-8%	17%
	T_VS	69%	-36%	0%
Lisboa	O_VS	62%	-14%	5%
	O_VD	58%	-12%	12%
	T_VD	35%	-1%	16%
	T_VS	51%	-15%	6%
Porto	O_VS	48%	-14%	0%
	O_VD	42%	-12%	7%
	T_VD	35%	-3%	7%
	T_VS	34%	-5%	1%

Relativamente à aplicação da expressão de correlação apresentada na equação (13), desenvolvida para estufas com uma superfície de contacto opaca, pode concluir-se que a expressão pode ser utilizada para estufas com uma superfície de contacto transparente, sem que o erro cometido sofra grandes alterações relativamente às situações equivalentes com uma superfície de contacto opaca. Embora os casos do tipo T_VS e O_VS não sejam comparáveis, assim como os casos do tipo T_VD e O_VD, verifica-se que, na maioria dos casos analisados, o erro dos casos T_VD e T_VS é inferior ao dos casos O_VD e O_VS, respetivamente. Em média, o valor absoluto do erro obtido para as estufas dos tipos T_VS e T_VD é cerca de 3 pontos percentuais inferior ao valor obtido para estufas dos tipos O_VS e O_VD.

6.2.1.1 Método SLR aplicado a outras orientações

Aplicou-se o método SLR a orientações diferentes de sul (SE/SO, E/O, NE/NO e N) utilizando três métodos distintos para a obtenção das NEPA: métodos A, B e C. Para cada um dos métodos testados, as NEPA foram determinadas através da modificação do parâmetro SHF , de modo a este incorporar informação relativa à orientação da estufa.

No método A, o parâmetro SHF foi modificado indiretamente através do parâmetro SLR . Para tal, determinou-se o termo $Q_{abs,SLR}$ utilizando a equação (40), e considerou-se o valor da radiação incidente em cada uma das superfícies da estufa. Assim, por exemplo, para a determinação das NEPA de um edifício cuja estufa esteja orientada a SE, consideram-se os coeficientes de correlação de uma estufa idêntica, orientada a sul, e determina-se o termo $Q_{abs,SLR}$ tendo em conta que a estufa está orientada a SE.

No método B, o parâmetro SHF foi diretamente modificado simplesmente através da utilização dos coeficientes de correlação determinados para outras orientações (Anexo H). Assim, neste caso, considerando o exemplo anterior, consideram-se os coeficientes de correlação da estufa existentes para a orientação SE, e o termo $Q_{abs,SLR}$ é determinado tendo em conta que a estufa está orientada a sul.

Por fim, no método C, conjugaram-se os métodos A e B, ou seja, consideram-se os coeficientes de correlação obtidos para a orientação considerada e determina-se o termo $Q_{abs,SLR}$ tendo também em consideração a orientação considerada. É expectável que este método seja o que conduza aos erros mais baixos.

Estes três métodos são equivalentes em termos de facilidade de aplicação, no entanto os métodos A e C exigem o conhecimento da radiação mensal incidente em superfícies com várias orientações.

Tabela 12 – Cálculo de SHF para a aplicação do método SLR a várias orientações

Método	Parâmetro SHF modificado através de
A	$Q_{abs,SLR}$
B	Coefficientes
C	$Q_{abs,SLR} +$ Coeficientes

Este estudo apenas foi efetuado para as estufas do tipo O_VD, para o clima de Bragança. Na Tabela 13 é apresentado um exemplo onde se compara o valor das NEPA obtido para o caso A_70_30°, para várias orientações, através da aplicação dos métodos A, B e C, com o valor das NEPA obtido através de simulações. No Anexo L encontram-se os erros obtidos para todos os casos analisados, apresentando-se, na Tabela 14, a média dos valores absolutos dos erros obtidos para os diferentes casos.

Tabela 13 – Necessidades de energia para aquecimento para várias orientações: estufa anexa cuja fração de área projetada na fachada é 70 % e o ângulo de inclinação do seu vidro superior é 30° (caso A_70_30°) (kWh)

Orientação		SE/SO	E/O	NE/NO	N
Método	A	14599	15791	17503	18148
	B	14266	13205	12272	11897
	C	14020	13990	14549	14773
	Simulação	13768	14282	14810	14967

Tabela 14 – Média do valor absoluto dos erros cometidos pela aplicação do método SLR a várias orientações

Orientação	S	SE/SO			E/O			NE/NO			N		
Método	-	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Erro (%)	25	19	16	13	21	7	7	28	20	6	32	28	10

O erro médio cometido pela aplicação do método SLR a orientações diferentes de sul é próximo do erro cometido pela aplicação do método a uma orientação sul, sendo até, em alguns casos, inferior a este. O método C é o que apresenta o menor erro médio para os casos e orientações considerados, sendo que, o erro cometido por este método nunca é superior ao erro cometido pela aplicação do método a uma orientação sul.

Apesar do método C ser o método que apresenta menores erros, os erros cometidos pelo método B são equivalentes aos cometidos pela aplicação do método a uma orientação sul, o que permite a determinação das NEPA de edifícios cuja estufa não esteja orientada a sul, sem a necessidade de utilização de valores de radiação incidente nas várias superfícies da estufa.

Assim, pode concluir-se que, as NEPA de um edifício com uma estufa com uma determinada orientação, podem ser determinadas de forma idêntica à do método aplicado a uma orientação sul, através do método B, sem que os erros cometidos na sua determinação sejam afetados.

6.2.2 Método anual

Aplicou-se o método SLR anualmente aos mesmos casos considerados na sua aplicação mensal.

A aplicação do método SLR anual é bastante mais simples que a sua aplicação mensal e, neste caso, é feita uma aproximação adicional considerando-se que a duração da estação de aquecimento é igual a 8 meses, independentemente do clima analisado. Além disso, o método SLR foi desenvolvido para ser aplicado mensalmente. Assim, era expectável que os erros cometidos na sua aplicação anual fossem superiores aos cometidos na sua aplicação mensal. Ainda assim, em 20 % dos casos analisados a média do erro cometido pela aplicação do método anual, é, em termos absolutos, inferior à do erro cometido pela sua aplicação mensal. Esta situação verifica-se, essencialmente, para os casos analisados para o clima de Faro e para as estufas do tipo AB_100_30°.

Na Tabela 15 comparam-se os valores das NEPA anuais obtidos pela aplicação anual do método SLR com as obtidas por simulação dinâmica, para os mesmos casos apresentados na Tabela 7. No Anexo J encontram-se os erros de todos os casos analisados.

Tabela 15 – Necessidades de energia para aquecimento anuais determinadas pela aplicação anual do método SLR: estufas cuja superfície de contacto com o edifício é opaca, constituídas por vidro duplo, analisadas para o clima de Bragança (casos do tipo O_VD)

A_30_90°			A_70_90°			AB_100_90°		
Q_{nd} (kWh)		Erro (%)	Q_{nd} (kWh)		Erro (%)	Q_{nd} (kWh)		Erro (%)
Simulação	Mét. SLR	(%)	Simulação	Mét. SLR	(%)	Simulação	Mét. SLR	(%)
14585	7023	-52	12515	5905	-53	12537	5186	-59

A média, em valor absoluto, dos erros anuais obtidos para todos os casos pela aplicação do método SLR anualmente, é superior à obtida pela sua aplicação mensal, sendo esta igual a 39 % (e o desvio padrão 25 %).

Para os casos A e B, a variação dos erros cometidos na determinação anual das NEPA, tanto com o tipo de estufa, como com o clima, é bastante inferior à variação verificada na aplicação mensal do método. Para estes casos, os erros mais elevados são obtidos para os casos analisados para os climas de Bragança e Porto, especialmente para o clima de Bragança. Este facto é bastante desfavorável, uma vez que estes são os climas mais frios e, portanto, os climas cujos edifícios necessitam mais da implementação de estufas. Contrariamente ao observado na aplicação mensal do método, os casos analisados para o clima de Faro são os que apresentam erros inferiores.

Os erros dos casos AB_100 apresentam uma variação diferente da observada para os casos A e B, sendo esta, também diferente da observada na aplicação mensal do método. Para estes casos, o erro cometido na determinação anual das NEPA varia essencialmente com o clima, e não com o tipo de estufa, como se verifica na aplicação mensal do método. Em termos absolutos, os erros mais elevados são obtidos para os climas de Bragança, Faro e Porto, sendo que, os erros obtidos para o clima de Faro são excessivamente elevados, inviabilizando a aplicação do método anual para este clima. Apesar disso, o erro cometido na determinação das NEPA é inferior a 50 % em 77 % dos casos analisados e inferior a 30 % em 24 % dos casos.

Excluindo os casos do tipo AB_100 analisados para o clima de Faro, a média do erro cometido pela aplicação deste método e o desvio padrão são reduzidos para 37 % e 16 %, respetivamente. Neste caso, 79 % dos casos apresentam um erro inferior a 50 % e apenas 25 % dos casos apresentam um erro inferior a 30 %. Na Tabela 16 encontra-se o erro anual obtido para as estufas do tipo A, na Tabela 17 para as estufas do tipo B e na Tabela 18 para as estufas do tipo AB. No Anexo J encontram-se tabelados os valores absolutos dos erros apresentados nas tabelas referidas.

Tal como se observa nas tabelas referidas no parágrafo anterior, este método tem tendência para subestimar o valor das NEPA, com a exceção dos casos do tipo AB analisados para o clima de Faro. Este facto não se deve à diminuição do termo $Q_{abs,SLR}$ através da utilização do fator corretivo.

Sem a utilização desse fator, o valor anual das NEPA seria ainda mais subestimado, sendo, o valor absoluto dos erros, ainda mais elevado.

A variação do erro obtido com o tipo de estufa é diferente da observada na aplicação mensal do método (Figura 14), tal como se observa na Figura 15, para o caso de Bragança. A situação apresentada na Figura 15 reflete os casos analisados para os restantes climas. Contrariamente ao obtido na aplicação mensal do método, na aplicação anual os erros mais baixos são obtidos para as estufas com θ_v igual a 30°.

