



UAAlg

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

*Análise das necessidades nominais de arrefecimento
do RCCTE com base no ESP-r e na ISO 13790*

André Correia da Rocha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis e Gestão de Energia - Ramo Tecnológico

Trabalho efetuado sob a orientação de

Orientadora : professora doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

Coorientador : professor eng.º Armando da Conceição Costa Inverno

2012

*Análise das necessidades nominais de arrefecimento
do RCCTE com base no ESP-r e na ISO 13790*

André Correia da Rocha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis e Gestão de Energia - Ramo Tecnológico

Trabalho efetuado sob a orientação de

Orientadora : professora doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

Coorientador : professor eng.º Armando da Conceição Costa Inverno

Análise das necessidades nominais de arrefecimento do RCCTE com base no ESP-r e na ISO13790

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Copyright © 2012 by André Correia da Rocha

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha avó Nita

Agradecimentos

Começo por agradecer à minha orientadora, professora doutora Marta Oliveira Panão, pela dedicação e eficácia com que tratou as minhas dúvidas, por ser um exemplo de determinação e organização e pelo interessante desafio que me colocou (tema desta dissertação). Um obrigado grande também aos habitantes do LNEG, que sempre me fizeram sentir em casa e me deram todo o apoio que precisei, nomeadamente à dr.^a Susana Camelo, eng.^o Álvaro Ramalho, arq.^a Márcia Tavares, doutora Laura Aelenei e doutor Hélder Gonçalves.

Agradeço ao meu coorientador, professor eng.^o Armando Inverno, por ter estado sempre disponível, pela sua grande sabedoria e humanismo.

Ao professor doutor Artur Gonçalves, que voluntariamente sacrificou parte das suas férias para rever o português desta dissertação. Obrigado também ao eng.^o Gonçalo Noronha pelo *british touch* do *abstract* e ao eng.^o Rui Reis pelo tratamento das imagens do anexo H.

À minha família que me aturou e, surpreendentemente, me continua a aturar (não sei como têm paciência...) e aos meus amigos que me aturam porque querem: são ambos muito importantes para mim!

No primeiro lugar do pódio agradeço à minha avó Nita, por ter acreditado sempre no meu trabalho e me ter dado toda a força do mundo. Obrigado. É a Maior!

Resumo

A verificação dos requisitos do *Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios* (RCCTE, decreto-lei 80/2006) é obrigatória para todos os edifícios em fase de licenciamento. Este documento constitui um método de cálculo que estima a energia gasta por um edifício para o manter confortável, pelo que a sua fidelidade se reveste da maior importância.

O presente trabalho surge na sequência da observação de diferenças muito significativas entre as necessidades nominais de arrefecimento calculadas pelo RCCTE e as obtidas por meio de programas de simulação dinâmica. Verifica-se ainda que a generalidade dos estudos existentes não analisa as trocas de calor pelo solo.

Nesta dissertação, são comparadas as necessidades de arrefecimento (no período de junho a setembro) estimadas pelo RCCTE com as obtidas por meio de simulação dinâmica (através do programa ESP-r).

A moradia considerada é térrea e unifamiliar, orientada segundo os pontos cardeais principais e secundários e sujeita aos climas de Bragança, Porto, Coimbra, Lisboa, Évora e Faro.

As não-concordâncias são analisadas e justificadas, sendo propostas alterações ao regulamento com base nos textos normativos internacionais ISO 13790 e ISO 13370. Chegou-se à conclusão que a modelação do solo em programas de simulação dinâmica tem de respeitar as considerações do anexo D da ISO 13370 e que o desfasamento observado fica colmatado com a inclusão das perdas radiativas para o céu segundo o procedimento aproximado da ISO 13790 e das perdas pelo solo segundo o método aplicado pelo RCCTE no inverno.

PALAVRAS-CHAVE: Necessidades nominais de arrefecimento, ganhos, perdas, fator de utilização, RCCTE, ISO13790, ESP-r

Abstract

In the licencing stage it's mandatory for every building to comply with the regulations towards thermic behaviour of buildings (RCCTE, Law-Decree 80/2006). In order to keep a building comfortable to its inhabitants, this work documents a method to calculate the overall energy spent towards this goal. So the accuracy of this method is of prime importance.

This work was developed after observing a noticeable difference between the nominal needs of cooling calculated by the RCCTE and dynamic simulation programs. This is mostly due to the lack of accountability for the heat transfer with the soil in the general studies.

The cooling needs (during a time gap between June and September) are estimated using the RCCTE are thus compared with a dynamic simulation method (the ESP-r program). The results are then analysed in this dissertation.

This study was done over a single-story, single-family house, facing the prime and secondary cardinal points and subjected to the climatic fluctuations of Braganza, Oporto, Coimbra, Lisbon, Evora and Faro.

Using the international normative texts ISO 13790 and ISO 13370, the discrepancies between the sets of results are analysed and thus justified. This will produce proposals which will hopefully affect changes to the regulation bridging the gaps that were described earlier. With the work documented here there was a realization that by including soil modelling in dynamic simulation programs there is a need for compliance with the considerations of annex D of ISO 13370 and to shorten the observed lag, irradiative losses to the sky must be accounted for using the approximated procedure in ISO 13790 and the losses to the ground as in RCCTE in Winter.

KEYWORDS: Cooling needs, heat gains, heat transfer,utilization factor, RCCTE, ISO13790, ESP-r

Índice geral

| | |
|---|----|
| Agradecimentos..... | 7 |
| Resumo..... | 9 |
| Abstract..... | 11 |
| Índice geral..... | 13 |
| Índice de figuras..... | 19 |
| Índice de quadros..... | 23 |
| Simbologia..... | 25 |
| Subscritos..... | 28 |
| Simbologia usada nos gráficos..... | 30 |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 33 |
| 1.1 Contexto do trabalho e objetivos..... | 33 |
| 1.2 Organização do trabalho..... | 35 |
| | |
| 2. RCCTE..... | 37 |
| 2.1 Método de cálculo do RCCTE para a energia de arrefecimento..... | 37 |
| 2.1.1 Expressão geral (N_{vc})..... | 37 |
| 2.1.2 Fator de utilização dos ganhos (η)..... | 37 |
| 2.1.3 Ganhos..... | 39 |
| 2.1.4 Perdas..... | 40 |
| 2.2 Folhas de cálculo do RCCTE..... | 41 |
| | |
| 3. SIMULAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS E O PROGRAMA ESP-r..... | 45 |
| 3.1 História e funcionamento do programa..... | 45 |
| 3.2 Algoritmos de cálculo..... | 46 |
| 3.2.1 Condução..... | 46 |
| 3.2.2 Convecção..... | 47 |
| 3.2.3 Radiação..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 4. NORMAS INTERNACIONAIS ISO..... | 51 |
| 4.1 Enquadramento histórico..... | 51 |
| 4.2 Expressão geral (Nvc)..... | 52 |
| 4.3 Ganhos..... | 52 |
| 4.3.1 Ganhos internos..... | 53 |
| 4.3.2 Fator de redução para espaços adjacentes não-úteis segundo a ISO 13789..... | 53 |
| 4.3.3 Ganhos solares pela envolvente opaca..... | 54 |
| 4.3.4 Ganhos solares pela envolvente envidraçada (método aproximado e pormenorizado). 54 | |
| 4.3.5 Perdas radiativas para o céu..... | 55 |
| 4.4 Perdas..... | 56 |
| 4.4.1 Perdas por condução..... | 56 |
| 4.4.2 Perdas por ventilação..... | 57 |
| 4.4.3 Perdas pelo solo modelo de cálculo (ISO 13370)..... | 57 |
| 4.4.4 Perdas pelo solo aproximação mensal, sazonal e anual..... | 59 |
| 4.5 Fator de utilização das perdas..... | 60 |
| 4.5.1 Capacidade calorífica de elementos construtivos (ISO 13786)..... | 61 |
| 5. COMPARAÇÃO ALGÉBRICA DO RCCTE COM A ISO 13790..... | 63 |
| 5.1 Equivalência entre as expressões gerais de Nvc..... | 63 |
| 5.2 Diferença entre os dois métodos..... | 64 |
| 6. MODELAÇÃO DA MORADIA ANALISADA..... | 67 |
| 6.1 Caso de estudo..... | 67 |
| 6.2 Procedimento..... | 68 |
| 6.3 Obtenção dos ganhos, perdas, fator de utilização e Nvc pelo ESP-r..... | 69 |
| 7. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA..... | 71 |
| 7.1 Necessidades energéticas de arrefecimento..... | 71 |
| 7.2 Aproximação climática..... | 72 |
| 7.3 Discriminação dos ganhos, perdas e fator de utilização..... | 75 |

| | |
|--|-----|
| 8. ANÁLISE DOS GANHOS..... | 77 |
| 8.1 Variedade climática e rotação da moradia..... | 77 |
| 8.2 Avaliação das perdas radiativas para o céu (ISO 13790)..... | 78 |
| 8.3 Dissipação de ganhos pelo chão..... | 80 |
| 8.4 Aumento de perdas radiativas provocadas pela radiação solar..... | 83 |
| 8.5 Energia solar pormenorizada pelos envidraçados sem sombreamento..... | 85 |
| 8.5.1 Frações da energia solar direta (a_{dir}) e ângulo de incidência (θ_{dir})..... | 85 |
| 8.5.2 Fatores solares relativos à radiação direta..... | 87 |
| 8.5.3 Fatores solares resultantes..... | 88 |
| 8.5.4 Comparação do modelo pormenorizado com o usado pelo RCCTE..... | 89 |
| 8.5.5 Ganhos calculados (com modelo pormenorizado) vs ganhos simulados..... | 90 |
| 8.6 Percentagem de sombreamento..... | 91 |
| 8.6.1 Frações reais de energia solar acima de 300 W..... | 91 |
| 8.6.2 Inclusão das frações reais nos ganhos e comparação com os ganhos originais..... | 92 |
| 8.6.3 Consideração de sombreamento nulo a norte e nordeste..... | 93 |
| 8.7 Inclusão do procedimento pormenorizado abaixo e acima de 300 W..... | 94 |
| 8.7.1 Valores de a_{dir} e θ_{dir} acima e abaixo de 300 W..... | 94 |
| 8.7.2 Fatores solares relativos à radiação direta abaixo e acima de 300 W..... | 95 |
| 8.7.3 Fatores solares resultantes..... | 96 |
| 8.7.4 Comparação do modelo pormenorizado com o usado pelo RCCTE..... | 97 |
| 8.7.5 Impacto da correção exclusiva da percentagem de sombreamento..... | 98 |
| 9. ANÁLISE DAS PERDAS..... | 101 |
| 9.1 Verificação do problema chão..... | 101 |
| 9.2 Perdas pela garagem..... | 101 |
| 9.2.1 Valor obtido através do ESP-r..... | 101 |
| 9.2.2 Perdas pela garagem segundo o método do RCCTE para o inverno..... | 102 |
| 9.2.3 Perdas pela garagem segundo a ISO 13789..... | 103 |
| 9.2.4 Variação de τ com ventilação (ISO 13789)..... | 104 |
| 9.3 Perdas pelo sótão..... | 105 |
| 9.3.1 Valor obtido pelo ESP-r..... | 105 |
| 9.3.2 Precisão da aproximação do ITE50 para as perdas pelo sótão..... | 105 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 9.4 | Variação das perdas com a diferença de temperatura operativa..... | 107 |
| 9.5 | Verificação do problema chão em Nvc..... | 108 |
| 9.6 | Perdas pelo solo segundo a ISO 13370 e método do RCCTE para o inverno..... | 109 |
| 9.6.1 | Inclusão das perdas pelo solo em FCV.1a..... | 112 |
| 9.6.2 | Perdas pelo solo segundo o procedimento adotado (medidas pelo ESP-r)..... | 113 |
| 9.7 | Simulação no ESP-r com chão modelado segundo o anexo D da ISO13370..... | 115 |
| 9.7.1 | Pressupostos do anexo D..... | 115 |
| 9.7.2 | Perdas obtidas..... | 116 |
| 9.7.3 | Comparação das perdas calculadas com as simuladas..... | 117 |
| 10. | ANÁLISE DO FATOR DE UTILIZAÇÃO..... | 119 |
| 10.1 | Relação entre η_p e γ | 119 |
| 10.2 | Teste da constante a_c proposta pelo RCCTE..... | 120 |
| 10.3 | Teste da constante a_c proposta pela aproximação sazonal da ISO 13790..... | 122 |
| 10.4 | Teste da constante a_c proposta pela aproximação mensal da ISO 13790..... | 123 |
| 10.5 | Consideração da situação de erro médio nulo (a_c matematicamente ideal)..... | 124 |
| 11. | ANÁLISE DAS CORREÇÕES EM NVC..... | 127 |
| 11.1 | Erro resultante da não-consideração do anexo D em simulações dinâmicas..... | 127 |
| 11.2 | Inclusão das perdas radiativas (ISO 13790) no cálculo de Nvc..... | 128 |
| 11.3 | Inclusão da energia solar pormenorizada (ISO 13790) em Nvc..... | 129 |
| 11.4 | Inclusão das perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) em Nvc..... | 129 |
| 11.5 | Impacto em Nvc das perdas pelo solo e radiativas com o fator sombreamento..... | 130 |
| 11.6 | Energia solar pelos envidraçados pormenorizada em Nvc (com sombreamento)..... | 132 |
| 11.7 | Estimativa percentual das correções propostas no cálculo de Nvc..... | 133 |
| 12. | CONCLUSÕES..... | 137 |
| | Bibliografia..... | 139 |
| | Anexo A - Folhas de cálculo do RCCTE usadas para obtenção de Nvc..... | 143 |
| | Anexo B - Ilustração representativa do funcionamento modular do ESP-r..... | 149 |