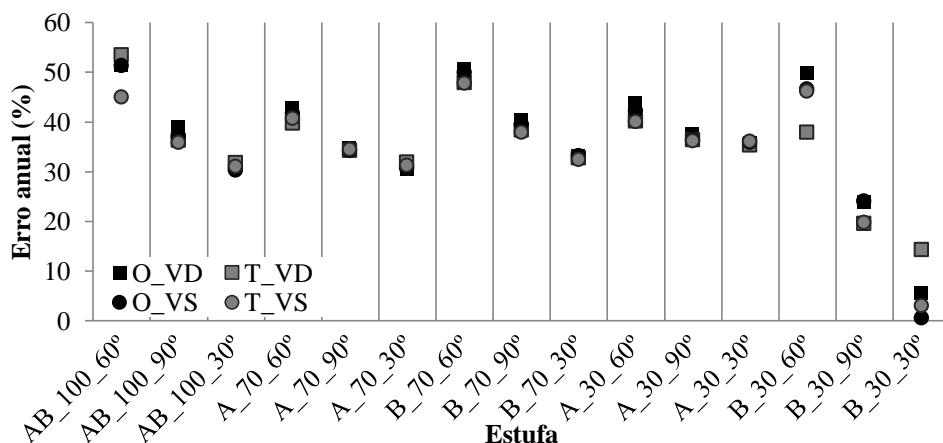


Figura 15 – Erro anual cometido na determinação das necessidades anuais de energia para aquecimento através da aplicação anual do método SLR (Bragança)

Tabela 16 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)

		Tipo de estufa	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°
Bragança	O_VS		-52%	-66%	-56%	-49%	-57%	-52%
	O_VD		-53%	-68%	-58%	-49%	-58%	-52%
	T_VD		-53%	-62%	-56%	-50%	-56%	-52%
	T_VS		-52%	-62%	-55%	-50%	-56%	-52%
Coimbra	O_VS		-30%	-51%	-37%	-31%	-42%	-34%
	O_VD		-32%	-54%	-39%	-30%	-43%	-35%
	T_VD		-32%	-45%	-36%	-32%	-40%	-34%
	T_VS		-31%	-46%	-36%	-31%	-41%	-35%
Évora	O_VS		-29%	-51%	-37%	-31%	-42%	-35%
	O_VD		-31%	-53%	-39%	-30%	-43%	-35%
	T_VD		-31%	-44%	-36%	-32%	-40%	-34%
	T_VS		-30%	-46%	-35%	-31%	-41%	-35%
Faro	O_VS		5%	-30%	-10%	-8%	-24%	-14%
	O_VD		-31%	-53%	-39%	-30%	-43%	-35%
	T_VD		1%	-20%	-9%	-10%	-21%	-14%
	T_VS		1%	-23%	-9%	-10%	-23%	-15%
Lisboa	O_VS		-23%	-47%	-31%	-26%	-38%	-30%
	O_VD		4%	-31%	-12%	-7%	-25%	-14%
	T_VD		-25%	-40%	-31%	-27%	-36%	-30%
	T_VS		-25%	-41%	-30%	-27%	-37%	-30%
Porto	O_VS		-37%	-56%	-43%	-37%	-47%	-40%
	O_VD		-38%	-58%	-45%	-36%	-48%	-40%
	T_VD		-38%	-50%	-42%	-38%	-45%	-40%
	T_VS		-37%	-51%	-42%	-37%	-46%	-40%

Tabela 17 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30)

	Tipo de estufa	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
Bragança	O_VS	-55%	-66%	-59%	-54%	-59%	-55%
	O_VD	-55%	-67%	-60%	-54%	-60%	-55%
	T_VD	-54%	-65%	-58%	-53%	-57%	-54%
	T_VS	-54%	-65%	-58%	-54%	-57%	-54%
Coimbra	O_VS	-33%	-50%	-39%	-36%	-42%	-36%
	O_VD	-33%	-51%	-40%	-36%	-44%	-37%
	T_VD	-33%	-48%	-38%	-35%	-40%	-36%
	T_VS	-32%	-48%	-38%	-36%	-40%	-36%
Évora	O_VS	-32%	-49%	-39%	-36%	-42%	-37%
	O_VD	-32%	-50%	-40%	-36%	-44%	-37%
	T_VD	-31%	-47%	-37%	-35%	-40%	-36%
	T_VS	-31%	-47%	-37%	-36%	-40%	-36%
Faro	O_VS	7%	-23%	-8%	-13%	-21%	-13%
	O_VD	7%	-23%	-8%	-12%	-23%	-15%
	T_VD	3%	-21%	-7%	-12%	-18%	-13%
	T_VS	3%	-21%	-7%	-13%	-18%	-13%
Lisboa	O_VS	-26%	-45%	-33%	-31%	-38%	-32%
	O_VD	-26%	-45%	-34%	-31%	-39%	-33%
	T_VD	-26%	-43%	-32%	-31%	-36%	-32%
	T_VS	-26%	-43%	-32%	-31%	-36%	-31%
Porto	O_VS	-40%	-55%	-46%	-42%	-47%	-42%
	O_VD	-40%	-56%	-46%	-41%	-49%	-43%
	T_VD	-39%	-53%	-45%	-41%	-46%	-42%
	T_VS	-39%	-53%	-44%	-42%	-45%	-42%

Tabela 18 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas cuja fração de área projetada na fachada é 100 % (casos AB_100)

	Tipo de estufa	AB_100_30°	AB_100_60°	AB_100_90°
Bragança	O_VS	-53%	-73%	-61%
	O_VD	-56%	-75%	-62%
	T_VD	-54%	-68%	-59%
	T_VS	-52%	-73%	-59%
Coimbra	O_VS	1%	-47%	-24%
	O_VD	-6%	-50%	-24%
	T_VD	-14%	-38%	-20%
	T_VS	-3%	-46%	-20%
Évora	O_VS	10%	-43%	-20%
	O_VD	3%	-46%	-19%
	T_VD	3%	-33%	-13%
	T_VS	6%	-42%	-14%
Faro	O_VS	242%	45%	89%
	O_VD	235%	49%	105%
	T_VD	159%	57%	95%
	T_VS	162%	31%	88%
Lisboa	O_VS	44%	-28%	1%
	O_VD	36%	-30%	3%
	T_VD	16%	-16%	7%
	T_VS	33%	-28%	6%
Porto	O_VS	-16%	-55%	-36%
	O_VD	-21%	-58%	-36%
	T_VD	-20%	-47%	-32%
	T_VS	-18%	-54%	-32%

Com o fim de avaliar se o erro do método SLR aplicado anualmente se encontra dentro da gama dos erros cometidos pelo método mensal da norma, compararam-se, para dois casos distintos, as NEPA estimadas pelo método na norma, através da aplicação do RCCTE, com as obtidas por simulações, (através do *software DesignBuilder/EnergyPlus*).

Analisaram-se dois edifícios apenas com sistemas solares de ganho direto. Por simplicidade, consideraram-se os edifícios dos casos A_70 (caso 1) e B_70 (caso 2), do tipo O_VD, sem a estufa.

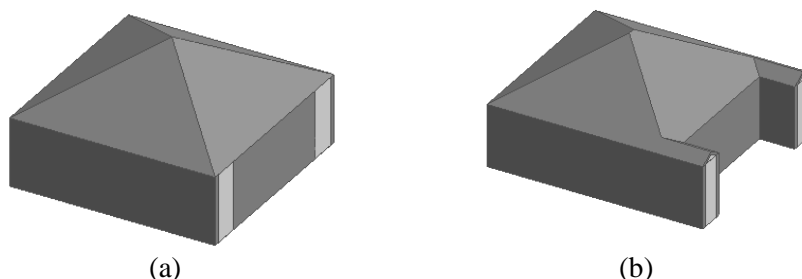


Figura 16 – Casos (sem estufa) analisados para a avaliação do erro do método mensal da norma: (a) caso 1; (b) caso 2

Conclui-se que, para estes dois casos simplistas, o erro anual cometido na aplicação do método mensal da norma (através da aplicação do RCCTE) é de 43 % para o caso 1 e de 47 % para o caso 2.

Este facto permite concluir que, os valores dos erros apresentados neste trabalho, relativos tanto ao método SLR mensal, como ao anual, são comparáveis com os erros obtidos pela aplicação do RCCTE.

6.2.3 Método integrado

Estimaram-se as NEPA anuais através do método integrado descrito no capítulo 3.3. Para tal utilizaram-se as equações apresentadas no capítulo 4.4. Este método aplica-se a edifícios que tenham múltiplos sistemas de ganhos solares, pelo que, neste caso não se aplica o método aos casos AB_100. Aplicou-se este método aos restantes casos descritos no capítulo 5, considerando sistemas combinados de estufas e ganhos diretos.

Embora este método não seja diretamente comparável com o método SLR mensal e anual, comparativamente com o método SLR anual, conclui-se que, em geral, o erro cometido pela sua aplicação, é inferior para as estufas, dos tipos A e B, com A_p/A_f igual a 30 % e para alguns casos com A_p/A_f igual a 70 % analisados para o clima de Faro. Para a maioria destes casos, os erros obtidos por este método, também são inferiores aos erros obtidos pela aplicação mensal do método SLR.

Os erros cometidos pela aplicação deste método são superiores a 100 % para as estufas do tipo A_30 e B_30, analisadas para o clima de Faro. Ignorando estes valores, os erros cometidos pela aplicação deste método são inferiores a 50 % em 52 % dos casos, e inferiores a 30 % em 45 % dos casos, sendo a média dos erros igual a 42 % e o desvio padrão igual a 28 %. Na Tabela 19 encontra-se o erro anual obtido para as estufas do tipo A e na Tabela 20 para as estufas do tipo B. No Anexo K encontram-se tabelados os valores absolutos dos erros apresentados nessas tabelas.

Tal como no método SLR anual, a maioria dos valores das NEPA obtidas por este método são subestimados. Desta situação, apenas se excluem os casos analisados para o clima de Faro e algumas estufas do tipo A_30 e B_30 analisadas para o clima de Lisboa, sendo nestes casos os valores das NEPA sobrestimadas.