| | |
|---|-----|
| Anexo C - Determinação do ângulo entre a radiação solar e a superfície da envolvente..... | 151 |
| Anexo D - Propriedades óticas dos envidraçados aplicados..... | 153 |
| Anexo E - Características dos climas aplicados..... | 157 |
| Anexo F - Temperaturas interiores médias reais..... | 161 |
| Anexo G - Método pormenorizado de perdas radiativas para o céu..... | 163 |
| Anexo H - Planta da casa pormenorizada..... | 165 |
| Anexo I - Características termofísicas dos elementos construtivos..... | 169 |
| Anexo J - Perdas radiativas segundo a temperatura superficial exterior da envolvente..... | 173 |
| Anexo K - Valores de α_{dir} e θ_{dir} obtidos por outras bases de dados..... | 175 |
| Anexo L - Valores de ganhos com anulação do sombreamento na orientação a norte..... | 177 |
| Anexo M - Aumento da altura do sótão..... | 179 |
| Anexo N - Temperaturas virtuais do solo (anexo D da ISO 13770)..... | 183 |
| Anexo O - Gráficos referentes aos dados estatísticos do quadro 10.2..... | 185 |
| Anexo P - Gráficos referentes aos dados estatísticos do quadro 11.1..... | 187 |
| Anexo Q - Gráficos relativos à inclusão separada de cada fator corretivo analisado..... | 189 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 6.1: Modelo da moradia no ESP-r sem rotação..... | 67 |
| Fig. 7.1: Nvc segundo o RCCTE vs Nvc simulado pelo ESP-r (sem sombreamento)..... | 71 |
| Fig. 7.2: Nvc pelo RCCTE (com dados climáticos reais) vs Nvc segundo o ESP-r..... | 73 |
| Fig. 7.3: Erro em Nvc produzido pela aproximação climática (sem sombreamento)..... | 73 |
| Fig. 7.4: Erro em Nvc produzido pela aproximação climática (com sombreamento interior)..... | 74 |
| Fig. 7.5: Erro em Nvc produzido pela aproximação climática (com sombreamento exterior)..... | 74 |
| Fig. 7.6: Ganhos solares e internos (RCCTE original vs ESP-r)..... | 75 |
| Fig. 7.7: Perdas por condução e renovação de ar (RCCTE original vs ESP-r)..... | 76 |
| Fig. 7.8: Fator de utilização (RCCTE original vs ESP-r)..... | 76 |
| Fig. 8.1: Ganhos da moradia em função da orientação geográfica. Referência aos valores simulados e à média de cada rotação..... | 77 |
| Fig. 8.2: Inclusão das perdas radiativas para o céu nos ganhos calculados e comparação com os ganhos obtidos pelo ESP-r..... | 79 |
| Fig. 8.3: Comparação dos ganhos calculados (com perdas para o céu) com os simulados (obtidos com chão adiabático)..... | 80 |
| Fig. 8.4: Ganhos segundo o RCCTE vs ganhos segundo o ESP-r (sem trocas de calor pelo chão nem pelo céu)..... | 80 |
| Fig. 8.5: Ganhos dissipados pelo chão (segundo o procedimento adotado)..... | 81 |
| Fig. 8.6: Ganhos dissipados pelo chão (a modelação do solo no ESP-r foi realizada segundo os pressupostos do anexo D da ISO 13370)..... | 82 |
| Fig. 8.7: Inclusão das perdas radiativas pelo céu nos ganhos calculados e comparação com os ganhos obtidos pelo ESP-r (com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 83 |
| Fig. 8.8: Os ganhos solares para o envidraçado normal ($g_{\perp}=0,727$) estão sobrestimados no RCCTE em cerca de 3,0 kWh/m ² (relativamente ao método pormenorizado da ISO 13790)..... | 89 |
| Fig. 8.9: Os ganhos solares para o sombreamento interior ($g_{\perp}=0,502$) estão sobrestimados no RCCTE em cerca de 1,8 kWh/m ² (relativamente ao método pormenorizado da ISO 13790)..... | 89 |
| Fig. 8.10: Os ganhos solares para o sombreamento exterior ($g_{\perp}=0,369$) estão sobrestimados no RCCTE em cerca de 1,4 kWh/m ² (relativamente ao método pormenorizado da ISO 13790)..... | 90 |
| Fig. 8.11: Ganhos calculados incluindo as perdas radiativas pelo céu e fator solar pormenorizado vs ganhos obtidos pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13790), sem sombreamento..... | 90 |
| Fig. 8.12: Erro no cálculo dos ganhos, resultante da generalização da aplicação de 70% de sombreamento (interior) em todas as direções..... | 92 |
| Fig. 8.13: Erro no cálculo dos ganhos, resultante da generalização da aplicação de 70% de sombreamento (exterior) em todas as direções..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 8.14: Anulação do sombreamento (interior) a N e NE no cálculo original dos ganhos pelo RCCTE vs cálculo análogo com a percentagem exata de sombreamento..... | 93 |
| Fig. 8.15: Anulação do sombreamento (exterior) a N e NE no cálculo original dos ganhos pelo RCCTE vs cálculo análogo com a percentagem exata de sombreamento..... | 93 |
| Fig. 8.16: Comparação do procedimento original do RCCTE com o resultante da precisão dos valores de a_{dir} e θ_{dir} abaixo e acima de 300 W, para o sombreamento interior..... | 97 |
| Fig. 8.17: Comparação do procedimento original do RCCTE com o resultante da precisão dos valores de a_{dir} e θ_{dir} abaixo e acima de 300 W, para o sombreamento exterior..... | 98 |
| Fig. 8.18: Desfasamento nos ganhos, provocado pela correção exclusiva da percentagem de sombreamento, na situação de sombreamento interior..... | 98 |
| Fig. 8.19: Desfasamento nos ganhos, provocado pela correção exclusiva da percentagem de sombreamento, na situação de sombreamento exterior..... | 99 |
| Fig. 9.1: Comparação das perdas calculadas pelo RCCTE com as obtidas pelo ESP-r (sem o fator chão)..... | 101 |
| Fig. 9.2: Perdas pela garagem obtidas através do ESP-r..... | 102 |
| Fig. 9.3: Perdas calculadas com inclusão da garagem segundo o modelo usado pelo RCCTE para o inverno (vs perdas pelo ESP-r)..... | 103 |
| Fig. 9.4: Perdas com inclusão da garagem segundo a ISO 13789 (vs perdas pelo ESP-r)..... | 103 |
| Fig. 9.5: Perdas pelo sótão obtidas através do ESP-r..... | 105 |
| Fig. 9.6: Precisão do modelo do ITE50 para o sótão quanto às perdas..... | 106 |
| Fig. 9.7: Dependência das perdas com a diferença de temperatura interior/exterior ($\Delta\theta$)..... | 107 |
| Fig. 9.8: Nvc calculado com perdas radiativas para o céu vs Nvc segundo o ESP-r (sem trocas de calor pelo chão)..... | 108 |
| Fig. 9.9: Comparação das perdas totais calculadas (incluindo o fator solo) com as obtidas pelo ESP-r (segundo o procedimento subjacente ao quadro 6.1)..... | 113 |
| Fig. 9.10: Perdas pelo chão medidas através do ESP-r (segundo o procedimento subjacente ao quadro 6.1)..... | 114 |
| Fig. 9.11: Perdas segundo o RCCTE vs perdas pelo ESP-r (obtidas com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 117 |
| Fig. 9.12: Perdas calculadas com inclusão do solo (segundo a aproximação mensal do anexo A da ISO 13370) vs perdas pelo ESP-r (obtidas com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 118 |
| Fig. 9.13: Perdas calculadas com inclusão do solo (segundo o modelo aplicado pelo RCCTE no inverno) vs perdas pelo ESP-r (obtidas com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 118 |
| Fig. 10.1: Fator de utilização das perdas, η_p , vs razão entre ganhos e perdas, γ (parâmetros obtidos através dos dados do ESP-r)..... | 120 |
| Fig. 10.2: Fator de utilização das perdas (η_p) segundo a ISO 13790 (obtido com γ do ESP-r e a_c do RCCTE, $a_{RCCTE} = 4,2$) vs γ do ESP-r. Os pontos η_{ESP} correspondem aos dados simulados (da fig. 10.1)..... | 121 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 10.3: Fator de utilização das perdas (η_p) segundo a ISO 13790 (obtido com γ do ESP-r e a_c do RCCTE, $a_{cRCCTE}=4,2$), comparado com η_p simulado..... | 121 |
| Fig. 10.4: Fator de utilização das perdas (η_p) calculado com γ do ESP-r e a partir dos valores de $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ sugeridos pelo cálculo sazonal da ISO 13790 ($a_c=2,47$) vs η_p simulado..... | 123 |
| Fig. 10.5: Fator de utilização das perdas (η_p) calculado com γ do ESP-r e a partir dos valores de $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ sugeridos pelo cálculo mensal da ISO 13790 ($a_c=4,34$) vs η_p simulado..... | 123 |
| Fig. 10.6: Fator de utilização das perdas (η_p) calculado com a_c ideal ($a_c=4,90$) vs η_p simulado.. | 124 |
| Fig. 10.7: Fator de utilização das perdas (η_p) com $a_c=4,90$ (situação de desfaseamento nulo entre η_p calculado e simulado) vs γ . Os pontos η_{ESP} correspondem aos dados simulados (da fig. 10.1)..... | 125 |
| Fig. 11.1: Erro em N_{vc} simulado (sem sombreamento), resultante da não consideração do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão. É sempre negativo (em média $8,7 \text{ kWh/m}^2$), máximo na rot.135° em Faro ($15,6 \text{ kWh/m}^2$) e mínimo no Porto sem rotação ($1,1 \text{ kWh/m}^2$)..... | 127 |
| Fig. 11.2: N_{vc} sem sombreamento obtido pelo RCCTE vs N_{vc} segundo o ESP-r (com consideração do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão)..... | 128 |
| Fig. 11.3: N_{vc} sem sombreamento, calculado com inclusão das perdas radiativas pelo céu vs N_{vc} obtido pelo ESP-r, de acordo com o anexo D da ISO 13370..... | 128 |
| Fig. 11.4: N_{vc} sem sombreamento, calculado com perdas radiativas para o céu e análise pormenorizada da energia solar vs N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 129 |
| Fig. 11.5: N_{vc} sem sombreamento, calculado com perdas radiativas para o céu, análise pormenorizada da energia solar (ISO 13790) e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 129 |
| Fig. 11.6: Comparação de N_{vc} calculado pelo RCCTE (sujeito a sombreamento interior) com N_{vc} obtido pelo ESP-r, de acordo com o anexo D da ISO 13370..... | 130 |
| Fig. 11.7: Comparação de N_{vc} calculado pelo RCCTE (sujeito a sombreamento exterior) com N_{vc} obtido pelo ESP-r, de acordo com o anexo D da ISO 13370..... | 130 |
| Fig. 11.8: N_{vc} sujeito a sombreamento interior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu (ISO13790) e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 131 |
| Fig. 11.9: N_{vc} sujeito a sombreamento exterior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu (ISO 13790) e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 131 |
| Fig. 11.10: N_{vc} sujeito a sombreamento interior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu, fator solar pormenorizado acima e abaixo de 300 W (ISO 13790), percentagem exata de sombreamento e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 132 |
| Fig. 11.11: N_{vc} sujeito a sombreamento exterior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu, fator solar pormenorizado acima e abaixo de 300 W (ISO 13790), percentagem exata de sombreamento e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370)..... | 133 |

- Fig. 11.12: Representação gráfica da equação de N_{vc} . A coordenada y do ponto de interseção da linha que parte dum determinado valor de ganhos (eixo das ordenadas) com a linha resultante da projeção vertical do valor de perdas (abscissas), corresponde ao valor de N_{vc} calculado segundo a ISO 13790 (ou RCCTE). Foi considerada a constante a_c sugerida pelo RCCTE ($a_c=4,2$)..... 135
- Fig. 11.13: Peso de cada fator corretivo no valor calculado de N_{vc} (para o caso de sombreamento interior)..... 136
- Fig. 11.14: Peso de cada fator corretivo no valor calculado de N_{vc} (para o caso de sombreamento exterior)..... 136

Índice de quadros

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1: Variação da massa superficial útil com o isolamento e localização no edifício..... | 38 |
| Quadro 2.2: Variação da massa superficial útil com a resistência térmica superficial..... | 39 |
| Quadro 6.1: Temperaturas mensais médias do solo do Solar XXI..... | 69 |
| Quadro 7.1: Dados climáticos do RCCTE para o período de verão..... | 72 |
| Quadro 7.2: Dados climáticos reais para o período de verão..... | 72 |
| Quadro 8.1: Modelo simplificado de perdas radiativas para o céu..... | 79 |
| Quadro 8.2: Aumento de perdas radiativas devido aos ganhos solares..... | 84 |
| Quadro 8.3: Fração de energia solar direta, a_{dir} [-], segundo os dados climáticos usados no ESP-r..... | 86 |
| Quadro 8.4: Ângulo de incidência, θ_{dir} [°]..... | 86 |
| Quadro 8.5: Fatores solares do vidro normal relativos aos ângulos de incidência..... | 87 |
| Quadro 8.6: Fatores solares do sombreamento interior relativos aos ângulos de incidência..... | 87 |
| Quadro 8.7: Fatores solares do sombreamento exterior relativos aos ângulos de incidência..... | 87 |
| Quadro 8.8: Fatores solares relativos à radiação difusa..... | 87 |
| Quadro 8.9: Fator solar do vidro normal segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790. | 88 |
| Quadro 8.10: Fator solar do sombreamento interior segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790..... | 88 |
| Quadro 8.11: Fator solar do sombreamento exterior segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790..... | 88 |
| Quadro 8.12: Fração de energia solar relativa à incidência de radiação solar acima dos 300 W, por orientação e clima (repare-se que a orientação a norte nunca é sombreada)..... | 91 |
| Quadro 8.13: Erro percentual da fração de sombreamento indicada pelo RCCTE..... | 91 |
| Quadro 8.14: Fração de energia direta para radiação total inferior a 300 W..... | 94 |
| Quadro 8.15: Ângulo de incidência para radiação total inferior a 300 W..... | 94 |
| Quadro 8.16: Fração de energia direta para radiação total acima de 300 W inclusive..... | 95 |
| Quadro 8.17: Ângulo de incidência para radiação total superior a 300 W..... | 95 |
| Quadro 8.18: Fator solar do vidro incolor correspondente ao ângulo de incidência do quadro 8.15..... | 95 |
| Quadro 8.19: Fatores solares do sombreamento interior respetivos aos ângulos de incidência do quadro 8.17..... | 96 |
| Quadro 8.20: Fatores solares do sombreamento exterior relativos aos ângulos de incidência do quadro 8.17..... | 96 |
| Quadro 8.21: Fator solar do vidro incolor, obtido segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790, para o período de radiação total inferior a 300 W..... | 96 |

| | |
|---|-----|
| Quadro 8.22: Fator solar do sombreamento interior, obtido segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790, para o período de radiação total superior a 300 W... | 97 |
| Quadro 8.23: Fator solar do sombreamento exterior, obtido segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790, para o período de radiação total superior a 300 W... | 97 |
| Quadro 9.1: Variação de τ com a ventilação entre a zona-útil e a garagem (ISO 13789)..... | 104 |
| Quadro 9.2: Variação de τ com a ventilação entre a garagem e o exterior (ISO 13789)..... | 104 |
| Quadro 9.3: Coeficientes de transferência de calor pelo solo (H_g , H_{pi} e H_{pe})..... | 109 |
| Quadro 9.4: Potência anual e energia transferida para o solo durante o verão, segundo a aproximação anual da norma ISO 13370..... | 110 |
| Quadro 9.5: Perdas pelo solo no verão segundo o modelo sinusoidal da ISO 13370..... | 110 |
| Quadro 9.6: Perdas pelo solo no verão segundo a aproximação mensal da ISO 13370..... | 111 |
| Quadro 9.7: Perdas pelo solo no verão segundo a aproximação sazonal da ISO 13370..... | 111 |
| Quadro 9.8: Perdas pelo solo, calculadas segundo o modelo aplicado pelo RCCTE no inverno... | 112 |
| Quadro 9.9: Perdas (FCV.1a) com o fator solo segundo a norma ISO 13370 e segundo o procedimento usado pelo RCCTE para o inverno ($\psi_{inv.rccte}$). Indicação do desfasamento (ξ), desvio padrão (σ) e declive (m) relativamente às perdas obtidas pelo ESP-r..... | 112 |
| Quadro 9.10: Temperaturas virtuais do solo no verão (anexo D da ISO 13370)..... | 116 |
| Quadro 9.11: Perdas totais segundo o ESP-r, obtidas considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão..... | 117 |
| Quadro 10.1: Cálculo da capacidade calorífica da habitação, C_m [MJ/K]..... | 122 |
| Quadro 10.2: Dados estatísticos relativos à comparação do fator de utilização das perdas calculado (a partir de γ_{ESP} e de a_c) com o verificado pelo ESP-r. A aplicação do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão (no ESP-r) não altera (significativamente) os resultados obtidos (os respetivos gráficos encontram-se no anexo O)..... | 125 |
| Quadro 11.1: Desfasamento médio (ξ [kWh/m ²]) entre N_{vc} calculado e N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370 e com sombreamento interior). É considerado o cálculo original de N_{vc} , a introdução das perdas radiativas para o céu e das perdas pelo solo, apenas as perdas para o céu e também o caso de perdas pelo solo (gráficos respetivos no anexo P). A linha inferior ($\Delta\xi$) apresenta a diminuição de desfasamento relativamente ao caso original..... | 134 |
| Quadro 11.2: Comparação de N_{vc} calculado com inclusão (separada) de fatores corretivos com N_{vc} sem correções. O peso de cada fator é também apresentado na forma percentual (para os dois tipos de sombreamento considerados)..... | 136 |

Simbologia

| | | |
|-----------------|--|-------------------------|
| a | Constante aplicada no cálculo do fator de utilização | [-] |
| A | Área | [m ²] |
| a_{dir} | Fração direta de insolação solar | [-] |
| a, b, m, p, q | Constantes no cálculo de h_c pelo ESP | [-] |
| b | Fator de redução para os espaços adjacentes não úteis | [-] |
| B' | Dimensão característica do chão | [m] |
| c | Calor específico | [J/(kg·°C)] |
| Cm | Capacidade calorífica do edifício | [J/K] |
| d_c | Dimensão característica | [m] |
| dt | Espessura total equivalente | [m] |
| E | Energia solar | [kWh/m ²] |
| F | Fator de forma | [-] |
| $f_{sombESP}$ | Fração de insolação sombreada (segundo clima do ESP) | [-] |
| F_g | Fração envidraçada | [-] |
| F_s | Fator de obstrução | [-] |
| F_w | Fator de correção da seletividade angular | [-] |
| g | Fator solar do vidro | [-] |
| GD | Graus Dia de Aquecimento | [°C·dia] |
| h | Coefficiente de transferência superficial | [W/(m ² ·K)] |
| H | Coefficiente de transferência | [W/K] |
| I | Radiação solar média | [W/m ²] |
| Ir | Insolação | [kWh/m ²] |
| I_t | Massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento | [kg/m ²] |
| j | unidade imaginária ($\sqrt{-1}$) | [-] |
| l | Comprimento da ponte térmica linear | [m] |
| M | Duração da estação de arrefecimento | [mês] |
| m | Declive | [-] |
| m_i | Massa do elemento da envolvente situada do lado interior do isolamento térmico | [kg/m ²] |
| M_{si} | Massa superficial útil do elemento i | [kg/m ²] |
| m_t | Massa total do elemento | [kg] |
| n | Número de meses da estação | [mês] |

| | | |
|------------|--|------------------------------|
| N_i | Necessidades nominais máximas de energia útil de aquecimento | [kWh/(m ² ·ano)] |
| N_{ic} | Necessidades nominais de energia útil de aquecimento | [kWh/(m ² ·ano)] |
| N_t | Necessidades nominais globais máximas de energia primária | [kgep/(m ² ·ano)] |
| N_{tc} | Necessidades nominais globais de energia primária | [kgep/(m ² ·ano)] |
| N_v | Necessidades nominais máximas de energia útil de arrefecimento | [kWh/(m ² ·ano)] |
| N_{vc} | Necessidades nominais de energia útil de arrefecimento | [kWh/(m ² ·ano)] |
| P | Perímetro | [m] |
| P_d | Pé direito | [m] |
| P_v | Soma das potências eléctricas de eventuais ventiladores | [W] |
| q | Balanço radiativo | [W] |
| Q | Energia | [kWh] (RCCTE), [MJ] (ISO) |
| q_i | Ganhos térmicos internos médios por área de pavimento útil | [W/m ²] |
| Q_i | Perdas totais (condução+renovação de ar) | [kWh] |
| R | Resistência térmica | [m ² ·K/W] |
| R_σ | Potência radiativa | [W/m ²] |
| R^2 | Coefficiente de determinação ($0 < R^2 < 1$) | [-] |
| Rph | Número de renovações horárias do ar interior | [h ⁻¹] |
| t | Tempo | [s] |
| T | Temperatura absoluta | [K] |
| T | Período das variações térmicas (ISO 13370) | [s] |
| U | Coefficiente de transmissão térmica | [W/(m ² ·K)] |
| V | Velocidade de escoamento | [W/(m ² ·K)] |
| v | Velocidade do vento | [m/s] |
| \dot{V} | Caudal de renovação de ar | [m ³ /s] |
| w | Espessura das paredes exteriores | [m] |
| X | Coefficiente de redução da ação solar relativamente à incidente a Sul, na estação de aquecimento | [-] |
| Z | Matriz de transferência de calor | |
| α | Coefficiente de absorção da parede | [-] |
| α | Absortividade (envidraçados) | [-] |

| | | |
|---------------|--|--------------------------------------|
| α | Difusibilidade térmica (lei de Fourier) | [m ⁴ /s] |
| α | Avanço do ciclo de perdas pelo solo relativamente ao ciclo da temperatura interior | [mês] |
| β | Atraso do ciclo de perdas pelo solo relativamente ao ciclo da temperatura exterior | [mês] |
| γ | Média dos termos coseno | [-] |
| δ | Profundidade de penetração periódica | [m] |
| ε | Emissividade | [-] |
| η | Fator de utilização | [-] |
| θ | Temperatura em graus Celsius | [°C] |
| θ | Ângulo entre os raios solares e uma superfície | [°] |
| κ | Capacidade calorífica por unidade de área | [J/(m ² ·K)] |
| λ | Condutibilidade térmica | [W/(m ^o ·C)] |
| Λ | Fator de forma | [-] |
| ξ | Razão entre a espessura da camada e a profundidade de penetração periódica | [-] |
| ξ | Desfasamento | [] |
| ρ | Massa específica | [kg/m ³] |
| σ | Constante de Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$) | [W/(m ² K ⁴)] |
| σ | Desvio padrão | [] |
| τ | Transmitância (envidraçados) | [-] |
| τ | Coefficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos | [-] |
| τ | Número do mês mais frio do ano (ISO 13370) | [mês] |
| τ | Constante de tempo (ISO 13790) | [h] |
| ϕ | Potência | [W] |
| ϕ_{vp} | Ângulo entre o vento e o plano | [°] |
| Φ | Potência de perdas pelo solo | [W] |
| χ | Coefficiente de transmissão térmica pontual | [W/K] |
| Ψ | Coefficiente de transmissão térmica linear | [W/(m·K)] |

Subscritos

| | |
|-----------------|--|
| ar | Ar |
| ad | Adjacente |
| atm | Atmosférica |
| Alt | Altura solar média |
| Arref | Arrefecimento (pag. 25) |
| an | Anual |
| amp | Amplitude |
| c | Calculado (RCCTE) |
| C | Cooling (arrefecimento) |
| cv | Convecção |
| céu | Céu |
| cond | Condução |
| dir | Radiação solar direta |
| dif | Radiação solar difusa |
| e | Externa, exterior |
| ef | Efetiva |
| f | Vertical (RCCTE) |
| f | <i>Floor</i> (chão, ISO 13370) |
| F | <i>Frame</i> (caixilho, ISO 13790) |
| fl | Fluido |
| g | Ganhos |
| g | Caixilho (RCCTE) |
| g | <i>Ground</i> (solo, ISO13370), estacionário (perdas solo) |
| h | Horizonte |
| i | Interior, interno |
| i,j,m,n,p,q,k,l | Índices genéricos |
| jan | Janela |
| m | Mensal |
| o | Horizontal |
| op | Opaco |
| obs | Obstáculos |
| p | Perdas |

| | |
|------|---------------------------------|
| pav | Pavimento útil |
| pi | Periódico interno |
| pe | Periódico externo |
| par | Parede |
| r | Radiativo |
| saz | Sazonal |
| se | Superficial externo |
| si | Superficial interno |
| somb | Sombreamento |
| so | Sólido |
| s | Solar |
| sup | Superfície |
| t | Total |
| T | Transmissão |
| tr | <i>Transfer</i> (transferência) |
| u | Condicionado (espaço não útil) |
| vd | Vidro |
| v | Ventilação |
| Virt | Virtual |
| w | Seletividade |
| x | Direção x |
| ⊥ | Perpendicular, normal |

Simbologia usada nos gráficos

| | |
|----------------|---|
| Nvc | Necessidades energéticas de arrefecimento |
| Qg | Ganhos |
| Qp | Perdas |
| γ | Ganhos/Perdas |
| $\Delta\theta$ | Diferença entre a temperatura interior de referência (25 °C) e a temperatura exterior média da estação de verão |
| η_p | Fator de utilização das perdas (obtido pela expressão da ISO13790) |
| RCCTE | Calculado segundo o modelo de cálculo do RCCTE |
| ESP-r | Obtido por meio de simulação no ESP-r |
| c/ | Com (a inclusão do fator seguinte) |
| s/ | Sem (o fator seguinte) |
| a_{cIdeal} | Aplicação da constante a_c relativa à situação de desvio nulo entre η calculado (com γ obtido pelo ESP-r) e η simulado (ESP-r) |
| $a_{cISOmens}$ | Aplicação da constante a_c determinada pela aproximação mensal da ISO 13790 |
| $a_{cISOsaz}$ | Aplicação da constante a_c determinada pela aproximação sazonal da ISO 13790 |
| a_{cRCCTE} | Aplicação da constante a_c determinada pelo RCCTE |
| Céu | Céu (perdas radiativas pelo Céu) |
| Chão | Chão (trocas de calor pelo chão) |
| climaESP-r | Base climática do ESP-r (aplica-se também na ausência de qualquer sigla climática) |
| climaRCCTE | Base climática do RCCTE (se ausente é aplicada a base climática do ESP-r) |
| chProc | Modelação do chão no ESP-r adotada inicialmente (segundo subcapítulo 6.2) |
| Ex%somb | Percentagem de sombreamento exata (inferida segundo os ficheiros climáticos do ESP-r) |
| gar | Garagem (trocas de calor entre a garagem e a zona útil da habitação) |
| garISO | Valor de perdas pela garagem calculado segundo o procedimento da ISO 13789 |

| | |
|----------------------|---|
| garRCCTE | Valor de perdas pela garagem calculado segundo o procedimento do RCCTE para o inverno |
| g(dir&dif) | Fator solar do vidro calculado segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790 |
| g(dir&dif)↓↑ | Fator solar calculado segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790 para o período abaixo e acima de 300W |
| ISO13370anD | Modelação do chão no ESP-r segundo o anexo D da ISO 13370 |
| NeNE0%somb | Percentagem de sombreamento zero a Norte e Nordeste (70% nas restantes orientações) |
| peCéu | Perdas radiativas pelo céu segundo o procedimento aproximado da ISO 13790 (em que $hr = 5\epsilon$) |
| peSolo | Valor de perdas pelo solo calculado |
| peSoloISO13370mensal | Valor de perdas pelo solo calculado segundo a aproximação mensal do anexo A da ISO 13370 |
| PeSoloΨinv.rccte | Valor de perdas pelo solo calculado segundo o procedimento do RCCTE para a estação de inverno |
| Somb. | Sombreamento |
| Somb.ext | Sujeito a sombreamento exterior |
| somb.ext.smp. | Sombreamento exterior permanente (sempre) |
| Somb.int | Sujeito a sombreamento interior |
| somb.int.smp. | Sombreamento interior permanente (sempre) |
| sótão | Sótão (trocas de calor entre o sótão e a zona útil da habitação) |
| sótãoITE50 | Valor de perdas pelo sótão calculado segundo a aproximação do ITE50 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do trabalho e objetivos

O *Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios*, RCCTE, foi aprovado pelo decreto-lei 80/2006 de 4 de abril e obriga, desde a fase de projeto (para licenciamento municipal), todos os novos edifícios de habitação, pequenas áreas comerciais e grandes remodelações, à satisfação de requisitos mínimos de eficiência energética e conforto térmico.

A ideia de construir um documento legal desta índole foi expressa primeiramente no 2nd ICBEM (*International Conference on Building Energy Management*) realizado na Póvoa do Varzim em 1980 (Ramalho 1995). A intenção passou a ato em 1990 (decreto-lei 40/90) e o 1.º regulamento entra em vigor em 1991, tendo como objetivo principal «a melhoria das condições de conforto térmico dos edifícios sem dispêndio excessivo de energia». Desde então tem sido sujeito a revisão de 5 em 5 anos, sendo que nele são definidos e alterados parâmetros de exigência térmica sem necessidade de elaboração de novo documento (tornando essa alteração mais célere).

Na Europa, o surgimento de legislação térmica em edifícios dá-se logo após a crise petrolífera de 70, reforçada pela crise de 80 que aumentou a exigência dos primeiros documentos. Na década de 90 surge um novo problema impulsionador, com a associação das emissões de CO₂ ao aquecimento global, facto que não goza de unanimidade científica (Stallinga 2012) mas que motivou na altura (e agora) o compromisso de protocolos como o de Quioto (1997) e um consequente investimento massivo em eficiência e energias alternativas.

Dados de 2010 (EC 2012) verificam que a energia gasta em Portugal no setor residencial representa 16,6 % do consumo em energia final, sendo a média europeia 26,6 %. Para além da (forte) influência climática, esta fatia energética será tanto menor quanto maior for a eficiência energética duma habitação para produzir conforto. Esta eficiência é medida objetivamente pelo RCCTE, que determina a quantidade de energia necessária para manter os parâmetros ambientais considerados «confortáveis» (e possíveis, mediante a capacidade económico-constructiva do país).

O RCCTE é, assim, uma ferramenta fundamental na minimização dos gastos energéticos nacionais dado impossibilitar a construção de edifícios que consumam mais energia que o permitido pelo regulamento (N_i e N_v , para o inverno e verão respetivamente). Na realidade, o RCCTE (1990) foi o 1.º regulamento com requisitos para a estação de verão. Todos os demais europeus tratavam apenas a estação de inverno.

Torna-se importante avaliar com rigor o cálculo das necessidades energéticas pelo que os regulamentos têm sido regularmente revistos e melhorados.

Existem, atualmente, divergências importantes (Leal 2008) na energia de arrefecimento (verão) calculada pelo RCCTE quando confrontada com a energia obtida através de programas de simulação dinâmica. É precisamente sobre estas divergências que este trabalho se debruça.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho apresenta 12 capítulos e 17 anexos.

O 1.º capítulo apresenta o problema existente no cálculo das necessidades de arrefecimento (Nvc).

O 2.º capítulo descreve a metodologia de cálculo usada pelo RCCTE em relação a Nvc.

O 3.º capítulo apresenta o programa de simulação dinâmica ESP-r.

O 4.º capítulo descreve a metodologia de cálculo usada pela ISO 13790 (e normas a que faz referência: ISO 13786, ISO 13789 e ISO 13770)

O 5.º capítulo estabelece a correspondência entre a metodologia de cálculo de Nvc pelo RCCTE e pela ISO 13790.

O 6.º capítulo descreve a moradia analisada (em termos de geometria e constituição) e o procedimento adotado.

O 7.º capítulo verifica o problema de desfasamento existente entre os valores calculados e os simulados.

Os capítulos 8, 9 e 10 confrontam os resultados obtidos por meio de simulação dinâmica com os resultantes da metodologia do RCCTE e da ISO 13790 e analisam alterações à metodologia atual do RCCTE quanto aos:

- Ganhos (capítulo 8)
- Perdas (capítulo 9) e
- Fator de utilização (capítulo 10)

O 11.º capítulo determina o peso relativo de cada alteração em Nvc.

O capítulo 12 (Conclusões) refere as alterações/considerações relevantes dos capítulos 8, 9, 10 e 11.

2. RCCTE

2.1 Método de cálculo do RCCTE para a energia de arrefecimento

O RCCTE considera necessário que no período de 1 de junho a 30 de setembro a temperatura em locais habitados não exceda os 25°C e denomina «necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento» (N_{vc} , necessidades verão cálculo) à energia [kWh/(m²·ano)] gasta para esse fim.

2.1.1 Expressão geral (N_{vc})

Para o Efeito o RCCTE contabiliza as perdas de calor por renovação de ar (Q_v), por condução (Q_{ext}) e os ganhos (Q_g) que são internos (Q_i) e solares pela envolvente envidraçada (Q_s) e opaca (Q_{opaco}). A inércia térmica do edifício é também caracterizada e determinará, através da relação ganhos/perdas (γ) o fator de utilização dos ganhos solares e internos, η . A fração complementar deste valor ($1 - \eta$) representa a fração de ganhos não-úteis, que eleva a temperatura interior acima do valor de referência.

O cálculo de N_{vc} segundo o RCCTE consiste assim na seguinte expressão:

$$N_{vc} = \frac{Q_g (1 - \eta)}{A_{pav}} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (\text{eq. 2.1}), \quad A_{pav} [\text{m}^2] \text{ é a área útil de pavimento.}$$

2.1.2 Fator de utilização dos ganhos (η)

O fator de utilização dos ganhos térmicos (η) é calculado do mesmo modo, quer se trate da estação de inverno, ou de verão:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad \text{se } \gamma \neq 1 \quad [-] \quad (\text{eq. 2.2}), \quad \text{em que } \gamma = \frac{Q_g}{Q_i + Q_v} \quad (\text{eq. 2.3}) \text{ e}$$

$$\eta = \frac{a}{a+1} \quad \text{se } \gamma = 1$$

$$a = \begin{cases} 1,8 - \text{Edifícios com inércia térmica fraca} \\ 2,6 - \text{Edifícios com inércia térmica média} \\ 4,2 - \text{Edifícios com inércia térmica forte} \end{cases}$$

A diferenciação da classe de inércia assenta na quantidade de massa superficial útil por área útil de pavimento, I_t [kg/m²], sendo fraca se $I_t < 150$ [kg/m²], média caso $150 \leq I_t \leq 400$ [kg/m²] e

forte se $I_t > 400$ [kg/m²]. Por sua vez $I_t = \frac{\sum M_{si} S_i}{A_{pav}}$ (eq. 2.4) , sendo

S_i [m²] é a área do respetivo elemento i e

M_{si} [kg/m²] a massa superficial útil do elemento i . Depende da massa total do elemento respetivo (m_i [kg]) e, ainda:

- da sua localização no edifício e eventual existência de isolamento na sua constituição:

Quadro 2.1: Variação da massa superficial útil com o isolamento e localização no edifício.

| Localização dos elementos de construção do edifício | M _{si} [kg/m ²] | |
|---|---|--|
| | c/ isolamento | s/ isolamento |
| Elemento da envolvente exterior, em contacto com outra fração autónoma ou espaços não-úteis | M _{si} = m _i e M _{si} ≤ 150 | M _{si} = m _t /2 e M _{si} ≤ 150 |
| Elementos em contacto com o solo | M _{si} = m _i e M _{si} ≤ 150 | M _{si} = 150 |
| Elementos de compartimentação interior da fração autónoma em estudo (paredes e pavimentos interiores) | M _{si} = m _t e M _{si} ≤ 300 | |

Uma camada é considerada «isolamento» se tiver condutibilidade térmica inferior a 0,065 W/m.°C e espessura tal que conduza a uma resistência térmica superior a 0,30 m².°C/W. Nessa situação m_i é a massa do elemento da envolvente em contacto com o ar interior (até ao isolamento).

Os valores de m_i e m_t são obtidos (ponto 2.2 do anexo VII de RCCTE 2006) nas publicações do LNEC: *Caracterização térmica de paredes de alvenaria – ITE 12* e *Caracterização térmica de pavimentos pré-fabricados- ITE 11* (ou similar), em tabelas técnicas, em documentação técnica idónea dos respetivos fabricantes ou, em último caso, calculados a partir das massas volúmicas e geometria dos respetivos elementos constituintes.

– e do seu revestimento superficial:

Quadro 2.2: Variação da massa superficial útil com a resistência térmica superficial.

| Elemento construtivo | Resistência térmica do revestimento superficial, R [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] | Valor efetivo a adotar para a massa superficial útil [Msi] |
|--|---|--|
| Elemento das envolventes exterior (R refere-se à superfície interior) | $R \leq 0,14$ | Msi |
| | $0,14 < R \leq 0,30$ | 0,50 Msi |
| | $R > 0,30$ | 0 |
| Parede ou pavimento interior da fração autónoma | $R \leq 0,14$ | Msi |
| | $R > 0,14$ numa das faces $R > 0,14$ em ambas as faces | 0,75 Msi 0,50 Msi |

Repare-se que o fator $(1-\eta)$, também designado por η_{arref} , representa a fração de ganhos excessivos, responsável pelo aumento da temperatura interior acima do valor de referência.

2.1.3 Ganhos

Segue-se, finalmente, a descrição dos ganhos, $Q_g = Q_i + Q_s + Q_{opaco}$ [kWh] (eq. 2.5), e perdas, $Q_p = Q_v + Q_{ext}$ [kWh] (eq. 2.6):

$Q_i = 2,928 q_i A_p$ [kWh] (eq. 2.7), sendo $q_i = 4$ [W/m^2] (ganhos térmicos internos médios por

área de pavimento útil e $2,928 \left[\frac{kW \cdot h}{W} \right] = 122 \text{ dia} \cdot \frac{24 h}{1 \text{ dia}} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$ (eq. 2.8),

$$Q_s = \sum_j [I_r_j \sum_n A_{snj}] \quad [kWh] \text{ (eq. 2.9)}$$

$$= \sum_j [I_r_j \sum_n (A_{jan} F_h F_o F_f F_g F_w g_{\perp T})_{nj}]$$

A_{snj} [m^2] é a área efetiva do vão n segundo a orientação j ,

I_r_j [kWh/m^2] a energia solar incidente na orientação j ,

A_{jan} [m^2] a área total da janela (vidro mais caixilho),

$g_{\perp T}$ [-] o fator solar do conjunto vidro e dispositivo de proteção solar, traduz a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado e a energia solar incidente na direção normal a esse vão, $g_{\perp T} = 0,30 g_{\perp vidro} + 0,70 g_{\perp c/sombreamento}$ (eq. 2.10),

F_w [-] o fator de correção da seletividade angular (corrige a diminuição do fator solar do vidro com o aumento do ângulo dos raios solares relativamente à normal do mesmo),
Os fatores de sombreamento representam a fração ($0 < F \leq 1$) de área de envidraçado que não é sombreada pelo:

(F_h) horizonte (obstruções longínquas exteriores ao edifício, no verão $F_h = 1$),

(F_o) elementos horizontais adjacentes ou sobrepostos (toldos, palas...),

(F_f) elementos verticais (palas verticais, portadas abertas...)

Chama-se fator de obstrução, F_s , ao produto $F_h F_o F_f$, eq. 2.11) e pelo

(F_g) caixilho.

$$Q_{opaco} = 2,928 \left(\sum_j U_j A_j \right) (\theta_{atm} - \theta_i) + \sum_j U_j A_j \left(\frac{\alpha_j I r_j}{h_e} \right) \text{ [kWh]} \text{ (eq. 2.12)}$$

O 1º termo desta equação é na realidade negativo para qualquer localidade portuguesa no verão (porque a temperatura exterior média no verão, θ_{atm} , é sempre inferior à temperatura interior de referência, θ_i): é por isso uma perda e não um ganho pelo que será apenas considerado em Q_{ext} , mais à frente. Logo:

$$Q_{opaco} = \sum_j U_j A_j \left(\frac{\alpha_j I r_j}{h_e} \right) \text{ [kWh]} \text{ (eq. 2.13) sendo}$$

U_j [W/m²·K] o coeficiente de transmissão térmica do elemento j da envolvente opaca

A_j [m²] a área do elemento j

α_j [-] o coeficiente de absorção solar da superfície exterior do elemento envolvente j

h_e [W/m²·°C] é a condutância térmica superficial externa do elemento j (toma o valor de 25 [W/(m²·°C)]).