De uma forma geral, este método apresenta erros demasiado elevados para os casos com A_p/A_f igual a 70 %, ou seja, erros médios de cerca de 70 %, o que inviabiliza a sua aplicação para estes casos. Além disso, os erros obtidos são mais elevados para os casos analisados para os climas mais frios, sendo o valor das NEPA subestimando, no mínimo, em 50 % para o caso de Bragança.

Tabela 19 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)

	Tipo de estufa	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°
Bragança	O_VS	-82%	-85%	-83%	-57%	-62%	-66%
	O_VD	-84%	-85%	-86%	-62%	-63%	-65%
	T_VD	-85%	-85%	-86%	-62%	-63%	-65%
	T_VS	-85%	-86%	-86%	-63%	-65%	-66%
Coimbra	O_VS	-62%	-70%	-67%	-8%	-20%	-29%
	O_VD	-67%	-70%	-72%	-18%	-22%	-26%
	T_VD	-69%	-71%	-73%	-21%	-25%	-28%
	T_VS	-70%	-72%	-74%	-23%	-27%	-30%
Évora	O_VS	-59%	-68%	-66%	-1%	-14%	-24%
	O_VD	-64%	-68%	-70%	-10%	-16%	-21%
	T_VD	-66%	-69%	-71%	-14%	-19%	-23%
	T_VS	-67%	-71%	-72%	-17%	-22%	-25%
Faro	O_VS	27%	-16%	-15%	196%	136%	101%
	O_VD	16%	-10%	-23%	174%	139%	118%
	T_VD	-15%	-27%	-33%	136%	112%	96%
	T_VS	-19%	-32%	-37%	125%	101%	88%
Lisboa	O_VS	-46%	-59%	-56%	30%	11%	-2%
	O_VD	-52%	-58%	-62%	18%	9%	3%
	T_VD	-57%	-61%	-63%	11%	4%	-1%
	T_VS	-59%	-63%	-65%	7%	0%	-5%
Porto	O_VS	-68%	-75%	-72%	-24%	-33%	-41%
	O_VD	-72%	-75%	-76%	-31%	-35%	-38%
	T_VD	-74%	-75%	-77%	-34%	-37%	-39%
	T_VS	-75%	-77%	-78%	-36%	-39%	-41%

Tabela 20 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30)

	Tipo de estufa	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
Bragança	O_VS	-83%	-84%	-85%	-60%	-61%	-62%
	O_VD	-82%	-82%	-84%	-60%	-60%	-61%
	T_VD	-82%	-82%	-84%	-60%	-60%	-62%
	T_VS	-83%	-84%	-85%	-61%	-62%	-63%
Coimbra	O_VS	-62%	-65%	-68%	-11%	-13%	-15%
	O_VD	-59%	-61%	-65%	-9%	-9%	-12%
	T_VD	-63%	-64%	-67%	-14%	-15%	-17%
	T_VS	-65%	-67%	-70%	-16%	-18%	-20%
Évora	O_VS	-58%	-63%	-66%	-2%	-4%	-8%
	O_VD	-55%	-58%	-62%	0%	-1%	-4%
	T_VD	-59%	-61%	-64%	-6%	-7%	-10%
	T_VS	-62%	-65%	-67%	-8%	-11%	-14%
Faro	O_VS	49%	17%	0%	248%	229%	211%
	O_VD	59%	38%	16%	255%	248%	229%
	T_VD	9%	1%	-11%	183%	176%	163%
	T_VS	2%	-11%	-20%	177%	162%	148%
Lisboa	O_VS	-44%	-51%	-56%	32%	29%	24%
	O_VD	-40%	-44%	-51%	35%	34%	29%
	T_VD	-48%	-50%	-55%	24%	22%	18%
	T_VS	-52%	-55%	-59%	21%	17%	13%
Porto	O_VS	-69%	-71%	-74%	-27%	-28%	-30%
	O_VD	-66%	-68%	-71%	-25%	-25%	-28%
	T_VD	-69%	-70%	-72%	-29%	-29%	-32%
	T_VS	-71%	-73%	-74%	-30%	-32%	-34%

6.2.3.1 Exemplo de aplicação

Com o fim de avaliar a qualidade e o erro do método integrado, analisou-se um caso exemplo. Para tal, construiu-se um edifício através da interface *DesignBuilder*, e compararam-se as NEPA estimadas através do método e as estimadas pelo *DesignBuilder/EnergyPlus*. Fizeram-se simulações para três climas distintos: Bragança, Coimbra e Porto.

O edifício exemplo está orientado a sul e tem inércia térmica média. A sua área de pavimento é 280 m² (pé-direito: 3,5 m), sendo a área de pavimento da estufa 42 m². O edifício tem dois sistemas solares passivos: dois vãos envidraçados, cuja fração da área projetada na fachada é 21 %, e uma estufa do tipo anexa, com uma superfície de contacto opaca, cuja fração da área projetada na fachada é 43 %, tendo a fachada 68 m².

Os erros obtidos na determinação das NEPA através do método integrado são mais elevados nos casos em que a razão A_p/A_f é elevada. Assim, uma vez que a razão A_p/A_f do caso analisado é próxima de 30 % é expectável que os erros cometidos na determinação anual das NEPA sejam aceitáveis.

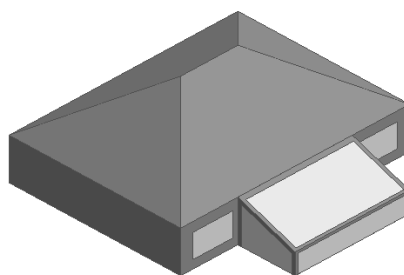


Figura 17 – Caso exemplo: edifício com um sistema combinado de estufa e ganhos diretos

Relativamente às soluções construtivas do edifício e da estufa, consideraram-se soluções ligeiramente diferentes das apresentadas no capítulo 5.1.2 para os casos analisados neste trabalho. As paredes exteriores têm um U_g de 0,350 W/m²/°C, e a cobertura e o pavimento 0,250 W/m²/°C. Os vãos envidraçados são compostos por vidro duplo³¹ com U_g igual a 2,716 W/m²/°C e uma caixilharia de alumínio, com quadrícula, sem corte térmico, com um U_g de 5,881 W/m²/°C. Relativamente à estufa, os seus vidros constituintes são semelhantes aos do edifício, e a superfície de contacto é composta por 0,020 m de betão, com um U_g de 3,704 W/m²/°C. A inclinação do seu vidro superior é 70°.

Consideraram-se que os ganhos internos do edifício são de 4 W/m²/°C e que a taxa de renovação de ar é 0,7 RPH. Os valores do parâmetro BLC do edifício e da condutância total, H_{tot} , são, respetivamente, 8,57 kWh/°C/dia e 128,7 W/°C. Através da equação (39) determinou-se que a temperatura de base, T_b , para o cálculo dos graus-dias de aquecimento, para a posterior determinação de Q_{ref} , é 11 °C.

Utilizaram-se as equações apresentadas no capítulo 4.4 para determinar os parâmetros γ e η , correspondentes aos ganhos provenientes dos vãos envidraçados, e os parâmetros SHF e SLR , correspondentes aos ganhos provenientes da estufa. Para a determinação do parâmetro SHF , utilizaram-se os coeficientes b_1 e b_2 de uma estufa com características o mais próximo possível das da estufa em análise: uma estufa do tipo AB_100_60°, O_VD. Na Tabela 21 encontram-se os valores obtidos para esses quatro parâmetros assim como os principais termos necessários para a sua determinação³².

³¹ Composição: vidro, ar, vidro (0,003; 0,013; 0,003) m; $g_1 = 0,764$

³² Para a determinação do termo $Q_{abs,SLR}$ utilizou-se o fator corretivo correspondente à estufa do tipo AB_100_60°, O_VD.

Tabela 21 – Parâmetros γ , η , SHF e SLR

		Bragança	Coimbra	Porto
Norma ISO 13790	$Q_{gn,ISO}$ (kWh)	23091	19803	19814
	$Q_{ht,ISO}$ (kWh)	87277	49304	44710
	γ	0,26	0,40	0,44
	η	0,26	0,38	0,41
Método SLR	DD (°C·dia)	833	264	234
	$Q_{ref,SLR}$ (kWh)	7140	2265	2009
	$Q_{abs,SLR}$ (kWh)	17827	17738	18112
	SLR	2,50	7,83	9,02
	SHF	0,69	0,99	1,00

Na Tabela 22 encontram-se os valores das NEPA estimadas pelo *DesignBuilder/EnergyPlus* e as determinadas através do método integrado.

Tabela 22 – Necessidades de energia para aquecimento e respetivo erro

	Bragança	Coimbra	Porto
Q_{nd} (kWh)	16895	6161	7155
$Q_{nd,DB}$ (kWh)	13453	5930	7356
Erro (%)	26	4	-3

Tal como era expectável, conclui-se que, para os casos analisados, o método integrado pode ser utilizado na determinação das NEPA com uma precisão aceitável.

6.3 Influência da estufa no comportamento térmico do edifício

Com o fim de analisar a influência das estufas no comportamento térmico dos edifícios, estimaram-se as NEPA dos edifícios descritos no capítulo 5 (considerando os casos de sistemas combinados), e compararam-se esses valores com as NEPA de edifícios semelhantes, mas sem estufa, para o clima de Bragança.

O tipo de superfície de contacto (O ou T) e o tipo de vidro da estufa (VD ou VS) revelam-se pouco influentes na poupança de energia para aquecimento do edifício, face às características geométricas da estufa. Assim, para cada caso indicado na Tabela 23, encontra-se a percentagem de energia média anual, para estufas com θ_v igual a 30, 60 e 90°, poupada através da implementação de uma estufa.

No Anexo M encontram-se valores relativos à percentagem de energia poupada no aquecimento do edifício para os vários casos analisados no capítulo 5.

Tabela 23 – Poupança de energia devida à existência de uma estufa (%)

Casos		O_VS	T_VS	T_VD	O_VD				
Orientação		Sul	Sul	Sul	Sul	SE/SO	E/O	NE/NO	N
Tipo de estufa	A_30	0	0	-1	2	2	1	0	-1
	B_30	13	11	10	14	12	7	3	1
	A_70	12	14	12	15	14	8	3	1
	B_70	23	22	20	24	21	12	5	2
	AB_100	22	25	23	25	22	14	6	3

Em média, para todos os casos analisados para a orientação sul, as estufas do tipo AB_100 são as que apresentam uma maior percentagem anual de redução das NEPA, sendo esta de 24 %.