2.1.4 Perdas

Relativamente às perdas:

$$Q_{ext} = 2,928 \left(\sum_j U_j A_j \right) (\theta_i - \theta_{atm}) \text{ [kWh]} \text{ (eq. 2.14) e}$$

$$Q_v = 2,928 (0,34 R_{ph} A_{pav} P_d) (\theta_i - \theta_{am}) + P_v \cdot 24 \cdot 0,03 M \quad (\text{eq. 2.15}) \quad [\text{kWh}],$$

R_{ph} [h^{-1}] é o número de renovações horárias do ar interior,

P_d [m] o pé direito,

P_v [W] a soma das potências eléctricas de eventuais ventiladores,

M [mês] a duração da estação de arrefecimento ($M = 4$ para a estação de verão),

$$0,34 \quad [\text{Wh}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})] = \frac{\rho_{ar} [\text{kg}/\text{m}^3] c_{ar} [\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]}{3600 [\text{s}]} \quad (\text{eq. 2.16}) \quad \text{sendo}$$

ρ_{ar} [kg/m^3] a massa específica e c_{ar} [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] o calor específico do ar e

$$24 \cdot 0,03 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \cdot \text{W}} \right] = \frac{24 [\text{h}]}{1 [\text{dia}]} \cdot \frac{30 [\text{dia}]}{1 [\text{mês}]} \cdot \frac{1 [\text{kW}]}{1000 [\text{W}]} \quad (\text{eq. 2.17})$$

2.2 Folhas de cálculo do RCCTE

A aplicação do RCCTE é facilitada pelo preenchimento de folhas de cálculo que se relacionam, num único ficheiro. Segue-se a descrição resumida do ficheiro, com referência às equações usadas na estação de verão (o anexo A contém as folhas de cálculo usadas para a estação de verão, *FC V.1a* a *FC V.1g*, preenchidas de acordo com a moradia estudada e para o clima de Lisboa).

Na folha *FC IV.1a* são calculados todos os coeficientes de transmissão térmica (U [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]) da envolvente exterior, considerando que estes representam o inverso da soma das resistências térmicas dos respetivos elementos constituintes. São também consideradas as situações de transmissão de calor por pontes térmicas lineares ψ [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$], medidas apenas numa dimensão, que traduzem a influência da estrutura do edifício (responsável por uma parte significativa da transferência de calor dada à elevada condutibilidade térmica dos seus constituintes, geralmente betão e ferro).

A maioria das soluções construtivas está já caracterizada em Santos 2006 (*ITE 50*).

As perdas por condução através de espaços não úteis são estimadas em *FC IV.1b* mas apenas contabilizadas no inverno. Considera-se neste caso que o espaço não-útil terá uma temperatura intermédia entre o ambiente interior e o exterior, determinada por τ . A estimativa deste valor é feita segundo a tabela *IV.1* do RCCTE e depende da utilização do espaço (que determinará a

renovação de ar) e da razão entre a área $A_{i,u}$ (da superfície de contacto entre o espaço útil e o não-útil) e a área $A_{u,e}$ (área entre o espaço não-útil e o exterior, sem contabilização do chão).

O coeficiente de transmissão térmica associado a $A_{i,u}$ é finalmente multiplicado por τ (em *FCIV.1b*).

A *FCIV.1c* contabiliza as perdas por condução dos envidraçados exteriores.

A renovação de ar constitui uma perda (dado a temperatura média em Portugal no verão ser sempre inferior a 25°C, conforme indica o quadro III.9 do RCCTE) e é contabilizada em *FCIV.1d*. É o resultado da multiplicação do volume dos espaços úteis pela renovação de ar horária (R_{ph}) e pelo fator 0,34.

A *FCIV.1e* é usada apenas para a situação de inverno e contabiliza os ganhos solares no inverno pelos envidraçados. Considera para o efeito a Radiação Solar média a Sul (tabelada consoante a zona climática de inverno) e multiplica a área de cada envidraçado por 5 fatores que traduzem, respetivamente, o grau de desfasamento em relação a sul (X), o fator solar do vidro (g), o fator de obstrução (F_s), a fração envidraçada (F_g) e o fator de seletividade angular (F_w).

A capacidade de armazenamento e restituição de calor (*Inércia* – eq. 2.4) depende da massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento (I_t) de cada um dos elementos de construção (paredes, pavimentos e coberturas) em contacto com o ar interior. Dependendo do valor de I_t o edifício terá uma inércia fraca, média, ou forte. A classe de inércia irá determinar (em *FCV.1g* – eq. 2.2) o fator de utilização dos ganhos, η .

Na *FCIV.1f* é calculado o valor máximo das necessidades de aquecimento (N_i , função do fator de forma do edifício e dos graus dia de aquecimento, GD) e na *FCIV.2* o valor das necessidades energéticas de aquecimento do edifício (N_{ic}) que é aí comparado com N_i .

A *FCV.1a* (eq. 2.6) remete para a situação de verão (V de verão, IV de inverno). Pede a temperatura interior de referência, a temperatura média exterior e faz o somatório de todas as perdas (referidas em *FCIV.1a* e *FCIV.1c* – eq. 2.14 e em *FCIV.1d* – eq. 2.15), com exceção das estimadas em *FCIV.1b*

(perdas para os espaços não-úteis, desprezadas pelo RCCTE na estação de verão).

As perdas associadas a coberturas e envidraçados exteriores são calculadas em **FCV.Ib** (eq. 2.14).

As folhas de cálculo **FCV.Ic** (eq. 2.13) e **FCV.Id** (eq. 2.9) contabilizam os ganhos solares (no verão) pela envolvente opaca e envidraçada, respetivamente.

A **FCV.Ic** pede o coeficiente de absorção da parede ($0 < \alpha < 1$, variável com a respetiva cor), que é multiplicado pela área da parede, pelo respetivo coeficiente de transmissão térmica e finalmente pela insolação da orientação geográfica (múltipla de 45°) mais próxima.

No caso dos envidraçados (**FCV.Id**) a insolação é multiplicada pela área do envidraçado, pelo fator de obstrução (relativamente a elementos, construtivos ou exteriores ao edifício, que estejam entre o envidraçado e o sol), fração envidraçada (que elimina a área do caixilho da janela), fator solar (fração de energia que entra pelo envidraçado quando a incidência solar é normal à superfície do vidro) e de seletividade (varia com a orientação geográfica do envidraçado e traduz o decréscimo do fator solar do vidro resultante do facto da incidência solar não ser perpendicular ao vidro). A **FCV.Ie** (eq. 2.7) e **FCV.If** (eq. 2.5) definem os ganhos internos (derivados da ocupação e constantes durante o ano: 4 W/m² para os edifícios residenciais, conforme indica o quadro IV.3 do RCCTE) e totais (para o período de verão, que soma as contribuições registadas em **FCV.Ic**, **FCV.Id** e **FCV.If**) respetivamente.

O valor das necessidades energéticas de arrefecimento, N_{vc} , é finalmente calculado em **FCV.Ig** (eq. 2.1) e comparado (na mesma folha de cálculo) com N_v , o valor máximo permitido para a respetiva zona climática.

As necessidades energéticas para a produção de água quente sanitária dependem do número de ocupantes e são calculadas na penúltima folha de cálculo (em **AQS**).

A última folha de cálculo (N_{tc} e N_t) traduz o objetivo primeiro do RCCTE: diminuir o consumo de energia primária. Converte as necessidades energéticas obtidas na quantidade de petróleo equivalente (N_{tc}) e compara este valor com o máximo permitido para o edifício considerado (N_t).

Existem ainda quatro fichas posteriores com fins burocráticos que são parcial e automaticamente preenchidas com a satisfação das anteriores.

3. SIMULAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS E O PROGRAMA ESP-r

3.1 História e funcionamento do programa

O programa *Environmental System Performance research* foi concebido por Joe Clarke entre 1974 e 1977, na Universidade de Strathclyde. A sua validação foi conseguida alguns anos depois pelo grupo ESRU (*Energy Systems Research Unit*) da mesma universidade, tendo sofrido sucessivas alterações de modo a melhorar a sua organização e documentação, o processamento multizona e a interface de utilização.

Este programa foi escolhido em 1986 pela Comunidade Europeia como Modelo europeu de referência para a simulação de edifícios (Camelo 1995, *apud* Clarke *et al.* 1990) e é um programa de licença livre.

O ESP-r é composto por vários módulos/subprogramas, regidos por um principal (*.prj*, *project manager*) que acede aos restantes e permite (através do ficheiro *configuration problem*, *.cfg*) a introdução e exposição de dados.

A criação de cada zona da habitação corresponde à definição dos módulos geométrico (*.geo*), construtivo (*.con*) e operativo (*.opr*) que retêm, respetivamente, os dados geométricos da zona, a caracterização termofísica dos seus elementos construtivos e a utilização da mesma (ganhos internos e renovação de ar).

À semelhança de outros programas de simulação, o ESP-r aplica o princípio da conservação de energia em cada divisão da habitação (e iteração).

A temperatura do ar de cada compartimento é homogénea e depende das transferências de energia com o exterior e interior do compartimento. Como aproximação são também homogéneas as temperaturas de cada superfície, bem como as do interior, de cada elemento construtivo.

A resolução numérica das equações de transferência de calor é conseguida pelo módulo *.bps*, um

simulador que aplica o método de diferenças finitas na determinação dos parâmetros do sistema «habitação» (por sua vez registados no módulo *.res*).

De referir ainda os módulos que permitem a alteração das bases de dados climáticos (*.clm*), de materiais de construção (*.con*) e ópticos (*.tmc*), também usados neste trabalho. A utilização de outros módulos é função da complexidade do problema (o anexo B reproduz a ilustração original do manual de utilização do ESP-r, ESRU Manual U97/1, representativa das relações entre os módulos e bases de dados).

3.2 Algoritmos de cálculo

O calor é o fluxo energético resultante da interação dum corpo a temperatura mais elevada com outro (ou outra parte do mesmo corpo) a temperatura mais baixa.

Nos próximos parágrafos encontram-se descritos os três modos de propagação de calor (condução, convecção e radiação) com referência aos algoritmos usados pelo ESP-r.

3.2.1 Condução

A condução dá-se entre dois pontos dum sólido que estejam a temperaturas diferentes e rege-se segundo a lei de Fourier:

— O fluxo de calor por condução numa dada direção (Q_x) é proporcional à área perpendicular à direção do fluxo ($A_{\perp x}$) e ao gradiente de temperatura existente nessa mesma direção $\frac{\delta T}{\delta x}$, ou seja,

$$Q_x = -\lambda A_{\perp x} \frac{\delta T}{\delta x} \quad (\text{eq. 3.1})$$

λ [W/(m·°C)] é a condutibilidade térmica do material

O sinal negativo determina o sentido de propagação do calor: propagar-se-á segundo o sentido positivo de x (Q_x) se a temperatura decrescer nesse mesmo sentido, ou seja, se $\frac{\delta T}{\delta x} < 0$.

É ainda possível transformar a equação de Fourier de modo a depender apenas da temperatura. Considerando um volume homogéneo e isotrópico (seja $S \delta x$) e a inexistência de trabalho realizado, a diferença entre os fluxos energéticos das faces S opostas é igual à variação de energia interna desse volume infinitesimal (lei da conservação da energia):

$$-\frac{\delta Q_x}{\delta x} S \delta x = c \rho S \delta x \frac{\delta T}{\delta x} \quad (\text{eq.3.2})$$

ρ [kg/m³] é a massa específica do material e

c [J/(kg·°C)] a capacidade calorífica.

Substituindo (Q_x) por (eq. 3.1) fica-se com:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta^2 x} \quad (\text{eq. 3.3})$$

$$\left(\alpha = \frac{\lambda A_{\perp x}}{\rho c} \right)$$

α [m²/s] é a difusibilidade térmica (traduz a rapidez da propagação térmica no meio) e

ρc [J/(m³·°C)] a capacidade de armazenamento de energia).

No ESP-r a condução de calor é tratada unidirecionalmente. A cada elemento construtivo são associadas apenas três temperaturas: uma em cada superfície (externa e interna) e a outra no meio.

A resolução da eq. 3.3 é conseguida pelo método das diferenças finitas (processo de Crank-Nicolson).

3.2.2 Convecção

A convecção dá-se entre um sólido e um fluido a temperaturas diferentes. Se considerarmos, respetivamente, as temperaturas T_{so} e T_{fl} , o calor trocado por convecção é dado por:

$$Q_{cv} = A_{so,fl} h_{cv} (T_{so} - T_{fl}) \quad (\text{eq. 3.4})$$

$A_{so,fl}$ [m²] é a área de contacto entre o sólido e o fluido

h_{cv} [W/(m²·K)] o coeficiente de transmissão de calor por convecção, que depende da velocidade e direção do vento:

$$h_{cv} = 2,8 + 3V \quad (\text{eq. 3.5}),$$

V é a velocidade de escoamento:

$$V = \begin{cases} 0,5 & \text{se } \phi_{vp} < 10^\circ \text{ e } v \leq 2 \text{ m/s} \\ 0,25 & \text{se } \phi_{vp} < 10^\circ \text{ e } v > 2 \text{ m/s} \\ v \sin(|\phi_{vp}|) & \text{se } \phi_{vp} \geq 10^\circ \\ 0,25 v \sin(|\phi_{vp}|) & \text{para superfícies protegidas} \end{cases}$$

ϕ_{vp} [°] é o ângulo entre o vento e o plano e
 v [m/s] a velocidade do vento

Nas superfícies interiores h_{cv} toma a expressão proposta por *Alamdari et Hammond* (1993):

$$h_{cv} = \left[\left[a \left(\frac{\Delta\theta}{d} \right)^p \right]^m + \left[b (\Delta\theta)^q \right]^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (\text{eq. 3.6})$$

$\Delta\theta$ [°C] é a diferença entre as temperaturas (do ar e da superfície)

d_c [m] a dimensão característica:

$$d_c = \begin{cases} \text{altura da superfície (se for vertical)} \\ 4 \frac{A_{sf}}{P_{sf}} \text{ para as superfícies horizontais (diâmetro hidráulico)} \end{cases}$$

P_{sf} [m] o perímetro da superfície de contacto entre o sólido e o líquido

a , b , m , p e q constantes, respetivamente:

$$a; b; m; p; q = \begin{cases} 1,5; 1,23; 1/4; 1/3; 6 \text{ se a superfície é vertical} \\ 1,4; 1,63; 1/4; 1/3; 6 \text{ se a superfície é horizontal} \end{cases}$$

3.2.3 Radiação

Todos os corpos radiam segundo a lei de Stefan-Boltzman. Esta energia transmite-se no espaço e é responsável, nomeadamente, pelo equilíbrio térmico da superfície da Terra. A potência radiativa de um corpo, R_σ [W/m²], é:

$$R_\sigma = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{eq. 3.7})$$

ε [-] é a emissividade da superfície do corpo

σ [5,67 x 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)] a constante de Boltzmann e

T [K] a temperatura absoluta

Uma vez que todos os corpos radiam, um corpo estará a perder energia por radiação se a sua potência radiativa emitida for maior que a recebida.

O balanço radiativo de um corpo, ou seja, a diferença entre a radiação emitida e recebida vale assim:

$$q = A_{\text{sup}} \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_{\text{sup}}^4) \quad [\text{W}] \quad (\text{eq. 3.8})$$

A_{sup} [m²] é a área da superfície do corpo

T_e [K] a temperatura do exterior e

T_{sup} [K] a temperatura da superfície

No ESP-r a temperatura do exterior resulta da combinação entre as temperaturas do céu, do solo e dos obstáculos (tipicamente outros edifícios, por defeito à mesma temperatura).

$$T_e^4 = \Lambda_{\text{céu}} T_{\text{céu}}^4 + \Lambda_{\text{solo}} T_{\text{solo}}^4 + \Lambda_{\text{obs}} T_{\text{obs}}^4 \quad (\text{eq. 3.9})$$

$\Lambda_{\text{céu}}$, Λ_{solo} e Λ_{obs} são, respetivamente, os fatores de forma relativamente ao céu, solo e edifícios (variáveis com a localização: rural, cidade, etc).

Entre superfícies interiores, o balanço radiativo de uma determinada superfície i será a soma dos balanços considerando todas as outras superfícies j e respetivos fatores de forma Λ_{ij} .

Importa frisar que a resolução das equações é possível através da linearização das mesmas (incluída em h_{ij}):

$$q_i = A_i \sum_{j=1}^n h_{ij} (T_j - T_i)$$

$$h_{ij} = \frac{\varepsilon_j \varepsilon_i \Lambda_{ji} \sigma (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j)}{[1 - (1 - \varepsilon_j) (1 - \varepsilon_i) \Lambda_{ji}^2 \frac{A_j}{A_i}]} +$$

$$+ \varepsilon_j \varepsilon_i A_i \sigma (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \sum_{k=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_k) \Lambda_{jk} \Lambda_{ik}}{A_k [1 - (1 - \varepsilon_j) (1 - \varepsilon_i) (1 - \varepsilon_k) \Lambda_{jk} \Lambda_{ki} \Lambda_{ik}]}$$
(eq.3.10)

A radiação solar presente na atmosfera terrestre compõe-se pela radiação direta e difusa. A 1ª tem direção, (determinada pelas equações do anexo C) e a 2ª é isotrópica.

O ESP-r exige, para cada tipo de envidraçado, as propriedades óticas (transmissão total, τ , e absorção de cada camada i do envidraçado, α_i) para os ângulos 0, 40, 55, 70 e 80° e a partir destes valores calcula, por interpolação linear, todos os outros relativos aos restantes ângulos.

A energia solar que entra numa moradia por um envidraçado resulta assim da radiação solar que o trespassa (estimada através de τ) e do aquecimento do mesmo (provocado pela absorção de energia nas suas camadas constituintes). De notar, ainda, que os valores óticos aplicados pelo ESP-r relativamente à radiação difusa são os correspondentes a uma incidência de 57° com a normal do vidro.

4. NORMAS INTERNACIONAIS ISO

4.1 Enquadramento histórico

A ISO (*International Organization for Standardization*) é, mundialmente, a maior instituição produtora de normas. Foi idealizada em 1946, quando delegados de 25 países se encontraram em Londres e decidiram criar uma organização internacional com o objetivo de «facilitar a coordenação internacional e unificação de normas industriais». O seu início oficial deu-se a 23 de fevereiro de 1947 em Genève, Suíça (sede). Desde então, mais de 19000 normas foram feitas, abrangendo atividades como a agricultura e construção, engenharia mecânica, dispositivos médicos e até os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos. (ISO 2012).

Atualmente a ISO é uma rede de institutos nacionais de normalização de 164 países, um membro por país, com um Secretariado Central em Genebra, na Suíça, que coordena o sistema.

O trabalho de preparação das normas internacionais é normalmente realizado através de comissões técnicas onde é elaborado um documento protótipo. Este será sujeito à revisão e aprovação das entidades e organismos internacionais governamentais e não-governamentais relacionados com o assunto, sendo publicado como norma internacional se for aprovado por pelo menos 75% dos organismos membros com direito a voto.

Na realidade, ao abrigo do acordo de Viena, a Comissão Europeia de Normas (*Comité Européen de Normalisation*, CEN) e a ISO criaram um protocolo de cooperação de modo a minimizar a duplicação de tarefas e criar uma correspondência entre as normas das duas instituições. Deste modo, quando uma norma ISO é adotada pela CEN, passa a ser referenciada com o prefixo EN, (*European Standard*). Repare-se ainda que se essa mesma norma for ainda adotada por Portugal (mais precisamente pelo IPQ, Instituto Português da Qualidade, entidade portuguesa responsável pela gestão do Sistema Português da Qualidade) será ainda referenciada com o prefixo NP, de Norma Portuguesa (Spínola 2007).

A norma ISO 13790 foi preparada pelo comité técnico ISO/TC 163, *Thermal performance and*

energy use in the built environment, Subcomité SC 2, *Calculation methods*, em cooperação com o CEN/TC 89, *Thermal performance of buildings and building components* (ISO13790 2007).

Esta norma, EN ISO 13790, constitui, assim, a referência científica mundial no cálculo das necessidades energéticas referentes à climatização de edifícios. Dada a extensão do assunto, remete o cálculo de alguns parâmetros para outras normas: ISO 13370 (cálculo de perdas pelo solo), ISO 13789 (fator de redução para os espaços adjacentes), ISO 13786 (características térmicas dinâmicas do edifício), ISO 6946 (resistências térmicas) e outras (não utilizadas neste trabalho).

4.2 Expressão geral (N_{vc})

O cálculo das necessidades de arrefecimento de uma habitação, N_{vc} , realiza-se na norma ISO 13790:2007 através das operações seguintes:

$$N_{vc} = Q_g - \eta_p Q_p \quad [\text{MJ}] \quad (\text{eq. 4.1})$$

η_p [-] é o fator de utilização das perdas

As unidades usadas são as internacionais (1 kWh = 3,6 MJ) e em vez do subscrito p a norma usa na realidade tr que simboliza *transfer*, sendo Q_{tr} , *heat transfer*, transferência de calor, incluindo assim a possibilidade desse termo ser na realidade um ganho (caso a temperatura exterior média no verão seja superior à interior de referência, facto que nunca se verifica em Portugal, *idem* no RCCTE). N_{vc} é originalmente referido como $Q_{C,nd}$, que significa *energy need for space cooling*.

4.3 Ganhos

$$Q_g = Q_i + Q_s \quad [\text{MJ}] \quad (\text{eq. 4.2})$$

Q_i [MJ] é o valor dos ganhos internos (ocupantes, iluminação e equipamentos).

4.3.1 Ganhos internos

$$Q_i = \left(\sum_k \phi_{i,k} \right) t + \left(\sum_l (1 - b_{ad,l}) \phi_{i,l} \right) t \quad (\text{eq. 4.3})$$

$\phi_{i,k}$ [W] é a potência da fonte interna k ,

$\phi_{i,l}$ [W] a potência da fonte l do espaço adjacente e

$b_{ad,l}$ [-] o fator de redução para os espaços adjacentes não úteis (ISO 13789)

t [s] é o tempo

4.3.2 Fator de redução para espaços adjacentes não-úteis segundo a ISO 13789

$$b = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \quad (\text{eq. 4.4})$$

H_{ue} é o coeficiente de transferência de calor entre o espaço condicionado e o exterior. Resulta da soma do coeficiente de transmissão, $H_{T,ue}$, com o de ventilação,

$$H_{V,ue} = \rho c_{ar} \dot{V}_{ue} \quad (\text{eq. 4.5}): \rho_{ar} \text{ é a massa específica do ar, } c_{ar} \text{ o calor específico do ar e}$$

\dot{V}_{ue} o caudal horário de ar entre o ambiente exterior e o espaço não-útil.

H_{iu} é o coeficiente de transferência entre o espaço útil e o condicionado. Obtém-se somando o coeficiente de transmissão, $H_{T,iu}$ (entre o espaço útil e o não-útil), ao de ventilação, $H_{V,iu}$, que neste caso aplica o caudal de ar existente entre o espaço útil e não-útil,

$$H_{V,iu} = \rho c_{ar} \dot{V}_{iu} \quad (\text{eq. 4.6})$$

4.3.3 Ganhos solares pela envolvente opaca

Q_s são os ganhos solares:

$$Q_s = \left(\sum_k \phi_{s,k} \right) t + \left(\sum_l (1 - b_{ad,l}) \phi_{s,l} \right) t \quad (\text{eq. 4.7})$$

$\phi_{s,k}$ [W] é a potência solar recebida através do elemento k e

$\phi_{s,l}$ [W] a potência solar recebida pelo elemento l (do espaço adjacente)

Por sua vez,

$$\Phi_{s,k} = F_{obs,k} A_{ef,k} I_{s,k} - F_{céu,k} \Phi_{céu,k} \quad (\text{eq. 4.8})$$

$F_{obs,k}$ [-] é o fator de forma relativo a obstáculos externos na superfície k

$A_{ef,k}$ [m²] a área efetiva da superfície k

$I_{s,k}$ [W/m²] a radiação solar média incidente em k

$F_{céu,k}$ [-] o fator de forma entre a superfície k e o céu e

$\Phi_{céu,k}$ [W] a potência de perdas radiativas para o céu.

Importa pois determinar $A_{ef,k}$ e $\Phi_{céu,k}$

Se a superfície é opaca (paredes):

$$A_{ef} = \alpha R_{se} U_{par} A_{sup} \quad (\text{eq. 4.9})$$

α [-] é o coeficiente de absorção da parede

R_{se} [m²·K/W] a resistência superficial externa da parede

U_{par} [W/(m²·K)] o coeficiente de transmissão térmica da parede

A_{sup} [m²] a área da superfície

4.3.4 Ganhos solares pela envolvente envidraçada (método aproximado e pormenorizado)

No caso dos envidraçados temos:

$$A_{ef,k} = F_{obs,vd} g_{vd} (1 - F_{F,k}) A_{jan} \quad (\text{eq. 4.10})$$

$F_{obs,vd}$ [-] é o fator de redução devido às proteções móveis

g_{vd} [-] a fração total de energia que passa pelo vidro:

$$g_{vd} = F_w g_{\perp} \quad (\text{eq. 4.11})$$

F_w [-] é o fator de seletividade do vidro (EN 410)

g_{\perp} [-] o fator solar do vidro (para uma incidência solar normal à superfície)

$F_{F,k}$ [-] a fração de caixilho do envidraçado e

A_{jan} [m²] a área total da janela

Repare-se que $g_{vd} = F_w g_{\perp}$ constitui uma aproximação.

Segundo o método pormenorizado,

$$g_{vd} = a_{dir} g_{dir} + (1 - a_{dir}) g_{dif} \quad (\text{eq. 4.12})$$

a_{dir} [-] é a fração direta da insolação solar

g_{dir} [-] o fator solar do vidro referente ao ângulo de incidência (da radiação direta)

g_{dif} [-] o fator solar do vidro para a radiação difusa

4.3.5 Perdas radiativas para o céu

Resta-nos apenas o cálculo de $\Phi_{céu,k}$ [W]

$$\Phi_{céu,k} = R_{se} U_{sup,k} A_{sup,k} h_r \Delta\theta_{ar,céu} \quad (\text{eq. 4.13})$$

R_{se} [m²·K/W] é a resistência externa da superfície (ISO 6946),

$U_{sup,k}$ [W/(m²·K)] o coeficiente de transmissão térmica do elemento k

$A_{sup,k}$ [m²] a área do elemento k

h_r [W/(m²·K)] é o coeficiente de transferência exterior:

$$h_r = 4 \varepsilon \sigma (\theta_{\text{sup,céu}} + 273)^3 \quad (\text{eq. 4.14})$$

$\theta_{\text{sup,céu}}$ [°C] a temperatura média entre a superfície externa e o céu

$h_r \approx 5 \varepsilon$ (eq. 4.15), o que corresponde a $\theta_{\text{sup,céu}} \approx 10$ °C

$\Delta\theta_{\text{ar,céu}}$ [K] é a diferença de temperatura entre o ar exterior e o céu:

$$\Delta\theta_{\text{ar,céu}} = \begin{cases} 9 \text{ K} - \text{para regiões polares} \\ 11 \text{ K} - \text{para regiões intermédias} \\ 13 \text{ K} - \text{para os trópicos} \end{cases}$$

4.4 Perdas

$$Q_p = Q_{\text{cond}} + Q_v \quad [\text{MJ}] \quad (\text{eq. 4.16})$$

4.4.1 Perdas por condução

$$Q_{\text{cond}} = H_{\text{cond}} (\theta_i - \theta_e) t \quad [\text{MJ}] \quad (\text{eq. 4.17})$$

$$H_{\text{cond}} = H_e + H_g + H_u + H_{ad} \quad [\text{W/K}] \quad (\text{eq. 4.18})$$

H_e [W/K] é o coeficiente de transmissão térmica para o exterior

H_g [W/K] o coeficiente de transmissão térmica para o solo

H_u [W/K] o coeficiente de transmissão térmica para espaços não-úteis e

H_{ad} [W/K] o coeficiente de transmissão térmica para edifícios adjacentes

Os coeficientes especificados são obtidos do seguinte modo ($x = e, g, u, ad$):

$$H_x = b_{\text{cond},x} [\sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j] \quad [\text{W/K}] \quad (\text{eq. 4.19})$$

A_i [m²] é a área do elemento i (da envolvente x)

U_i [W/(m²·K)] o respetivo coeficiente de transmissão térmica

l_k [m] o comprimento da ponte térmica linear k

Ψ_k [W/(m·K)] o coeficiente de transmissão térmica linear do elemento k

χ_j [W/K] o coeficiente de transmissão térmica pontual j

$b_{cond,x}$ [-] o fator de ajuste ($b_{cond,x} \neq 1$ se a temperatura do lado exterior da envolvente x é diferente da temperatura ambiente exterior; equivale a $b_{ad,l}$, eq. 4.4, para os espaços não-úteis). Repare-se que o fator b ajusta o coeficiente de transmissão em vez da diferença de temperatura.

4.4.2 Perdas por ventilação

$$Q_v = H_v (\theta_i - \theta_e) t \quad [\text{MJ}] \quad (\text{eq. 4.20})$$

H_v [W/K] é o coeficiente de transferência de calor por ventilação:

$$H_v = \rho_{ar} c_{ar} (\sum_k b_k \dot{V}_k) \quad (\text{eq. 4.21})$$

$\rho_{ar} c_{ar}$ [1200 J/(m³·K)] é a capacidade calorífica do ar,

\dot{V}_k [m³/s] a renovação de ar no espaço k

b_k [-] o fator de ajuste da temperatura para o fluxo de ar ($b_k \neq 1$ se existir pré-aquecimento/arrefecimento do ar)

4.4.3 Perdas pelo solo modelo de cálculo (ISO 13370)

Segundo o modelo de cálculo da ISO 13370, em situação de controlo nulo, a potência de perdas pelo solo, a temperatura interior e a temperatura exterior, descrevem sinusóides de período anual.

A potência de perdas relativa ao mês m é dada por Φ_m :

$$\Phi_m = H_g (\theta_{an,i} - \theta_{an,e}) - H_{pi} \theta_{amp,i} \cos(2\pi \frac{m-\tau+\alpha}{12}) + H_{pe} \theta_{amp,e} \cos(2\pi \frac{m-\tau-\beta}{12}) \quad [\text{W}] \quad (\text{eq. 4.22})$$

$\theta_{an,i}$ [°C] é a temperatura anual média interior

$\theta_{an,e}$ [°C] a temperatura anual média exterior

$\theta_{amp,i}$ [°C] a amplitude anual da variação da temperatura interior

$\theta_{amp,e}$ [°C] a amplitude anual da variação da temperatura exterior

τ [mês] é o número do mês mais frio do ano

α [mês] o avanço do ciclo de perdas pelo solo relativamente ao ciclo da temperatura interior

β [mês] o atraso do ciclo de perdas pelo solo relativamente ao ciclo da temperatura exterior

H_g , H_{pi} e H_{pe} [W/°C] são, respetivamente, os coeficientes de perdas estacionário, periódico interno e externo.

Os desfasamentos α e β são por sua vez calculados através dos parâmetros δ [m] (profundidade de penetração periódica do solo) e dt [m] (espessura total equivalente):

$$\alpha = 1,5 - \frac{12}{2\pi} \arctg\left(\frac{dt}{dt + \delta}\right) \text{ [mês]} \text{ (eq. 4.23),}$$

$$\beta = 1,5 - 0,42 \ln\left(\frac{\delta}{dt + 1}\right) \text{ [mês]} \text{ (eq. 4.24),}$$

$$dt = w + \lambda_g (R_{si} + R_f + R_{se}) \text{ [m]} \text{ (eq. 4.25) e}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{3,15 \cdot 10^7 \lambda_g}{\pi \rho_g c_g}} \text{ [m]} \text{ (eq. 4.26)}$$

w [m] é o valor da espessura das paredes exteriores e λ_g [W/(m·K)], ρ_g [Kg/m³] e c_g [J/(kg·K)] respetivamente, a condutibilidade, a massa específica e o calor específico do solo descongelado.

R_f , R_{si} e R_{se} são, respetivamente, as resistências térmicas [m²·K/W] da construção do chão, da sua superfície interna e externa.

Relativamente aos coeficientes de perdas importa referir que

$$H_g = A_f U_{fg} + P_f \Psi_g \text{ [W/K]} \text{ (eq. 4.27)}$$

A_f [m²] é a área do chão

P_f [m] o perímetro do chão

Ψ_g [W/(m·K)] a transmitância térmica linear resultante da junção da parede com o solo e

U_{fg} [W/(m²·K)] a transmitância térmica entre o ambiente interior e exterior (pelo chão e solo)

Dependendo do grau de isolamento do chão, ou seja, da comparação de dt com B' , a dimensão característica do chão,

$$B' = \frac{A_f}{\frac{1}{2} P_f} \quad [\text{m}] \quad (\text{eq. 4.28}), \text{ assim será o valor de } U_{ie} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]:$$

$$U_{fg} = \begin{cases} \frac{2 \lambda_g}{\pi B' + dt} \ln\left(\frac{\pi B'}{dt} + 1\right) & \text{se } dt < B' \\ \frac{\lambda_g}{0,457 B' + dt} & \text{se } dt \geq B' \quad (\text{isolamento elevado}) \end{cases} \quad (\text{eq. 4.29})$$

Resta, finalmente, o cálculo dos coeficientes H_{pi} e H_{pe} :

$$H_{pi} = A_f \frac{\lambda_g}{dt} \sqrt{\frac{2}{(1 + \delta/dt)^2 + 1}} \quad [\text{W/K}] \quad (\text{eq. 4.30})$$

$$H_{pe} = 0,37 P_f \lambda_g \ln\left(\frac{\delta}{dt} + 1\right) \quad [\text{W/K}] \quad (\text{eq. 4.31})$$

4.4.4 Perdas pelo solo aproximação mensal, sazonal e anual

Quando os valores mensais da temperatura interior e exterior são conhecidos a potência de perdas pelo solo é (aproximação mensal):

$$\Phi_m = H_g (\theta_{an.i} - \theta_{an.e}) - H_{pi} (\theta_{an.i} - \theta_{i,m}) + H_{pe} (\theta_{an.e} - \theta_{e,m}) \quad [\text{W}] \quad (\text{eq. 4.32})$$

$\theta_{e,m}$ [°C] é a temperatura média exterior do mês m

$\theta_{i,m}$ [°C] a temperatura média interior do mês m

A aproximação sazonal despreza o efeito da diferença de fase entre a variação da potência de perdas e a variação das temperaturas (interior e exterior), sendo calculada a média dos termos coseno:

$$\Phi_{saz} = H_g (\theta_{an.i} - \theta_{an.e}) - \gamma H_{pi} \theta_{amp.i} + \gamma H_{pe} \theta_{amp.e} \quad [\text{W}] \quad (\text{eq. 4.33})$$

$$\gamma = \frac{12}{n \pi} \sin\left(\frac{n \pi}{12}\right) \quad [-] \quad (\text{eq. 4.34}),$$

n é o número de meses da estação.

A aproximação anual é a componente estacionária, o primeiro termo das aproximações referidas:

$$\Phi_{an} = H_g (\theta_{an.i} - \theta_{an.e}) \quad [\text{W}] \quad (\text{eq. 4.35})$$

4.5 Fator de utilização das perdas

η_p , o fator de utilização das *perdas*, depende da razão (γ_p) entre os ganhos (Q_g) e as perdas (Q_p) e do parâmetro a_c . Começemos por definir γ_p

$$\gamma_p = \frac{Q_g}{Q_p} \quad (\text{eq. 4.36})$$

$$\begin{aligned} \text{Se } \gamma_p > 0 \text{ e } \gamma_p \neq 1: \quad \eta_p &= \frac{1 - \gamma^{-a_c}}{1 - \gamma^{-(a_c+1)}} \\ \gamma_p = 1: \quad \eta_p &= \frac{a_c}{a_c+1} \quad (\text{eq. 4.37}) \\ \gamma_p < 0: \quad \eta_p &= 1 \end{aligned}$$

O cálculo do parâmetro a_c exige o conhecimento da constante de tempo da habitação, τ , e de duas constantes pré-determinadas, $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ (os subscritos *C* e *0* significam *cooling* e *reference*, respetivamente):

$$a_c = a_{c,0} + \frac{\tau}{\tau_{c,0}} \quad [-] \quad (\text{eq. 4.38}).$$

Segue-se o cálculo de τ ,

$$\tau = \frac{Cm/3600}{H_{\text{cond}} + H_{\text{ve}}} \quad [\text{h}] \quad (\text{eq. 4.39}), \text{ em que}$$

$Cm = \sum \kappa_k A_k$ [J/K] (eq. 4.40) é a capacidade calorífica do edifício,

κ_k [J/(m²·K)] a capacidade calorífica por unidade de área, do elemento k do edifício (ISO 13786) e

A_k [m²] a área do elemento k

4.5.1 Capacidade calorífica de elementos construtivos (ISO 13786)

A norma ISO 13786 define uma matriz 2x2 complexa Z_{mn} para cada uma das camadas de um elemento k :

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = \cosh(\xi)\cos(\xi) + j \sinh(\xi)\sin(\xi) \\ Z_{12} &= -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi)\cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi) + j [\cosh(\xi)\sin(\xi) - \sinh(\xi)\cos(\xi)] \} \\ Z_{21} &= -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi)\cos(\xi) - \cosh(\xi)\sin(\xi) + j [\sinh(\xi)\cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi)] \} \end{aligned} \quad , \text{eq.4.41}$$

ξ é a razão entre a espessura da camada, d [m], e a profundidade (δ [m]) à qual as variações de temperatura são e (número de Euler) vezes menores:

$$\xi = \frac{d}{\delta} \quad (\text{eq. 4.42}) \text{ e}$$

$$\delta = \left(\frac{\lambda T}{\pi \rho c} \right)^{1/2} \quad (\text{eq. 4.43}), \text{ sendo}$$

λ [W/(m·K)] a condutibilidade do material,

T [s] o período das variações térmicas,

ρ [kg/m³] a massa específica e

c [J/(kg·K)] o calor específico.