As estufas do tipo A_30 são as que apresentam a menor percentagem de poupança de energia anual. A poupança de energia alcançada pelas estufas do tipo B_70 é muito semelhante à alcançada pelas estufas do tipo AB_100, sendo que a poupança alcançada pelas estufas do tipo A_70 e B_30 também são semelhantes. A poupança de energia alcançada pelas estufas do tipo A_30 é insignificante.

Nas estufas do tipo O_VD, analisadas para orientações diferentes de sul, a poupança de energia alcançada devido à sua implementação, para as orientações SE/SO, é semelhante à poupança alcançada para a orientação sul. Para as outras orientações, a poupança de energia é mais reduzida, sendo pouco significativa nas orientações NE/NO e N.

A título exemplar, para o caso AB_100_30°, do tipo O_VD, foi estimada a temperatura no interior de um edifício semelhante, substituindo-se a estufa por um sistema de ganho direto (janelas), com a mesma área projetada. Na Figura 18 mostram-se, para uma semana típica de inverno, os perfis da temperatura interior desse edifício, do edifício com estufa e de um edifício semelhante, sem ganhos solares.

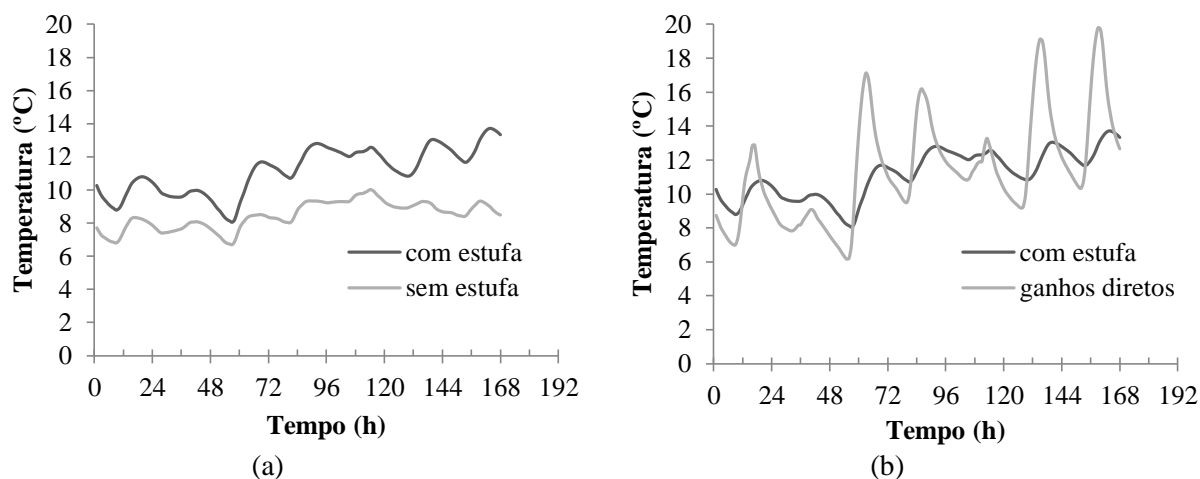


Figura 18 – Influência da estufa na temperatura interior do edifício, comparativamente com uma situação (a) sem ganhos solares; (b) apenas com ganhos diretos

Para este caso, a poupança anual de energia para aquecimento do edifício é de 30 %, enquanto que, no edifício apenas com ganhos diretos, há um aumento das NEPA de 11 %.

7 Conclusões e trabalho futuro

7.1 Conclusões

Para todos os casos analisados neste trabalho, incluindo os casos analisados para orientações diferentes de sul, a média do coeficiente r^2 das correlações obtidas é 0,895, sendo o desvio padrão 0,096. Relativamente à variação dos coeficientes de correlação com os vários tipos de estufas, conclui-se que estes são mais influenciados pela variação das características geométricas das estufas do que pela variação das suas características construtivas. Para alguns casos, verifica-se que os coeficientes b_1 e b_2 apresentam uma variação linear com θ_v .

A aplicação mensal do método SLR apresenta erros relativamente elevados, variando estes, essencialmente, com o mês em questão. No entanto, o valor anual das NEPA determinado através da aplicação mensal do método SLR é mais aceitável, sendo inferior a 30 % em cerca de 78 % dos casos. A média do valor absoluto do erro, para todos os casos analisados é de 20 % e o desvio padrão é 16 %. Quanto à aplicação da expressão de correlação de estufas com uma superfície de contacto opaca, conclui-se que a sua aplicação também é viável para estufas cuja superfície de contacto é transparente. Em relação à aplicação do método SLR a orientações diferentes de sul, conclui-se que a sua aplicação também é viável. O método que conduz a menores erros é o método C, no qual se determina o parâmetro *SHF* ajustado à orientação considerada através de duas formas: 1) contabilização da radiação incidente nas diversas superfícies da estufa, considerando a orientação da estufa, e 2) utilização de coeficientes de correlação correspondentes à orientação em análise. No entanto, o método B, no qual se determina o parâmetro *SHF* apenas através dos coeficientes de correlação correspondentes à orientação em análise, também apresenta erros aceitáveis.

Na aplicação anual do método SLR, conclui-se que, de uma forma geral, os erros cometidos pela sua aplicação são superiores aos cometidos pela aplicação mensal do método. Apenas para as estufas do tipo AB_100_30° se obtiveram erros excessivamente elevados. Excluindo estes casos, a média dos valores absolutos dos erros cometidos na determinação das NEPA pela aplicação anual do método SLR é de 37 %, sendo o desvio padrão 16 %. Neste caso, os erros são inferiores a 30 % apenas em cerca de 25 % dos casos. Apesar disso, estes valores encontram-se próximos dos erros obtidos pela aplicação da norma ISO 13790 a dois casos analisados apenas com sistemas de ganho direto.

Relativamente à aplicação do método integrado aos casos analisados, embora nestes casos se considerem sistemas de ganho combinado, conclui-se que, comparativamente com a aplicação mensal e anual do método SLR, este método apresenta erros mais baixos para a maioria dos casos do tipo A e B com A_p/A_f igual a 30 %. Para os restantes casos, os erros cometidos pela aplicação deste método são bastante superiores aos cometidos pela aplicação (mensal e anual) do métodos SLR, sendo estes, em média, cerca de 70 %, o que torna inviável a aplicação do método integrado nestes casos. Os casos analisados para o clima de Faro apresentam um comportamento oposto ao observado para os restantes climas, sendo os erros obtidos para as estufas do tipo A_30 e B_30, excessivamente elevados. Ignorando estes valores, os erros cometidos pela aplicação do método integrado são inferiores a 30 % em cerca de 45 % dos casos. A média dos erros cometidos pela aplicação deste método é igual a 42 % e o desvio padrão igual a 28 %.

Para um caso exemplo, com um estufa cuja área projetada na fachada do edifício é cerca de 40 %, analisado para os climas de Bragança, Coimbra e Porto, conclui-se que a aplicação do método integrado é viável. Para os três climas, o erro cometido na determinação anual das NEPA é igual a 26, -4 e -3 %, respetivamente.

Quanto à poupança anual de energia para aquecimento devido à implementação de uma estufa, conclui-se que as estufas do tipo AB_100 são as que contribuem para uma maior poupança de energia, sendo que, para todos os casos analisados, a média da poupança anual de energia deste tipo de estufas é de 24 %. Conclui-se, também, que a poupança alcançada pelas estufas do tipo B_70 é semelhante à das estufas do tipo AB_100. Relativamente à análise das estufas para orientações diferentes de sul, conclui-se que, para o caso das estufas do tipo O_VD, a poupança de energia alcançada pelas estufas com orientação SE/SO é semelhante à das estufas com orientação sul.

7.2 Trabalho futuro

Apesar de terem sido feitas algumas variações das características geométricas e construtivas das estufas, podem ser analisadas mais variações, podendo ser obtidas correlações SLR adicionais. Além disso, podem ser analisadas outras variáveis que influenciem o comportamento térmico da estufa. É importante obter-se correlações para situações de estufas com isolamento noturno e com aberturas para a transferência de calor para o edifício por convecção.

Pode ser explorado o facto da variação de alguns coeficientes de correlação ser linear com algumas características das estufas. Este facto poderá permitir a determinação de correlações específicas que permitam a determinação simples dos coeficientes de correlação de uma determinada estufa, sem ser necessária a sua determinação através de ajuste matemáticos.

Considera-se ainda como trabalho futuro, uma análise exaustiva das fontes de erro do método integrado por forma a explorar novas correlações que conduzam a valores aproximados das NEPA, com um erro menor aos encontrados neste trabalho.