São ainda definidas as matrizes relativas às camadas de ar e às resistências superficiais:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= 1 \quad , \quad Z_{12} = -R \\ Z_{21} &= 0 \quad \text{e} \quad Z_{22} = 1 \end{aligned} \quad (\text{eq. 4.44}), \text{ sendo } R \text{ a resistência da camada (de ar, ou da superfície)}$$

As matrizes são finalmente multiplicadas pela ordem em que se encontram as camadas, do exterior (matriz N) para o interior da habitação (matriz 1):

$$Z = Z_N Z_{N-1} \dots Z_2 Z_1 \quad (\text{eq. 4.45})$$

A matriz Z obtida é a matriz de transferência do elemento construtivo k . É a partir dela que se definem todos os parâmetros dinâmicos térmicos, nomeadamente κ_k :

$$\kappa_k = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad [\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (\text{eq. 4.46})$$

5. COMPARAÇÃO ALGÉBRICA DO RCCTE COM A ISO 13790

5.1 Equivalência entre as expressões gerais de N_{vc}

A expressão geral de cálculo de N_{vc} pelo RCCTE (eq. 2.1) é equivalente ao modelo geral de cálculo aplicado pela ISO 13790 (eq. 4.1). Diferem as unidades usadas, uma vez que o RCCTE apresenta o resultado final em [kWh/m²] e a ISO 13790 em [MJ].

Considerando o resultado bruto de N_{vc} pelo RCCTE (sem divisão por A_{pav}) e o facto de 1 kWh = 3,6 MJ fica-se com:

$$\begin{aligned} Q_g (1-\eta) &= Q_g - \eta_p Q_p \\ \eta Q_g &= \eta_p Q_p \quad , \text{ mas } \gamma = \frac{Q_g}{Q_p} \text{ pelo que} \\ \eta \gamma &= \eta_p \quad (\text{eq. 5.1}) \end{aligned}$$

Se $\gamma = 1$, $\eta = \eta_p = \frac{a}{a+1}$ (eq. 2.2 e eq. 4.37). Substituindo na eq. 5.1 tem-se:

$$\frac{a}{a+1} = \frac{a}{a+1} \quad (\text{c. q. d.})$$

Se $\gamma \neq 1$ $\eta = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}}$ e $\eta_p = \frac{1-\gamma^{-a}}{1-\gamma^{-(a+1)}}$ (eq. 2.2 e eq. 4.37) e a (eq. 5.1) fica:

$$\frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}} \gamma = \frac{1-\gamma^{-a}}{1-\gamma^{-(a+1)}}$$

$$(\gamma - \gamma^{a+1}) (1 - \gamma^{-(a+1)}) = (1 - \gamma^{a+1}) (1 - \gamma^{-a})$$

$$\gamma - \gamma^{-a} - \gamma^{a+1} + 1 = 1 - \gamma^{-a} - \gamma^{a+1} + \gamma$$

$$1 = 1 \quad (\text{c. q. d.})$$

A expressão baseada no fator de utilização das perdas (eq. 4.1) permite $\gamma < 0$, correspondente à situação em que a temperatura exterior média é superior à temperatura interior de referência. Nesse caso (não verificado em Portugal, *idem* no RCCTE) as «perdas» negativas por condução e renovação de ar seriam na realidade ganhos. Segundo a formulação da eq. 4.1 (ponto I.2.1.3 da ISO 13790) apenas parte das perdas contribuem para reduzir as necessidades de arrefecimento: a outra parte ocorre em momentos onde a temperatura interior é inferior à de referência (o fator de utilização das perdas corrige assim o facto das perdas serem calculadas com base na temperatura interior de referência).

A expressão adotada pelo RCCTE (eq. 2.1) é também considerada pela ISO 13790 (no seu ponto I.2.1.3): o fator de utilização dos ganhos representa a fração de ganhos que é compensada pelas perdas, sendo a fração complementar, $(1 - \eta)$, responsável pelo aumento da temperatura interior acima da temperatura de referência (e logo equivalente às necessidades nominais de arrefecimento, caso seja multiplicada pelos ganhos).

Finalmente, a nota do ponto D.1 da ISO 13790 considera vantajosa a formulação baseada no fator de utilização das perdas, na medida em que mostra claramente a função das perdas na redução das necessidades de arrefecimento.

5.2 Diferença entre os dois métodos

A diferença entre N_{vc} calculado pelo RCCTE (cap. 2.1) e N_{vc} pela ISO 13790 (cap. 4.2) reside assim no cálculo de Q_p , Q_g e a (que a ISO 13790 denomina por a_c), ligeiramente diferente entre os dois métodos:

- O RCCTE não inclui as perdas pelo solo e pelos espaços adjacentes no cálculo de Q_p (ao contrário da norma internacional: subcapítulo 4.4.3 e 4.3.2 respetivamente).

- A ISO 13790 subtrai as perdas radiativas para o céu (4.3.5) a Q_g (4.3.3). O RCCTE ignora este fator.
- Na ISO 13790 é estimada a diminuição de insolação nas superfícies opacas e envidraçadas resultante de obstáculos exteriores (4.3.3). No RCCTE, o cálculo deste valor (2.1.3) é ligeiramente diferente e apenas aplicado nas superfícies envidraçadas.
- O cálculo da energia solar pelos envidraçados (que faz parte de Q_g) é feito no RCCTE através do método aproximado, recorrendo aos fatores de seletividade sugeridos pelo mesmo documento. A norma ISO 13790 propõe ainda o método pormenorizado, que discrimina a insolação direta e a difusa (4.3.4).
- A constante a depende, no RCCTE, da massa útil dos elementos do edifício e assume um de apenas três valores possíveis (2.1.2). Na norma internacional ISO 13790 este valor depende da constante de tempo da habitação (4.5), calculada com recurso à norma ISO 13786 (4.5.1).

6. MODELAÇÃO DA MORADIA ANALISADA

6.1 Caso de estudo

A moradia analisada é térrea, com uma área útil de 163,2 m², 19,63 m² de envidraçados, garagem de 34,8 m², pé direito de 2,75 m e sótão sobre toda a área construída. Ao todo engloba 9 divisões,

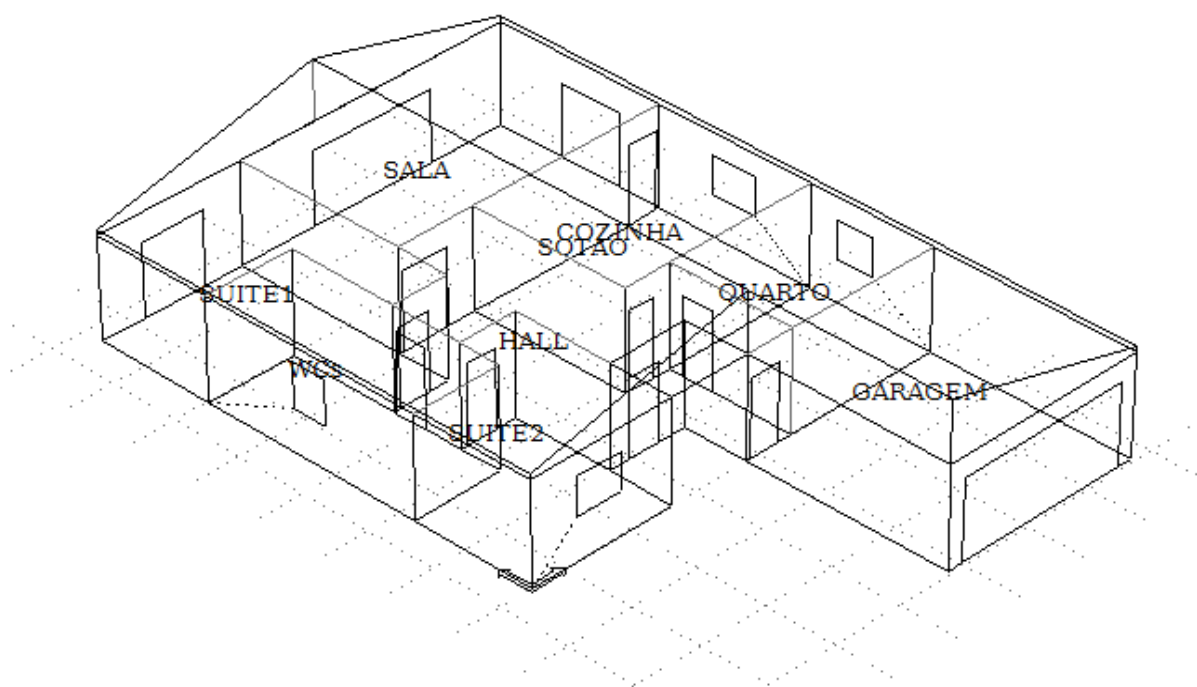


Fig. 6.1: Modelo da moradia no ESP-r sem rotação.

com a seguinte constituição :

- Paredes exteriores: parede dupla com caixa de ar e isolamento pelo exterior (do exterior para o interior: reboco 15mm+ EPS40mm+ tijolo 220mm + 30mm ar + tijolo 70mm+ reboco 15mm).
- Paredes interiores: parede dupla (tijolo 110mm) com caixa de ar (30mm) e reboco (15mm em cada face).

- Laje de cobertura: laje de betão de 200mm de espessura com isolamento pelo sótão (XPS 40mm), rebocada pelo interior (15mm). A cobertura inclinada do sótão compõe-se apenas de telhas (10mm).
- Pavimento: a seguir à terra (250mm) encontra-se cascalho (150mm), argamassa (150mm) e finalmente azulejos (10mm).
- Portas: carvalho, com 25mm de espessura.
- Janelas: vidro duplo (6mm cada vidro com 12mm de caixa de ar). Foram analisadas três soluções óticas: ambos os vidros incolores (opção doravante designada «sem sombreamento»), com o vidro interior escurecido («sombreado interiormente») ou com o vidro exterior escuro («sombreado externamente»). O anexo D completa esta informação.

Os anexos H e I contêm, respetivamente, a descrição exata da planta e constituintes da moradia.

6.2 Procedimento

A moradia atrás apresentada foi analisada nos climas de Bragança, Porto, Coimbra, Lisboa, Évora e Faro (caracterizados no anexo E) e, em cada clima, rodada em intervalos de 45° de maneira a perfazer todas as orientações cardeais (principais e secundárias).

Os valores calculados (segundo o RCCTE) dos ganhos (FCV.1f), perdas (FCV.1a), fator de utilização das perdas e necessidades de arrefecimento (FCV.1g) são comparados com os inferidos pelas simulações no ESP-r.

Foram ainda determinadas as perdas radiativas pelo Céu (eq. 4.13), a energia solar pormenorizada pelos envidraçados (eq. 4.10, aplicando a eq. 4.12), as perdas pelo solo (eq. 4.22, eq. 4.32, eq. 4.33 e eq. 4.35), a constante adimensional a_c (eq. 4.38) e corrigidas, respetivamente, as folhas de cálculo FCV1f, FCV1d, FCV1a e FCV1g.

As propriedades óticas do envidraçado pedidas pelo ESP-r (absortividade de cada camada e transmissividade do envidraçado para os ângulos de 0, 40, 55, 70 e 80°) e pela FCV.1d do RCCTE

(fator solar normal) foram determinadas através do programa WINDOW 5. Este programa contém uma vasta base de dados de vidros simples e, a partir da escolha de vidros efetuada, determina as propriedades óticas do conjunto envidraçado (ver anexo D).

A temperatura do solo é, em primeira análise, considerada invariável com o clima (e igual à temperatura registada a 5 m de profundidade no Solar XXI, Gonçalves 2010).

Quadro 6.1: Temperaturas mensais médias do solo do Solar XXI.

| Tsolo | Jan. | Fev. | Março | Abril | Maió | Junho | Julho | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| [°C] | 15 | 14 | 14 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 18 | 17 | 15 |

A influência de elementos isolados (chão, sótão, céu) nos parâmetros em estudo (Nvc, Ganhos, Perdas ou fator de utilização das perdas) é ainda estimada através do ESP-r.

Para o efeito são comparadas as simulações normais (em que são permitidas trocas de calor pelo elemento considerado) com as simulações análogas mas com o elemento em causa adiabático (sem trocas de calor).

6.3 Obtenção dos ganhos, perdas, fator de utilização e Nvc pelo ESP-r

A obtenção das perdas através do ESP-r realizou-se simulando a habitação sem quaisquer ganhos internos ou solares (radiação solar direta = difusa = 0 W), sem perdas radiativas pelo Céu (o balanço radiativo com o exterior é nulo apenas nestas simulações: opção *totally enclosed* do ESP-r), com a renovação de ar de 0,8 rph e mantendo, em todas as divisões úteis, a temperatura interior de referência ($T= 25$ °C). As perdas são assim a diferença entre a energia gasta no aquecimento e a gasta no arrefecimento da habitação:

$$Q_p = En.Aquec_{s/Ganhos} - En.Arref_{s/Ganhos} \quad (\text{eq. 6.1})$$

Os ganhos totais compõem-se pelos ganhos internos e solares. Foram obtidos pela diferença entre a energia de aquecimento e de arrefecimento na simulação com ganhos internos e solares (mantendo a renovação de ar especificada), subtraída à energia trocada por condução e ventilação (perdas):

$$Q_g = Q_p - (En.Aquec._{normal} - En.Arref._{normal}) \quad (\text{eq. 6.2})$$

Foram aplicados ganhos internos (convectivos) de 4 W/m² na área útil da habitação, conforme especifica o quadro IV.3 do RCCTE para edifícios residenciais e mantida a temperatura de referência.

Nas simulações relativas às necessidades de arrefecimento não é permitido que a temperatura interior exceda a de referência ($T \leq 25$ °C). A potência de aquecimento é neste caso nula e o valor desejado corresponde à energia gasta para arrefecer a habitação:

$$Nvc = En.Arref._{normal} \quad (\text{eq. 6.3})$$

(a habitação é simulada nas condições reais, com ganhos solares, internos, trocas radiativas com o exterior e renovação de ar).

Finalmente o fator de utilização das perdas resulta da transformação algébrica da eq. 4.1:

$$\eta_p = \frac{Q_g - Nvc}{Q_p} \quad (\text{eq. 6.4})$$

Este método já foi aplicado por vários autores, nomeadamente Corrado (2006) e Panão (2011).

7. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

7.1 Necessidades energéticas de arrefecimento

Tal como está concebido, exceptuando (para já) o fator sombreamento e de acordo com o procedimento indicado (que será à frente alterado) o RCCTE produz os seguintes resultados para a estação de verão (1 de Junho a 30 de Setembro):

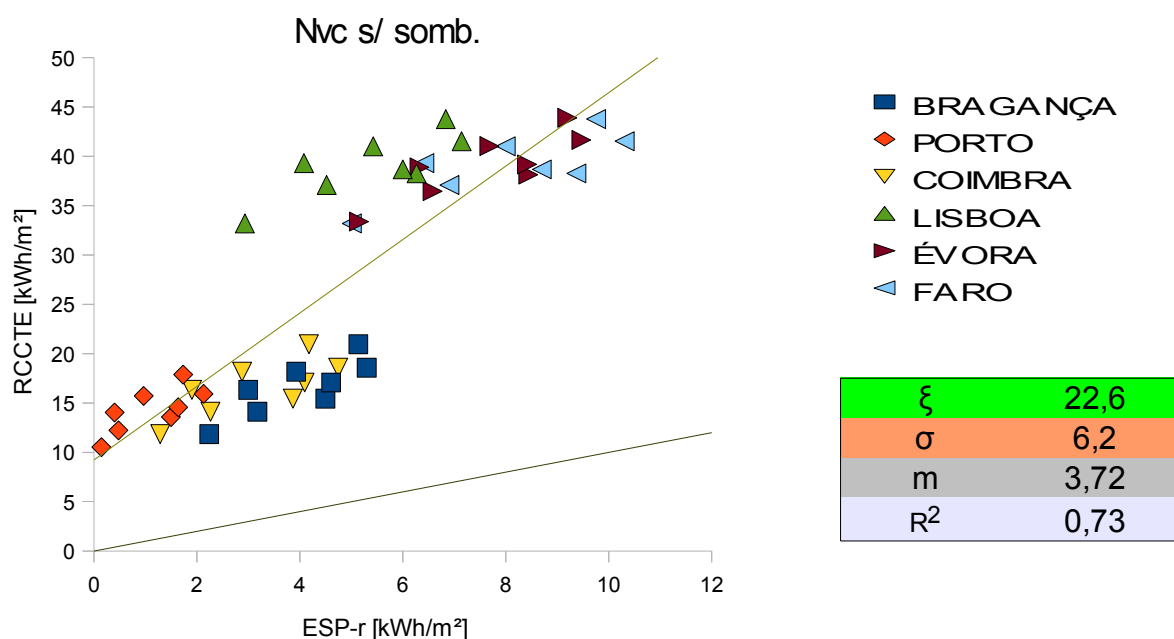


Fig. 7.1: Nvc segundo o RCCTE vs Nvc simulado pelo ESP-r (sem sombreamento).

A linha mais escura representa o objetivo, $y = x$ (nas abcissas está o resultado obtido pelo programa de simulação ESP-r e nas ordenadas o cálculo sazonal para o verão, Nvc, segundo a metodologia do RCCTE). A outra linha é a regressão linear dos pontos obtidos (cujo declive é dado por m). Os valores de ξ e de σ representam, respetivamente, o desfaseamento relativamente ao objetivo

($\xi = \frac{\sum (y_n - x_n)}{N}$, eq. 7.1) e o desvio padrão ($\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_n - y'_{x_n})^2}{N}}$, eq. 7.2, sendo y'_{x_n} a

coordenada y do ponto da regressão linear que interceta a projeção vertical de y_n). R^2 é o coeficiente de determinação (quadrado do coeficiente de correlação).