8 Referências bibliográficas

- ADENE. (2012). Certificação Energética, from <http://www.adene.pt>
- Asdrubali, F., et al. (2012). On the Evaluation of Solar Greenhouse Efficiency in Building Simulation during the Heating Period. *Energies*, 5(6), 1864-1880.
- Bakos, G. (2003). Electrical energy saving in a passive-solar-heated residence using a direct gain attached sunspace. *Energy and Buildings*, 35(2), 147-151.
- Bakos, G., & Tzagas, N. (2000). Technology, thermal analysis and economic evaluation of a sunspace located in northern Greece. *Energy and Buildings*, 31(3), 261-266.
- Balcomb, J. (1980). Development of simplified design aids based on the results of simulation analysis. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*.
- Balcomb, J., et al. (1982). *Passive solar design handbooks: Vol III: passive solar design analysis and supplement*: Los Alamos National Laboratory.
- Balcomb, J. D., & Laboratory, L. A. S. (1980). Development of simplified design aids based on the results of simulation analysis. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*.
- Balcomb, J. D., & McFarland, R. D. (1978). A simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage wall type. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*.
- Bataineh, K. M., & Fayez, N. (2011). Analysis of thermal performance of building attached sunspace. *Energy and Buildings*.
- Beckman, W. A., et al. (1983). Performance prediction of attached sunspaces. *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.:(United States)*, 6.
- Blanc, I., et al. (1987). Unutilizability method for the design of sunspaces.
- Blanc, I., et al. (1987). *Unutilizability method for the design of sunspaces*. Paper presented at the European Conference on Architecture, Munich, Germany.
- Blomsterberg, A., & Wall, M. (1996). Performance of attached sunspaces. *3rd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '93 (Bjarne Saxhof)*, 93-101.
- Bourdeau, L. (1988). How people use their sunspaces. *Building Research and Practice*, 16(3), 167-171.
- Central Maryland Sunrooms. (2012), from http://www.centralmarylandsunrooms.com/App_Content/home.aspx
- Chen, W. T., et al. (1980). Toward identifying the markets for passive solar homes and sunspaces. *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.:(United States)*, 5(CONF-801016-(Vol. 1)).
- Colliver, D., & Parker, B. (1983). Energy balances in attached sunspaces. Simulation of the heat flows for the typical meteorological year. *ASAE Tech. Pap.:(United States)*, 83(CONF-831275-).
- Dennis R. Holloway Architect. (2012). Hall Residence, Boulder, Colorado, 1980, from <http://www.dennisrhollowayarchitect.com/Hall.html>
- Dijk, D. v. (2009). Background, status and future of the CEN standards to support the Energy Performance of Buildings Directive: IEE-CENSE.
- Dirienzo, R., & McGowan, J. G. (1980). Thermal performance model and design sensitivity study for attached sunspaces. *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.:(United States)*, 5(CONF-801016-(Vol. 1)).
- EnergyPlus. (2011). EnergyPlus Engineering Reference, The Reference to EnergyPlus Calculations.
- European Commission. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) *Official Journal of the European Union*, L (Vol. 153, pp. 13-35).
- European Union. (2012a). Summaries of UE legislation - Energy performance of buildings, from http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/en0021_en.htm
- European Union. (2012b). Summaries of UE legislation - Strategy on climate change: foundations of the strategy, from http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128157_pt.htm
- European Union. (2012c). Summaries of UE legislation - Tackling climate change, from http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/index_pt.htm
- European Union. (2012d). Sustainable Consumption and Production - Final Energy Consumption, from <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc320&language=en>
- European Union. (2012e). Sustainable growth - for a resource efficient, greener and more competitive economy, from http://ec.europa.eu/europe2020/priorities/sustainable-growth/index_en.htm
- Gonçalves, H., & Brotas, L. (2007a). A norma Passivhaus em climas quentes da Europa: diretrizes de projeto para casas confortáveis de baixo consumo *Parte 1: Revisão de casas confortáveis de baixo consumo energético*: Passiv-on project - ieea.

- Gonçalves, H., & Brotas, L. (2007b). A norma Passivhaus em climas quentes da Europa: diretrizes de projeto para casas confortáveis de baixo consumo *Parte 2: Propostas nacionais em detalhe: Passivhaus Portugal: Passiv-on project* - ieea.
- Green Passive Solar Magazine. (2012). Passive Solar Sun Room, from <http://greenpassivesolar.com/2010/05/passive-solar-sunroom/>
- Hestnes, A. G., et al. (2003). *Solar energy houses: strategies, technologies, examples* (2nd ed.): James & James.
- Ho, H. (1995). *User-performance sensitivity of small sunspaces in a Scottish housing context*. University of Glasgow.
- ISO. (2008). 13790: Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling (ISO 13790:2008).
- Jones, R., & McFarland, R. (1982). SLR methods for attached sunspaces.
- Jones, R., et al. (1982). Mass and fans in attached sunspaces.
- Kent, B. (1982). Sunspaces: design and build an attached solar greenhouse.
- Leenknecht, S., & Saelens, D. (2010). Comparison between simplified and dynamical calculation of highly glazed spaces. 335-342.
- Lemaire, A. (1990). A numerical study of the air movement and temperatures in large atria and sunspaces.
- Lovins, A. B. (2007). Canada Mortgage and Housing Corporation, Net Zero Energy Healthy Housing Initiative (Request for Proposals): Appendix F. Passive Solar Strategies: Riverdale NetZero Project.
- Lumbis, A. J. (1988). *Operational strategies for attached sunspaces in Canada*.
- MacKay, D. J. C. (2007). *Sustainable energy: without the hot air*: Citeseer.
- Mauldin, J. H. (1987). *Sunspaces: Home Additions for Year-round Natural Living*: Tab Books.
- McFarland, R. D., & Jones, R. W. (1980). Performance estimates for attached-sunspace passive solar heated buildings.
- Melih, T. (1997). Opposite sunspaces passive solar air heating system. *Solar Energy*, 60(3), 127-134.
- Mihalakakou, G. (2002). On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe. *Renewable Energy*, 26(3), 415-429.
- Mihalakakou, G., & Ferrante, A. (2000). Energy conservation and potential of a sunspace: sensitivity analysis.
- Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (Decreto-Lei n° 80/2006, de 4 de Abril): Diário da República Electrónico.
- Moita, F. (2010). *Energia Solar Passiva*. Lisboa: Argumentum.
- Mottard, J. M., & Fissore, A. (2007). Thermal simulation of an attached sunspace and its experimental validation. *Solar Energy*, 81(3), 305-315.
- North Georgia Mountain Realty. (2012). Cabins and Homes, from <http://www.northgeorgiamountainrealty.com/homes/208714/>
- O.Wray, W. (1980). Additional solar/load ratio correlations for direct gain buildings. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*.
- Oliveira, A. (1989). *Método simplificado para avaliação do comportamento térmico de edifícios solares passivos*. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Oliveira, A., & Fernandes, E. O. (1992). A new simplified method for evaluating the thermal behaviour of direct gain passive solar building.
- Oliveira Panão, M. J. N., et al. (2012). Solar Load Ratio and ISO 13790 methodologies: indirect gains from sunspaces. *Energy and Buildings*.
- Oliveti, G., et al. (2012). Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces. *Renewable Energy*, 39(1), 241-249.
- Oliveti, G., et al. (2008). Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms. *Solar Energy*, 82(3), 212-219.
- Parsons, B. K. (1983). *The simulation and design of building attached sunspaces*: University of Wisconsin - Madison.
- Passerini, F. (2012). *Sunspaces for passive building heating: calculation models and utilization of empirical data*. University of Trento.
- Patrício, A. M. (1997). *Avaliação de componentes solares passivos em Portugal: o caso de estufas*. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Porteous, D. C. D. A., & Ho, H. (1997). Do sunspaces work in Scotland? Lessons learnt from a CEC solar energy demonstration project in Glasgow. *International journal of ambient energy*, 18(1), 23-35.
- Power, A. (2008). Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability? *Energy policy*, 36(12), 4487-4501.
- Reichenbach, M. (2007). Apartment buildings in cold climates: Sunspaces *Sustainable Solar Housing: Strategies and solutions* (Vol. 1, pp. 171).
- Roux, J., et al. (2004). Validation of a glazed space simulation model using full-scale experimental data. *Energy and Buildings*, 36(6), 557-565.

- Santos, C., & Matias, L. (2006). Coeficientes de transmissão térmicos da envolvente dos edifícios. *LENEC, ICT Informação técnica, ITE*, 50.
- Schnurr, N. M., et al. (1980). The solar load ratio method applied to commercial building active solar system sizing. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*.
- Schoenau, G. J., et al. (1990). Thermal performance of four sunspaces in a cold climate. *Energy and Buildings*, 14(4), 273-286.
- Schoenau, G. J., et al. (1991). Development and verification of a simulation model for predicting the thermal behavior of attached sunspaces. *Energy conversion and management*, 32(4), 319-331.
- Shapiro, A. M. (1985). The homeowner's complete handbook for add-on solar greenhouses and sunspaces. Solar Center Information. (1998). Sunspaces design basics. *North Carolina Solar Center*.
- Sommereux, I. (1985). *A design method for passive sunspace systems*: University of Wisconsin - Madison.
- Thomas, S. G. (1984). *Solar Greenhouses and Sunspaces: Lessons Learned*: National Center for Appropriate Technology.
- Tiwari, G., et al. (1988). Performance of a solarium: an analytical study. *Building and Environment*, 23(2), 145-151.
- Todd, J. (1997). *Passive Solar Design for Tasmania: the Value of Sunspaces*. Paper presented at the Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society, Canberra.
- Torra, C., et al. (1988). Some experiences on design and calculation of sunspaces in Mediterranean climates. *Solar & wind technology*, 5(4), 365-378.
- Weidt, J. L., et al. (1983). Predicting performance of prototypical sunspaces attached to typical residences in various climatic regions. *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.:(United States)*, 6(CONF-830622-).
- Werner, H. (1987). Solar energy use by differently orientated sunspaces experimental tests.
- Woolston, G., et al. (1989). Sunspaces for housing in Finland. *Tyoetehoseuran julkaisuja*.