7.2 Aproximação climática

É notória a formação de dois grupos de resultados pelo RCCTE (de 10-20 kWh/m² e na faixa dos 35-45 kWh/m²). Tal facto deve-se ao escalonamento climático das regiões, feita pelo RCCTE: para além de a insolação variar (ligeiramente) consoante a zona (norte/sul com severidade 1, 2 ou 3) o fator principal, responsável pelo «biagrupamento», será a diferença de temperatura exterior média no verão (19 °C para as regiões norte e 23 °C para as regiões sul):

Quadro 7.1: Dados climáticos do RCCTE para o período de verão.

| climaRCCTE | V ₂ N | V ₁ N | V ₂ S | V ₃ S |
|---------------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| Insolação [kWh/m ²] | BRAGANÇA & COIMBRA | PORTO | LISBOA & FARO | ÉVORA |
| N | 200 | 200 | 200 | 210 |
| NW | 320 | 300 | 340 | 330 |
| W | 450 | 420 | 470 | 460 |
| SW | 470 | 430 | 460 | 470 |
| S | 420 | 380 | 380 | 400 |
| SE | 470 | 430 | 460 | 460 |
| E | 450 | 420 | 470 | 460 |
| NE | 320 | 300 | 340 | 330 |
| HOR. | 790 | 730 | 820 | 820 |
| Temp.Ext.[°C] | 19 | 19 | 23 | 23 |

O erro devido ao escalonamento climático, compreensível na ótica pragmática do regulamento (caso contrário seriam necessárias muitas folhas de dados climáticos com todas as localidades nacionais) não permite no entanto uma análise correta do modelo de cálculo pelo que os dados climáticos sazonais reais foram extraídos do ESP-r:

Quadro 7.2: Dados climáticos reais para o período de verão.

| Insolação ESP-r [kWh/m ²] | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO |
|---------------------------------------|----------|-------|---------|--------|-------|------|
| N | 199 | 189 | 196 | 208 | 204 | 196 |
| NW | 340 | 326 | 331 | 361 | 351 | 366 |
| W | 483 | 464 | 463 | 494 | 485 | 517 |
| SW | 497 | 475 | 470 | 482 | 480 | 505 |
| S | 426 | 391 | 387 | 389 | 392 | 396 |
| SE | 428 | 373 | 371 | 416 | 406 | 418 |
| E | 382 | 329 | 327 | 392 | 376 | 390 |
| NE | 265 | 236 | 239 | 282 | 270 | 273 |
| HOR. | 790 | 738 | 741 | 781 | 796 | 849 |
| Temp.Ext. [°C] | 19,5 | 18,6 | 20,4 | 21,6 | 21,9 | 22,6 |

E aplicados no modelo de cálculo original (RCCTE):

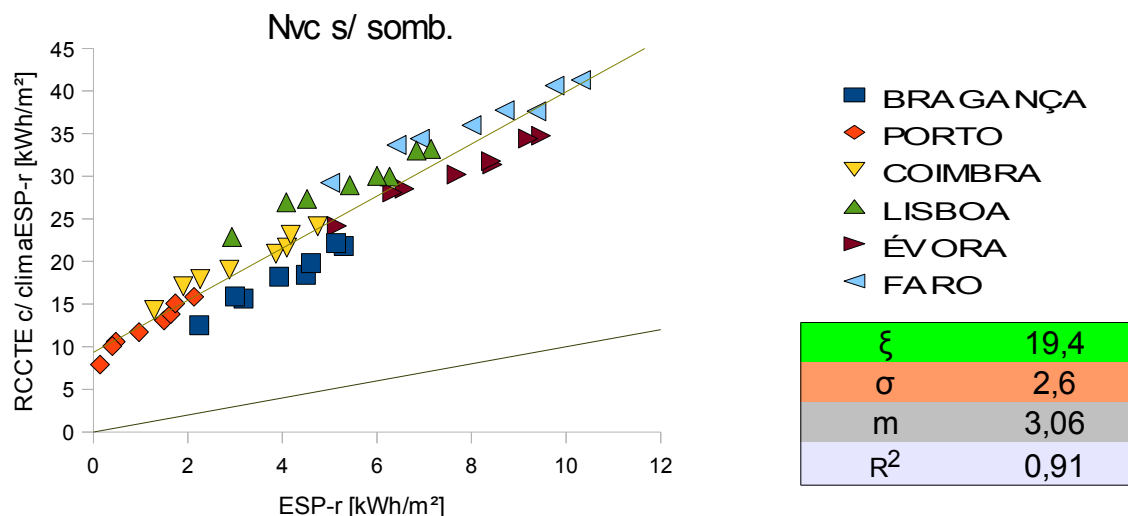


Fig. 7.2: Nvc pelo RCCTE (com dados climáticos reais) vs Nvc segundo o ESP-r.

Como seria de esperar, a aplicação dos dados climáticos reais acabou com o «biagrupamento». O desfasamento e desvio padrão (ξ , σ) diminuem ($22,6 \rightarrow 19,4$ e $6,2 \rightarrow 2,6$ respetivamente) e o declive e coeficiente de determinação aproximam-se da unidade (m : $3,72 \rightarrow 3,06$ e R^2 : $0,73 \rightarrow 0,91$).

Repare-se ainda que a média da diferença entre as necessidades energéticas de arrefecimento calculadas a partir das duas bases climáticas (real, nas abcissas, e tabelada, nas ordenadas) é mínima (cerca de 3 kWh/m^2):

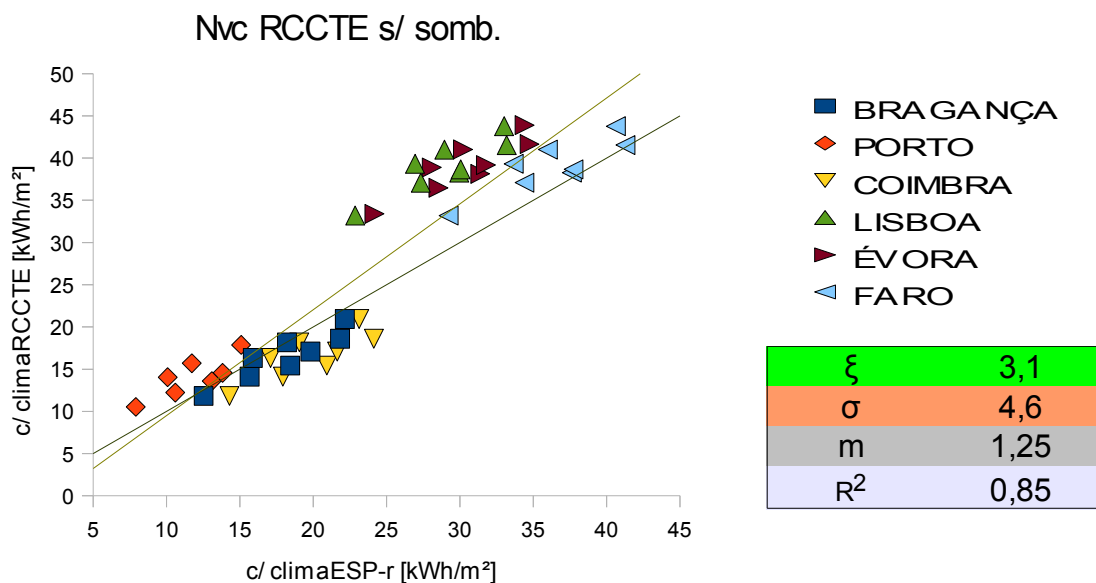


Fig. 7.3: Erro em Nvc produzido pela aproximação climática (sem sombreamento).

Repare-se ainda na mesma análise com inclusão do sombreamento interior:

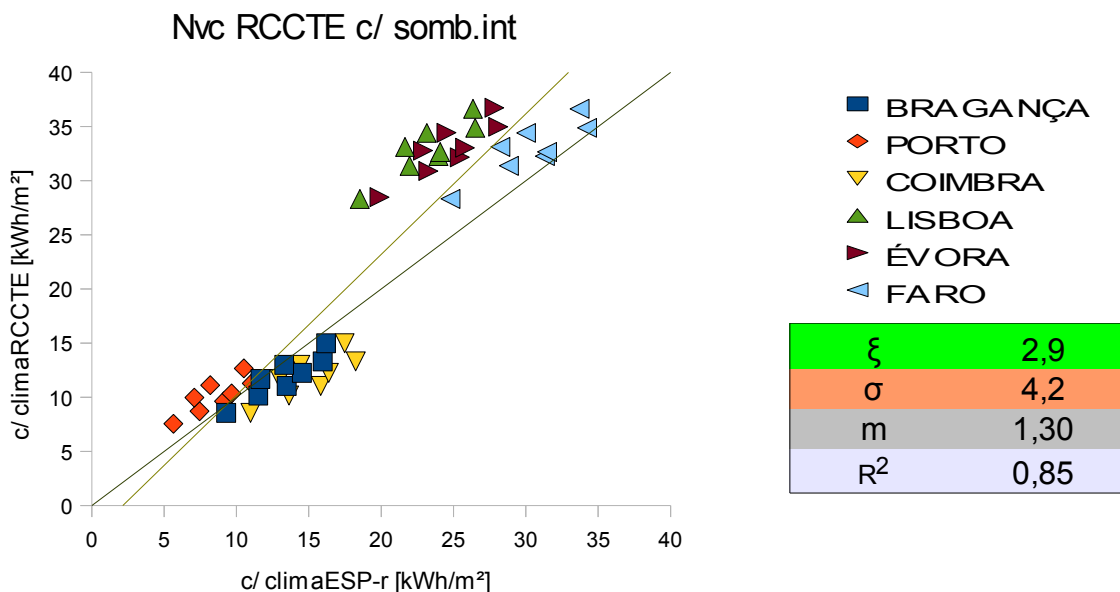


Fig. 7.4: Erro em Nvc produzido pela aproximação climática (com sombreamento interior).

E exterior:

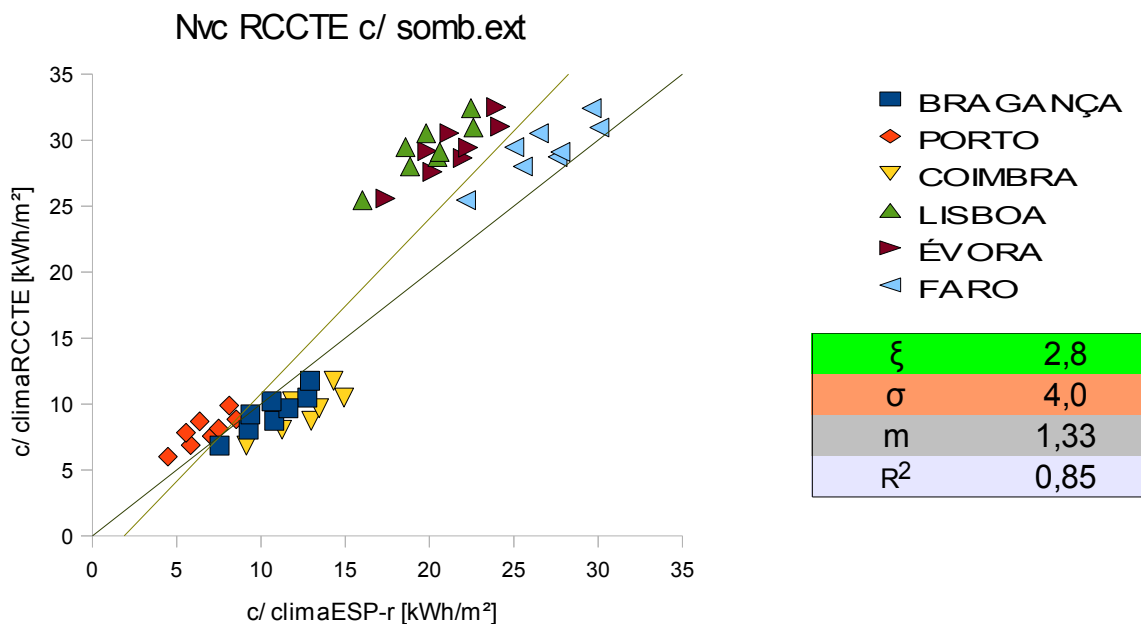


Fig. 7.5: Erro em Nvc produzido pela aproximação climática (com sombreamento exterior).

Serão aplicados daqui em diante os dados climáticos reais, sendo omitido esse fator no eixo das ordenadas por questões de espaço.

7.3 Discriminação dos ganhos, perdas e fator de utilização

Como referido na introdução teórica (eq. 4.1), o cálculo sazonal das necessidades energéticas de arrefecimento é o balanço energético entre ganhos (solares e internos) e perdas (por condução e renovação de ar), calculadas usando a temperatura interior de referência (25 °C na estação de verão). No entanto, dado que a temperatura no interior da habitação é na realidade diferente (inferior no verão, ver anexo F), as perdas são multiplicadas (e logo diminuídas) por η_p , o fator de utilização das perdas (repare-se que a expressão geral de N_{vc} da ISO13790 é algebricamente equivalente à do RCCTE, cap.5.1).

Qualquer alteração ao modelo de cálculo será feito numa destas três componentes pelo que se torna necessário analisar cada uma delas em separado.

Foi aplicado o método descrito no procedimento para a discriminação dos ganhos (eq. 6.2), perdas (eq. 6.1) e fator de utilização das perdas (eq. 6.4).

Comparando os resultados simulados com os determinados pelo modelo de cálculo do RCCTE na folha de cálculo FCV.1f (eq. 2.5), FCV.1a (eq. 2.6) e FCV.1g (onde foi ainda introduzida a eq. 4.37 da ISO13790) respetivamente, obtemos os seguintes resultados:

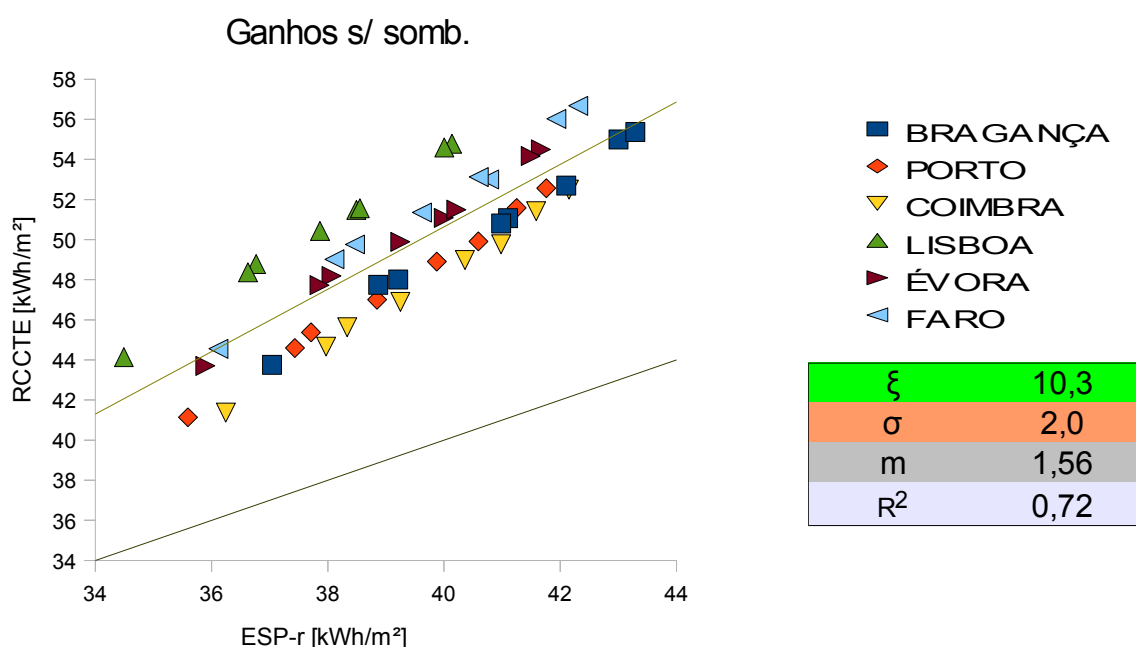


Fig. 7.6: Ganhos solares e internos (RCCTE original vs ESP-r).

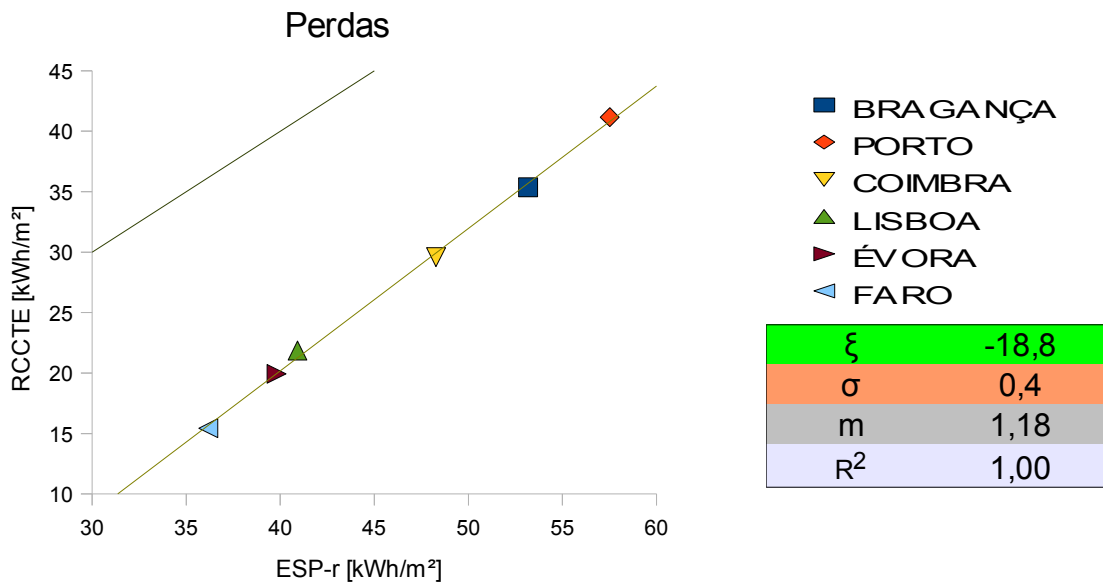


Fig. 7.7: Perdas por condução e renovação de ar (RCCTE original vs ESP-r).