Anexos

Anexo A – Formulação para o cálculo de Q_{sd} e Q_{si} (norma ISO 13790)

$$Q_{sd} = Q_{sd,p} + Q_{sd,w} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} Q_{sd,p} = F_{sh,e}(1 - F_{F,e})g_e\alpha_p A_p \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} I_p t \\ Q_{sd,w} = F_{sh,e}(1 - F_{F,e})g_e(1 - F_{F,w})g_w A_w I_p t \end{cases} \quad (A2)$$

$$Q_{si} = (1 - b_{tr})Q_{ab,s} - Q_{sd,p} \quad (A3)$$

$$\begin{cases} Q_{ab,s} = (1 - b_{tr})F_{sh,e}(1 - F_{F,e})g_e \sum_j (A_j I_j \alpha_j) \\ Q_{sd,p} \end{cases} \quad (A4)$$

Nomenclatura:

$F_{sh,e}$ – Fator de sombreamento dos elementos da envolvente da estufa

$F_{F,e}$ – Fração de caixilho dos elementos envidraçados da envolvente da estufa

g_e – Energia solar efetiva transmitida através dos elementos envidraçados da envolvente da estufa

α_p – Absortividade solar média da superfície de contacto

A_p – Área opaca da superfície de contacto (m^2)

$H_{p,tot}$ – Coeficiente de transferência de calor, por transmissão, através da fração opaca da superfície de contacto e da envolvente da estufa, do interior do edifício para o ambiente exterior ($W/^\circ C$)

$H_{p,e}$ – Coeficiente de transferência de calor, por transmissão, da parede absorvora da superfície de contacto para o exterior, através da estufa ($W/^\circ C$)

I_p – Radiação solar incidente em cada superfície durante o período de cálculo (W/m^2)

t – Período de cálculo

$F_{F,w}$ - Fração de caixilho dos elementos envidraçados da superfície de contacto

g_w – Energia solar efetiva transmitida através dos elementos envidraçados da superfície de contacto

A_w – Área envidraçada da superfície de contacto (m^2)

b_{tr} – Coeficiente de redução de perdas da estufa

A_j – Área de cada superfície opaca da estufa que absorve radiação solar (m^2)

I_j – Radiação solar incidente em cada superfície opaca da estufa durante o período de cálculo (W/m^2)

α_j – Absortividade solar média de cada superfície opaca da estufa

Anexo B – Formulação alternativa para o cálculo de Q_{nd} : norma ISO 13790

O termo Q_{nd} é determinado, segundo a norma ISO 13790, através de:

$$Q_{nd} = Q_{ht} - \eta_{gn} Q_{gn} \quad (\text{B1})$$

sendo que:

$$\eta_{gn} = \frac{\eta_{ls}}{\gamma_{gn}} \quad (\text{B2})$$

donde:

$$Q_{nd} = Q_{ht} - \frac{\eta_{ls}}{\gamma_{gn}} Q_{gn} \quad (\text{B3})$$

Como:

$$\gamma = \frac{Q_{gn}}{Q_{ht}} \quad (\text{B4})$$

tem-se:

$$\begin{aligned} Q_{nd} &= Q_{ht} - \eta_{ls} \frac{Q_{ht}}{Q_{gn}} Q_{gn} \\ &= Q_{ht} - \eta_{ls} Q_{ls} \\ &= Q_{ht}(1 - \eta_{ls}) \end{aligned} \quad (\text{B5})$$

Anexo C – Formulação para a integração dos dois métodos de cálculo

Tendo em conta a expressão geral para dois sistemas combinados:

$$Q_{nd} = (1 - a_{p_i}SHF_i - a_{p_j}SHF_j)Q_{ref} \quad (C1)$$

Somando e subtraindo a_{p_i} :

$$Q_{nd} = (1 - a_{p_i} + a_{p_i} - a_{p_i}SHF_i - a_{p_j}SHF_j)Q_{ref} \quad (C2)$$

Pondo a_{p_i} em evidência:

$$Q_{nd} = [a_{p_i}(1 - SHF_i) + 1 - a_{p_i} - a_{p_j}SHF_j]Q_{ref} \quad (C3)$$

Como:

$$(1 - SHF_i)Q_{ref} = (1 - \eta_{ls_i})Q_{ht} \quad (C4)$$

vem:

$$Q_{nd} = a_{p_i}(1 - SHF_i)Q_{ref} + [(1 - a_{p_i})Q_{ref} - (a_{p_j}SHF_j)]Q_{ref} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Q_{nd} = a_{p_i}(1 - \eta_{ls_i})Q_{ht} + (1 - a_{p_i} - a_{p_j}SHF_j)Q_{ref} \quad (C5)$$

Anexo D – Formulação para o cálculo dos termos Q_{lna} , Q_{pe} e Q_{pt}

Os termos Q_{lna} pode ser determinados através de:

$$Q_{lna} = \sum U_g \cdot A \cdot DD_a \cdot \tau \quad (D1)$$

onde U_g corresponde ao coeficiente de transmissão térmica global do elemento considerado e A à sua área (medida pelo interior). DD_a é o número de graus-dia de aquecimento, determinado com uma temperatura base de 20 °C e τ é um fator de ajuste, cujos valores convencionais estão pré-determinados no RCCTE para algumas situações típicas de espaços não úteis.

Os termos Q_{pe} e Q_{pt} podem ser determinados através das equações:

$$Q_{pe} = \sum L_{pe} \cdot DD_a \quad (D2)$$

$$Q_{pt} = \sum L_{pt} \cdot DD_a \quad (D3)$$

onde L_{pe} corresponde às perdas unitárias de calor através de elementos em contacto com o solo e L_{pt} às perdas de calor lineares unitárias através das pontes térmicas.

L_{pe} e L_{pt} podem ser determinadas através de:

$$L_{pe} = \sum_j \psi_j B_j \quad (D4)$$

onde ψ_j é o coeficiente de transmissão térmica linear e B_j corresponde ao perímetro do pavimento ou desenvolvimento da parede, medido pelo interior.

E de:

$$L_{pt} = \sum_j \psi_j B_j \quad (D5)$$

onde ψ_j é o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica e B_j é o comprimento da ponte térmica.

Anexo E – Formulação para o cálculo da radiação incidente numa superfície

A radiação solar incidente numa superfície é determinada através de:

$$I_{superfície} = K_{\perp} \cos \theta + F_{céu} D + F_{solo} \rho_{solo} G \quad (E1)$$

onde K_{\perp} é a radiação direta normal, D a radiação solar difusa, θ é o ângulo de incidência entre a radiação solar direta e a normal à superfície, $F_{céu}$ e F_{solo} são os fatores de forma do céu e do solo, respetivamente, ρ_{solo} é a refletividade do solo e G é a radiação solar global.

O ângulo de incidência da radiação solar numa superfície é calculado de acordo com:

$$\cos \theta = \cos \alpha \sin \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \quad (E2)$$

onde α é a altitude solar, β é a inclinação da superfície e γ é o valor absoluto da diferença entre o azimute solar a partir do Sul e a orientação da superfície.

A altitude solar, α , é determinada de acordo com:

$$\sin \alpha = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta \quad (E3)$$

onde λ é a latitude do local considerado, δ é a declinação solar e ω é o ângulo horário.

O azimute solar a partir do Sul, φ , é calculado através de³³:

$$\cos \varphi = \frac{\sin \alpha \sin \lambda - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \lambda} \quad (E4)$$

A declinação solar, δ , e o ângulo horário, ω , podem ser calculados com recurso às seguintes equações:

$$\delta = 0,13\pi \sin \left[\frac{2\pi(284 + J)}{365} \right] \quad (E5)$$

$$\omega = \frac{\pi}{12} (AST - 12) \quad (E6)$$

onde J corresponde ao dia Juliano para o qual se está a fazer o cálculo e AST é o tempo solar verdadeiro (*apparent solar time*).

³³ Expressão válida para azimute a partir de sul: negativo de manhã (este) e positivo à tarde (oeste).

Anexo F – Características geométricas das estufas

Tabela F1 – Características geométricas das estufas

Estufa	A_p/A_f (%)	θ_v (°)	Largura (m)	Altura (m)	Comprimento (m)
1	30	30	2	3,5	3,08
2	30	60	2	3,5	3,08
3	30	90	2	3,5	3,08
4	70	30	2	3,5	7,31
5	70	60	2	3,5	7,31
6	70	90	2	3,5	7,31
7	100	30	2	3,5	10,49
8	100	60	2	3,5	10,49
9	100	90	2	3,5	10,49

Anexo G – Soluções construtivas

Tabela G1 – Constituição dos elementos construtivos

Elemento	Constituição (do exterior para o interior)	U_g (W/m ² °C)
Parede exterior	Tinta; reboco; tijolo; EPS; tijolo; reboco	0,506
Superfície de contacto (parede)	Betão	3,704
Cobertura exposta	Telha, revestimento de asfalto	2,930
Cobertura semi-exposta	EPS; laje; reboco	0,575
Pavimento	Enrocamento, betonilha, tijoleira	1,549

Tabela G2 – Características térmicas dos materiais

Elemento	Material	λ (W/m°C)	Espessura (m)
Paredes exteriores	Isolamento (EPS)	0,040	0,040
	Reboco	1,300	0,015
	Tijolo	0,385 (λ_{eq})	0,150
	Tinta branca	0,300	0,001
Parede interior	Betão	2,000	0,200
Cobertura	Isolamento (EPS)	0,040	0,060
	Laje (betão)	1,130	0,100
	Reboco	1,300	0,015
	Telha	1,000	0,025
	Asfalto	0,190	0,005
Pavimento	Betonilha	0,700	0,020
	Enrocamento (cascalho)	0,700	0,270
	Tijoleira	0,700	0,015

Tabela G3 – Constituição dos elementos envidraçados

Elemento	Constituição/Material	U_g (W/m ² °C)	g_{\perp}	Espessura (m)
Caixilharia	Alumínio	5,881	-	0,005
Vidro simples	Vidro	5,778	0,775	0,006
Vidro duplo	Vidro; ar; vidro	3,094	0,604	0,006; 0,006; 0,006

Anexo H – Coeficientes de correlação e r^2 Tabela H1 – Coeficientes de correlação e respetivo r^2 : estufas com vidro simples (orientação: sul)

Superfície de contacto Estufa	Opaca				Transparente			
	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)
A_70_30°	1,400	0,673	0,840	0,137	1,233	0,628	0,968	0,057
A_70_60°	1,503	0,654	0,983	0,043	1,223	0,536	0,931	0,078
A_70_90°	1,486	0,599	0,983	0,044	1,236	0,527	0,931	0,079
A_30_30°	1,204	0,876	0,897	0,094	1,133	0,820	0,867	0,097
A_30_60°	1,189	0,724	0,890	0,095	1,138	0,726	0,852	0,100
A_30_90°	1,195	0,681	0,873	0,100	1,147	0,715	0,851	0,101
B_70_30°	1,405	0,735	0,870	0,133	1,242	0,657	0,874	0,121
B_70_60°	1,421	0,677	0,854	0,133	1,341	0,698	0,849	0,125
B_70_90°	1,535	0,710	0,853	0,138	1,357	0,676	0,857	0,124
B_30_30°	1,343	1,289	0,978	0,046	1,205	1,097	0,901	0,088
B_30_60°	1,392	1,200	0,979	0,046	1,224	0,999	0,909	0,087
B_30_90°	1,412	1,148	0,980	0,045	1,243	0,968	0,913	0,086
AB_100_30°	2,167	0,855	0,823	0,143	1,440	0,646	0,827	0,133
AB_100_60°	1,857	0,671	0,882	0,118	2,941	1,056	0,835	0,129
AB_100_90°	1,712	0,596	0,880	0,120	1,596	0,657	0,875	0,113

Tabela H2 – Coeficientes de correlação e respetivo r^2 : estufas com vidro duplo (orientação: sul)

Superfície de contacto Estufa	Opaca				Transparente			
	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)
A_70_30°	1,635	0,862	0,578	0,220	1,240	0,638	0,974	0,053
A_70_60°	1,562	0,723	0,810	0,142	1,239	0,543	0,901	0,098
A_70_90°	1,546	0,670	0,783	0,158	1,234	0,518	0,932	0,078
A_30_30°	1,304	1,038	0,875	0,106	1,134	0,818	0,874	0,095
A_30_60°	1,286	0,890	0,863	0,110	1,137	0,701	0,863	0,098
A_30_90°	1,284	0,831	0,860	0,112	1,143	0,669	0,861	0,098
B_70_30°	1,405	0,735	0,870	0,134	1,242	0,657	0,874	0,121
B_70_60°	1,374	0,678	0,851	0,132	1,342	0,720	0,845	0,125
B_70_90°	1,476	0,713	0,852	0,136	1,355	0,695	0,852	0,125
B_30_30°	1,343	1,289	0,978	0,046	1,205	1,097	0,901	0,088
B_30_60°	1,390	1,248	0,979	0,046	1,218	1,019	0,907	0,087
B_30_90°	1,406	1,203	0,979	0,045	1,234	0,991	0,911	0,086
AB_100_30°	1,917	0,806	0,810	0,148	1,501	0,669	0,826	0,134
AB_100_60°	1,931	0,738	0,858	0,128	1,749	0,691	0,867	0,115
AB_100_90°	1,879	0,669	0,885	0,117	1,457	0,544	0,833	0,128

Tabela H3 – Coeficientes de correlação e respetivo r^2 : estufas do tipo O_VD, orientações SE/SO e E/O

Orientação Estufa	SE/SO				E/O			
	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)
A_70_30°	1,497	0,825	0,982	0,043	1,349	0,830	0,985	0,042
A_70_60°	1,439	0,685	0,983	0,044	1,318	0,694	0,925	0,092
A_70_90°	1,426	0,625	0,983	0,044	1,341	0,643	0,926	0,091
A_30_30°	1,190	0,920	0,896	0,094	1,148	1,075	0,897	0,089
A_30_60°	1,184	0,770	0,891	0,094	1,158	0,879	0,882	0,094
A_30_90°	1,189	0,713	0,892	0,094	1,170	0,795	0,885	0,094
B_70_30°	1,636	1,030	0,835	0,148	1,341	1,004	0,928	0,093
B_70_60°	1,605	0,948	0,983	0,044	1,360	0,915	0,930	0,093
B_70_90°	1,597	0,888	0,983	0,045	1,400	0,867	0,932	0,093
B_30_30°	1,275	1,275	0,980	0,045	1,157	1,419	0,917	0,085
B_30_60°	1,272	1,188	0,911	0,095	1,179	1,288	0,921	0,086
B_30_90°	1,277	1,128	0,915	0,093	1,209	1,210	0,924	0,086
AB_100_30°	1,964	0,902	0,856	0,131	1,390	0,895	0,983	0,045
AB_100_60°	1,871	0,849	0,983	0,046	1,398	0,757	0,983	0,045
AB_100_90°	1,782	0,757	0,985	0,041	1,438	0,693	0,911	0,104

Tabela H4 – Coeficientes de correlação e respetivo r^2 : estufas do tipo O_VD, orientações NE/NO e N

Orientação Estufa	NE/NO				N			
	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)	b_1	b_2	r^2	Desvio padrão (kWh)
A_70_30°	1,286	1,032	0,914	0,087	1,302	1,286	0,897	0,089
A_70_60°	1,280	0,804	0,933	0,082	1,123	0,752	0,946	0,062
A_70_90°	1,308	0,697	0,935	0,084	1,304	0,729	0,938	0,082
A_30_30°	1,150	1,597	0,848	0,095	1,054	1,819	0,848	0,088
A_30_60°	1,139	1,117	0,869	0,092	1,013	1,153	0,863	0,088
A_30_90°	1,150	0,917	0,881	0,092	1,149	1,050	0,879	0,090
B_70_30°	1,119	0,960	0,915	0,087	1,150	1,184	0,895	0,090
B_70_60°	1,141	0,841	0,933	0,082	0,956	0,747	0,949	0,050
B_70_90°	1,365	0,923	0,875	0,114	1,386	0,970	0,940	0,085
B_30_30°	1,060	1,829	0,869	0,090	1,098	2,387	0,858	0,091
B_30_60°	1,194	1,851	0,882	0,092	1,059	1,685	0,876	0,090
B_30_90°	1,208	1,417	0,913	0,086	1,229	1,533	0,908	0,088
AB_100_30°	1,337	1,163	0,921	0,094	1,406	1,458	0,909	0,101
AB_100_60°	1,340	0,916	0,939	0,085	1,234	1,010	0,895	0,106
AB_100_90°	1,382	0,773	0,953	0,076	1,380	0,805	0,952	0,077

Anexo I – Valores absolutos dos erros anuais cometidos pela aplicação mensal do método SLR

Tabela I1 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)

	Tipo de estufa	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°
Bragança	O_VS	33%	6%	16%	21%	6%	8%
	O_VD	41%	8%	19%	27%	9%	12%
	T_VD	27%	8%	14%	20%	8%	10%
	T_VS	26%	4%	11%	18%	4%	5%
Coimbra	O_VS	0%	30%	18%	7%	23%	20%
	O_VD	1%	30%	17%	4%	22%	19%
	T_VD	1%	22%	14%	6%	19%	17%
	T_VS	2%	25%	17%	8%	23%	22%
Évora	O_VS	2%	28%	17%	6%	23%	20%
	O_VD	3%	28%	16%	4%	22%	18%
	T_VD	1%	20%	13%	5%	18%	16%
	T_VS	0%	24%	16%	7%	23%	22%
Faro	O_VS	28%	56%	46%	34%	48%	45%
	O_VD	55%	71%	63%	50%	62%	59%
	T_VD	27%	46%	39%	31%	43%	42%
	T_VS	28%	49%	42%	33%	48%	46%
Lisboa	O_VS	11%	39%	27%	16%	31%	28%
	O_VD	21%	19%	4%	6%	16%	11%
	T_VD	11%	30%	23%	15%	27%	25%
	T_VS	12%	34%	26%	17%	31%	30%
Porto	O_VS	3%	26%	15%	5%	21%	18%
	O_VD	5%	25%	14%	2%	20%	16%
	T_VD	1%	19%	13%	5%	17%	15%
	T_VS	1%	23%	16%	7%	21%	20%

Tabela I2 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30)

	Tipo de estufa	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
Bragança	O_VS	36%	10%	26%	29%	19%	27%
	O_VD	36%	9%	24%	30%	18%	26%
	T_VD	30%	11%	23%	25%	17%	22%
	T_VS	31%	10%	22%	24%	16%	22%
Coimbra	O_VS	4%	23%	7%	2%	14%	5%
	O_VD	4%	24%	9%	2%	16%	7%
	T_VD	4%	20%	7%	2%	12%	6%
	T_VS	4%	20%	6%	3%	12%	5%
Évora	O_VS	8%	21%	6%	1%	13%	5%
	O_VD	7%	21%	6%	1%	15%	6%
	T_VD	7%	18%	4%	1%	11%	5%
	T_VS	7%	18%	4%	2%	11%	5%
Faro	O_VS	23%	48%	36%	33%	43%	36%
	O_VD	23%	48%	36%	33%	45%	37%
	T_VD	21%	45%	33%	29%	38%	32%
	T_VS	20%	45%	32%	30%	38%	32%
Lisboa	O_VS	8%	33%	19%	14%	25%	17%
	O_VD	8%	34%	20%	14%	27%	18%
	T_VD	7%	30%	18%	13%	22%	16%
	T_VS	7%	30%	17%	14%	22%	16%
Porto	O_VS	7%	20%	5%	0%	12%	4%
	O_VD	7%	21%	6%	0%	13%	5%
	T_VD	5%	17%	5%	1%	10%	5%
	T_VS	6%	18%	5%	2%	10%	4%

Tabela I3 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR mensalmente: estufas cuja fração de área projetada na fachada é 100 % (casos AB_100)

	Tipo de estufa	AB_100_30°	AB_100_60°	AB_100_90°
Bragança	O_VS	60%	4%	14%
	O_VD	50%	6%	22%
	T_VD	39%	13%	17%
	T_VS	36%	27%	14%
Coimbra	O_VS	49%	16%	1%
	O_VD	44%	15%	7%
	T_VD	26%	5%	9%
	T_VS	38%	12%	1%
Évora	O_VS	66%	8%	8%
	O_VD	61%	6%	16%
	T_VD	54%	5%	19%
	T_VS	53%	2%	10%
Faro	O_VS	91%	18%	3%
	O_VD	97%	14%	13%
	T_VD	67%	8%	17%
	T_VS	69%	36%	0%
Lisboa	O_VS	62%	14%	5%
	O_VD	58%	12%	12%
	T_VD	35%	1%	16%
	T_VS	51%	15%	6%
Porto	O_VS	48%	14%	0%
	O_VD	42%	12%	7%
	T_VD	35%	3%	7%
	T_VS	34%	5%	1%

Anexo J – Valores absolutos dos erros anuais cometidos pela aplicação anual do método SLR

Tabela J1 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)

	Tipo de estufa	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°
Bragança	O_VS	52%	66%	56%	49%	57%	52%
	O_VD	53%	68%	58%	49%	58%	52%
	T_VD	53%	62%	56%	50%	56%	52%
	T_VS	52%	62%	55%	50%	56%	52%
Coimbra	O_VS	30%	51%	37%	31%	42%	34%
	O_VD	32%	54%	39%	30%	43%	35%
	T_VD	32%	45%	36%	32%	40%	34%
	T_VS	31%	46%	36%	31%	41%	35%
Évora	O_VS	29%	51%	37%	31%	42%	35%
	O_VD	31%	53%	39%	30%	43%	35%
	T_VD	31%	44%	36%	32%	40%	34%
	T_VS	30%	46%	35%	31%	41%	35%
Faro	O_VS	5%	30%	10%	8%	24%	14%
	O_VD	31%	53%	39%	30%	43%	35%
	T_VD	1%	20%	9%	10%	21%	14%
	T_VS	1%	23%	9%	10%	23%	15%
Lisboa	O_VS	23%	47%	31%	26%	38%	30%
	O_VD	4%	31%	12%	7%	25%	14%
	T_VD	25%	40%	31%	27%	36%	30%
	T_VS	25%	41%	30%	27%	37%	30%
Porto	O_VS	37%	56%	43%	37%	47%	40%
	O_VD	38%	58%	45%	36%	48%	40%
	T_VD	38%	50%	42%	38%	45%	40%
	T_VS	37%	51%	42%	37%	46%	40%

Tabela J2 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30)

	Tipo de estufa	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
Bragança	O_VS	55%	66%	59%	54%	59%	55%
	O_VD	55%	67%	60%	54%	60%	55%
	T_VD	54%	65%	58%	53%	57%	54%
	T_VS	54%	65%	58%	54%	57%	54%
Coimbra	O_VS	33%	50%	39%	36%	42%	36%
	O_VD	33%	51%	40%	36%	44%	37%
	T_VD	33%	48%	38%	35%	40%	36%
	T_VS	32%	48%	38%	36%	40%	36%
Évora	O_VS	32%	49%	39%	36%	42%	37%
	O_VD	32%	50%	40%	36%	44%	37%
	T_VD	31%	47%	37%	35%	40%	36%
	T_VS	31%	47%	37%	36%	40%	36%
Faro	O_VS	7%	23%	8%	13%	21%	13%
	O_VD	7%	23%	8%	12%	23%	15%
	T_VD	3%	21%	7%	12%	18%	13%
	T_VS	3%	21%	7%	13%	18%	13%
Lisboa	O_VS	26%	45%	33%	31%	38%	32%
	O_VD	26%	45%	34%	31%	39%	33%
	T_VD	26%	43%	32%	31%	36%	32%
	T_VS	26%	43%	32%	31%	36%	31%
Porto	O_VS	40%	55%	46%	42%	47%	42%
	O_VD	40%	56%	46%	41%	49%	43%
	T_VD	39%	53%	45%	41%	46%	42%
	T_VS	39%	53%	44%	42%	45%	42%

Tabela J3 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método SLR anualmente: estufas cuja fração de área projetada na fachada é 100 % (casos AB_100)

	Tipo de estufa	AB_100_30°	AB_100_60°	AB_100_90°
Bragança	O_VS	53%	73%	61%
	O_VD	56%	75%	62%
	T_VD	54%	68%	59%
	T_VS	52%	73%	59%
Coimbra	O_VS	1%	47%	24%
	O_VD	6%	50%	24%
	T_VD	14%	38%	20%
	T_VS	3%	46%	20%
Évora	O_VS	10%	43%	20%
	O_VD	3%	46%	19%
	T_VD	3%	33%	13%
	T_VS	6%	42%	14%
Faro	O_VS	242%	45%	89%
	O_VD	235%	49%	105%
	T_VD	159%	57%	95%
	T_VS	162%	31%	88%
Lisboa	O_VS	44%	28%	1%
	O_VD	36%	30%	3%
	T_VD	16%	16%	7%
	T_VS	33%	28%	6%
Porto	O_VS	16%	55%	36%
	O_VD	21%	58%	36%
	T_VD	20%	47%	32%
	T_VS	18%	54%	32%

Anexo K – Valores absolutos dos erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado

Tabela K1 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado: estufas anexas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos A_70 e A_30)

	Tipo de estufa	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°
Bragança	O_VS	82%	85%	83%	57%	62%	66%
	O_VD	84%	85%	86%	62%	63%	65%
	T_VD	85%	85%	86%	62%	63%	65%
	T_VS	85%	86%	86%	63%	65%	66%
Coimbra	O_VS	62%	70%	67%	8%	20%	29%
	O_VD	67%	70%	72%	18%	22%	26%
	T_VD	69%	71%	73%	21%	25%	28%
	T_VS	70%	72%	74%	23%	27%	30%
Évora	O_VS	59%	68%	66%	1%	14%	24%
	O_VD	64%	68%	70%	10%	16%	21%
	T_VD	66%	69%	71%	14%	19%	23%
	T_VS	67%	71%	72%	17%	22%	25%
Faro	O_VS	27%	16%	15%	196%	136%	101%
	O_VD	16%	10%	23%	174%	139%	118%
	T_VD	15%	27%	33%	136%	112%	96%
	T_VS	19%	32%	37%	125%	101%	88%
Lisboa	O_VS	46%	59%	56%	30%	11%	2%
	O_VD	52%	58%	62%	18%	9%	3%
	T_VD	57%	61%	63%	11%	4%	1%
	T_VS	59%	63%	65%	7%	0%	5%
Porto	O_VS	68%	75%	72%	24%	33%	41%
	O_VD	72%	75%	76%	31%	35%	38%
	T_VD	74%	75%	77%	34%	37%	39%
	T_VS	75%	77%	78%	36%	39%	41%

Tabela K2 – Erros anuais cometidos pela aplicação do método integrado: estufas integradas cuja fração de área projetada na fachada é 70 e 30 % (casos B_70 e B_30)

	Tipo de estufa	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
Bragança	O_VS	83%	84%	85%	60%	61%	62%
	O_VD	82%	82%	84%	60%	60%	61%
	T_VD	82%	82%	84%	60%	60%	62%
	T_VS	83%	84%	85%	61%	62%	63%
Coimbra	O_VS	62%	65%	68%	11%	13%	15%
	O_VD	59%	61%	65%	9%	9%	12%
	T_VD	63%	64%	67%	14%	15%	17%
	T_VS	65%	67%	70%	16%	18%	20%
Évora	O_VS	58%	63%	66%	2%	4%	8%
	O_VD	55%	58%	62%	0%	1%	4%
	T_VD	59%	61%	64%	6%	7%	10%
	T_VS	62%	65%	67%	8%	11%	14%
Faro	O_VS	49%	17%	0%	248%	229%	211%
	O_VD	59%	38%	16%	255%	248%	229%
	T_VD	9%	1%	11%	183%	176%	163%
	T_VS	2%	11%	20%	177%	162%	148%
Lisboa	O_VS	44%	51%	56%	32%	29%	24%
	O_VD	40%	44%	51%	35%	34%	29%
	T_VD	48%	50%	55%	24%	22%	18%
	T_VS	52%	55%	59%	21%	17%	13%
Porto	O_VS	69%	71%	74%	27%	28%	30%
	O_VD	66%	68%	71%	25%	25%	28%
	T_VD	69%	70%	72%	29%	29%	32%
	T_VS	71%	73%	74%	30%	32%	34%

Anexo L – Erros cometidos pela aplicação do método SLR a várias orientações

Tabela L1 – Erros cometidos pela aplicação do método SLR a várias orientações (%)

Orientação		S	SE/SO			E/O			NE/NO			N		
Método		-	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Estufas	A_70_30°	39	28	25	20	34	4	12	46	19	8	51	31	7
	A_70_60°	23	19	14	13	19	-2	2	21	16	-5	22	25	14
	A_70_90°	10	6	4	2	11	-8	-2	18	17	-2	21	21	-1
	A_30_30°	25	21	17	15	25	5	9	31	13	3	33	26	-6
	A_30_60°	17	15	11	11	16	3	5	17	10	-4	17	21	15
	A_30_90°	9	8	6	5	10	-1	2	13	-9	-2	15	15	-5
	B_70_30°	38	27	30	23	27	-2	7	35	23	1	39	32	4
	B_70_60°	25	19	19	16	16	-5	1	17	22	10	17	33	21
	B_70_90°	16	9	7	3	13	11	-3	22	21	2	26	23	5
	B_30_30°	32	26	24	20	30	4	9	39	17	3	44	25	7
	B_30_60°	30	26	19	17	27	3	6	30	13	-1	32	20	-7
	B_30_90°	22	18	12	10	22	0	5	30	-9	7	34	11	10
	AB_100_30°	46	32	31	24	38	17	-6	55	42	-7	64	54	-4
	AB_100_60°	28	22	8	6	22	19	-13	26	38	23	30	49	30
AB_100_90°	9	4	-9	11	10	25	-18	23	37	17	30	40	14	

Anexo M – Poupança de energia devida à estufa

Tabela M1 – Poupança de energia anual para o aquecimento do edifício: casos A_30 e B_30 (%)

Caso	A_30_30°	A_30_60°	A_30_90°	B_30_30°	B_30_60°	B_30_90°
PS	28	22	19	15	13	12
PD	28	24	21	15	14	13
VD	25	21	19	12	11	10
VS	24	20	17	12	10	8
PD (SE/SO)	24	21	19	13	12	11
PD (E/O)	13	12	12	6	7	7
PD (NE/NO)	4	4	7	2	2	4
PD (N)	0	1	5	0	1	3

Tabela M2 – Poupança de energia anual para o aquecimento do edifício: casos A_70 e B_70 (%)

Caso	A_70_30°	A_70_60°	A_70_90°	B_70_30°	B_70_60°	B_70_90°
PS	20	11	6	5	-1	-4
PD	21	15	10	6	1	-2
VD	18	13	10	4	-1	-3
VS	17	10	8	3	-2	-5
PD (SE/SO)	18	13	10	5	2	0
PD (E/O)	10	7	7	2	0	-1
PD (NE/NO)	3	2	4	0	0	0
PD (N)	0	0	3	-1	-1	0

Tabela M3 – Poupança de energia anual para o aquecimento do edifício: casos AB_100 (%)

Caso	AB_100_30°	AB_100_60°	AB_100_90°
PS	30	20	16
PD	31	24	20
VD	29	24	21
VS	28	21	19
PD (SE/SO)	27	21	18
PD (E/O)	16	14	13
PD (NE/NO)	5	5	7
PD (N)	1	2	6