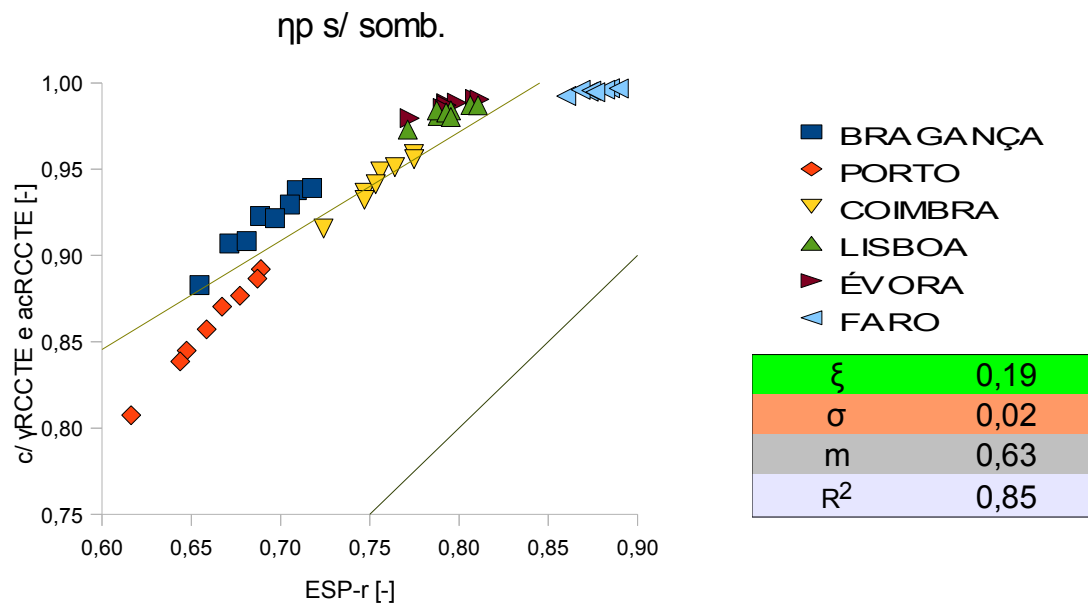


Fig. 7.8: Fator de utilização (RCCTE original vs ESP-r).

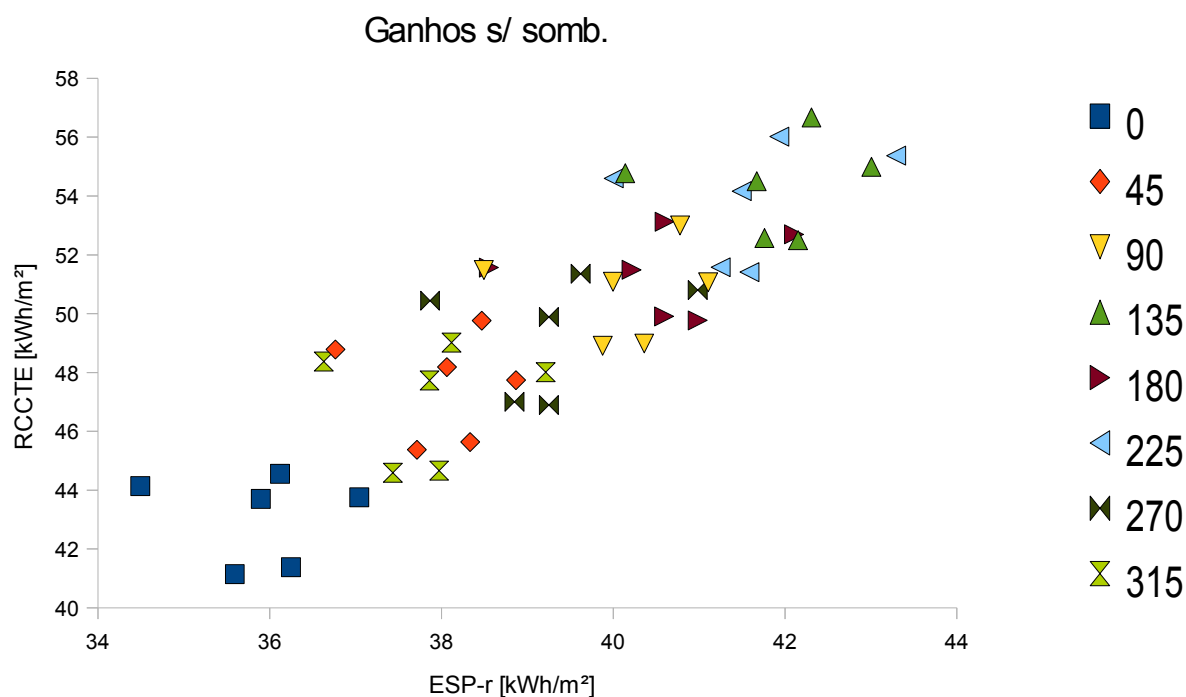
8. ANÁLISE DOS GANHOS

8.1 Variedade climática e rotação da moradia

A análise dos ganhos é feita primeiramente sem a variável sombreamento (que passa a constituir o propósito do próximo capítulo).

Os 48 pontos obtidos a nível de ganhos (e logo também de Nvc) resultam da combinação da variedade climática com a rotação da moradia (a moradia foi rodada em intervalos de 45°, no sentido direto, para cada um dos 6 climas).

Rodar a moradia sujeita-a a ganhos solares distintos, facto que só não aconteceria se as suas 4 fachadas fossem exatamente iguais e as rotações múltiplas de 90°. Por ordem crescente de ganhos estão as rotações 0, 315, 45, 270, 90, 180, 225 e 135°:



| rotação [°] | 0 | 315 | 45 | 270 | 90 | 180 | 225 | 135 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BRAGANÇA | 37,0 | 39,2 | 38,9 | 41,0 | 41,1 | 42,1 | 43,3 | 43,0 |
| PORTO | 35,6 | 37,4 | 37,7 | 38,8 | 39,9 | 40,6 | 41,3 | 41,8 |
| COIMBRA | 36,2 | 38,0 | 38,3 | 39,2 | 40,4 | 41,0 | 41,6 | 42,2 |
| LISBOA | 34,5 | 36,6 | 36,8 | 37,9 | 38,5 | 38,6 | 40,0 | 40,1 |
| ÉVORA | 35,9 | 37,9 | 38,1 | 39,3 | 40,0 | 40,2 | 41,5 | 41,7 |
| FARO | 36,1 | 38,1 | 38,5 | 39,6 | 40,8 | 40,6 | 41,9 | 42,3 |
| Méd. Ganh.ESP-r [kWh/m²] | 35,9 | 37,9 | 38,0 | 39,3 | 40,1 | 40,5 | 41,6 | 41,8 |

Fig. 8.1: Ganhos da moradia em função da orientação geográfica. Referência aos valores simulados e à média de cada rotação.

Voltando à fig. 7.6, da sua análise estatística deduz-se que os dados obtidos pela folha de cálculo FCV.1f do RCCTE sobrestimam os ganhos reais em cerca de 10 kWh/m². Na realidade, relativamente a este ponto, o RCCTE omite um fator considerado pela norma ISO 13790: as perdas radiativas para o céu.

8.2 Avaliação das perdas radiativas para o céu (ISO 13790)

Qualquer corpo radia pelo simples facto de possuir temperatura, de acordo com a lei de Stephan-Boltzmann. Este fenómeno assume importância no balanço energético da habitação se a radiação emitida for substancialmente diferente da recebida, facto que acontece precisamente com as trocas radiativas com o céu, cuja potência radiante é substancialmente menor.

Formalmente as perdas radiativas não fazem parte dos ganhos. Estão aí incluídas (eq. 4.8) por conveniência, como indica o ponto 11.3.2 da ISO 13790.

Na realidade, sendo este fator independente da temperatura interna da habitação (eq. 4.13) não deverá por isso ser sujeito à diminuição imposta às perdas (pela multiplicação do respetivo fator de utilização, η_p , eq. 4.1), pelo que a sua inclusão como subtração aos ganhos será de facto conveniente.

A alternativa, referida no ponto 11.3.5 da norma ISO 13790, passaria por tratar este fator como um fator extra de perdas, através do uso da temperatura operativa exterior em vez da temperatura do ar (à semelhança do que o ESP-r faz, eq. 3.9).

O cálculo das perdas radiativas para o céu (2.º termo da eq. 4.8) foi realizado considerando a aproximação dada pelo ITE50 para o sótão (assim equivalente a um teto liso com $U=0,73$ W/m².K, logo associado a um fator de forma com o céu unitário), desprezando a contribuição das paredes e porta do *hall* interno e considerando as restantes paredes e vidros com fator de forma com o céu de 0,5. Foi ainda considerada a aproximação para o coeficiente externo radiativo (eq. 4.15) e a diferença entre a temperatura do ar e do céu para as regiões intermédias ($\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u}=11$ K), ambas aproximações sugeridas pela norma ISO13790. As 3 componentes, relativas à parede exterior, vidros e teto, foram assim calculadas obtendo-se o resultado final de 6,0 kWh/m²:

Quadro 8.1: Modelo simplificado de perdas radiativas para o céu.

| Dados | par_ext | vidro | Cobe.ITE50 | [unidades] |
|---|---------|--------|------------|---------------------|
| R_e | 0,04 | 0,04 | 0,04 | $[m^2 \cdot K/W]$ |
| U | 0,49 | 2,84 | 0,73 | $[W/(m^2 \cdot K)]$ |
| A | 100,2 | 19,6 | 163,3 | $[m^2]$ |
| ϵ | 0,9 | 0,84 | 0,9 | $[-]$ |
| $F_{c\acute{e}u}$ | 0,5 | 0,5 | 1 | $[-]$ |
| (aproximação $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u} = 11\text{ K}$ e $h_t = 5,0\text{ E}$) | | | | |
| $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u}$ | 11 | 11 | 11 | $[K]$ |
| h_t | 4,5 | 4,2 | 4,5 | $[W/(m^2 \cdot K)]$ |
| Φ_r | 49 | 51 | 236 | $[W]$ |
| $Q_{r,p/c\acute{e}u}$ | 143 | 150 | 691 | $[kWh]$ |
| | | | 984 | $[kWh]$ |
| | | TOTAL: | 6,0 | $[kWh/m^2]$ |

Subtraindo este valor aos ganhos solares e internos (FCV.1f) obtém-se:

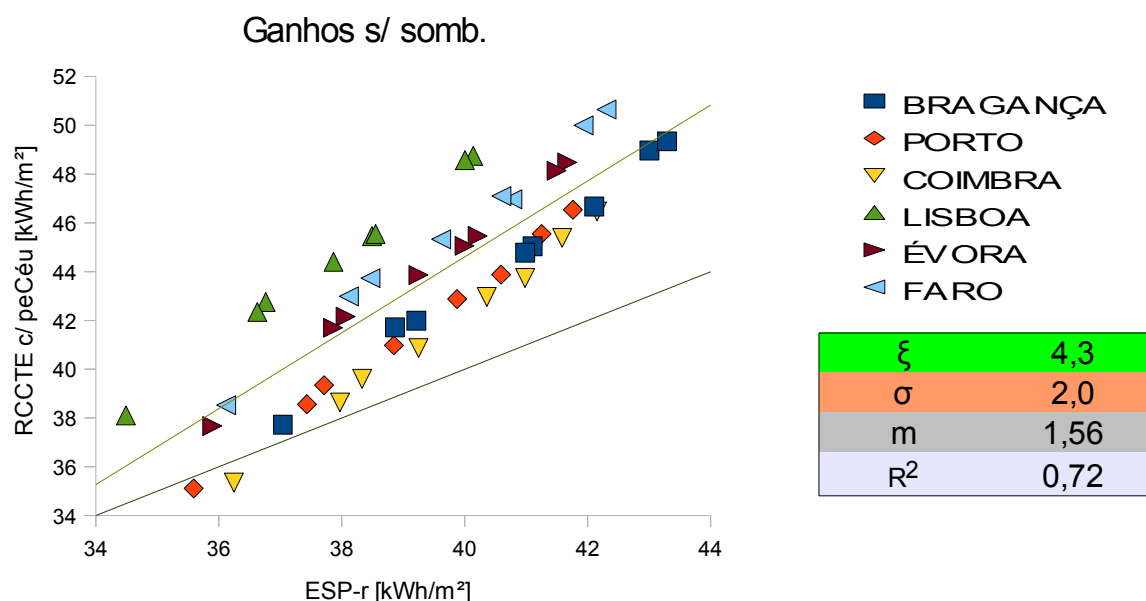


Fig. 8.2: Inclusão das perdas radiativas para o céu nos ganhos calculados e comparação com os ganhos obtidos pelo ESP-r.

A inclusão deste fator, ainda que calculado de forma simplificada, conduziu a uma melhoria de 59% relativamente ao desfasamento original dos ganhos (ξ : 10,3 → 4,3 kWh/m²). Uma análise mais precisa deste termo remeteria, necessariamente, para o cálculo da temperatura do céu, não efetuado neste trabalho. Encontra-se, no entanto, no anexo G, uma análise das perdas radiativas assumindo a máxima variação da diferença entre a temperatura do céu e a do ar considerada na norma ISO 13790 ($9K \leq \Delta\theta_{ar,c\acute{e}u} \leq 11K$).

8.3 Dissipação de ganhos pelo chão

Nos dois gráficos seguintes verifica-se que o declive registado ($m = 1,56$) diminui substancialmente ao serem anuladas as trocas de calor pelo chão ($m: 1,56 \rightarrow 1,25$) e pelo céu ($m: 1,25 \rightarrow 1,01$):

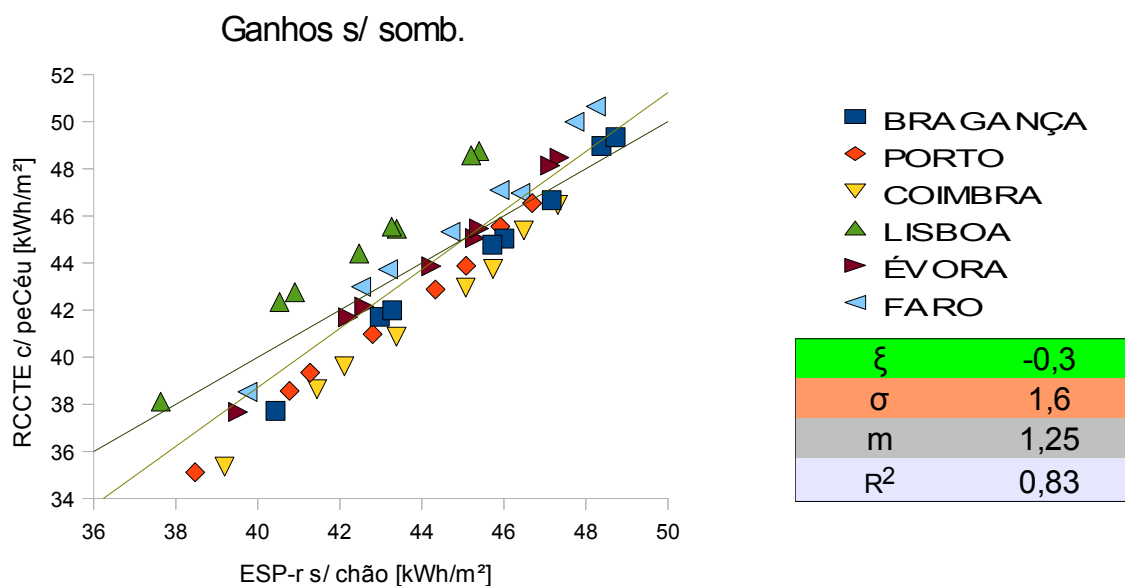


Fig. 8.3: Comparação dos ganhos calculados (com perdas para o céu) com os simulados (obtidos com chão adiabático).

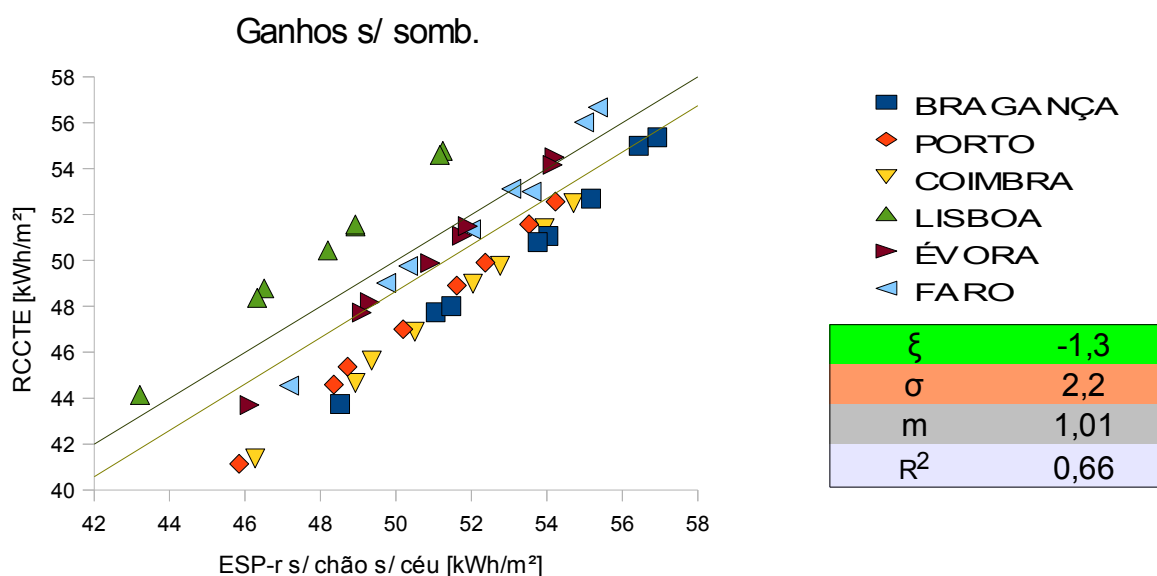


Fig. 8.4: Ganhos segundo o RCCTE vs ganhos segundo o ESP-r (sem trocas de calor pelo chão nem pelo céu).

A norma ISO 13790 (ponto I.3.2) refere que os ganhos calculados são na realidade superiores aos inferidos pelos métodos pormenorizados das simulações.

O mesmo ponto indica a possibilidade de uma parte (pequena) da radiação solar poder entrar por uma janela e sair diretamente por outra. Este fenómeno é de cálculo difícil e terá (como previsto na norma) pouca expressão também neste caso, uma vez que poderia acontecer apenas na sala, em algumas rotações e em curtos períodos de tempo (a janela da fachada norte dista 2,3 m do vértice a noroeste e a janela a este 2,0 m, ver anexo H).

A norma refere ainda que uma parte dos ganhos (solares e internos) é absorvida e subsequentemente dissipada pelo chão (paredes ou teto), não sendo alvo de gasto energético (e logo não detetada):

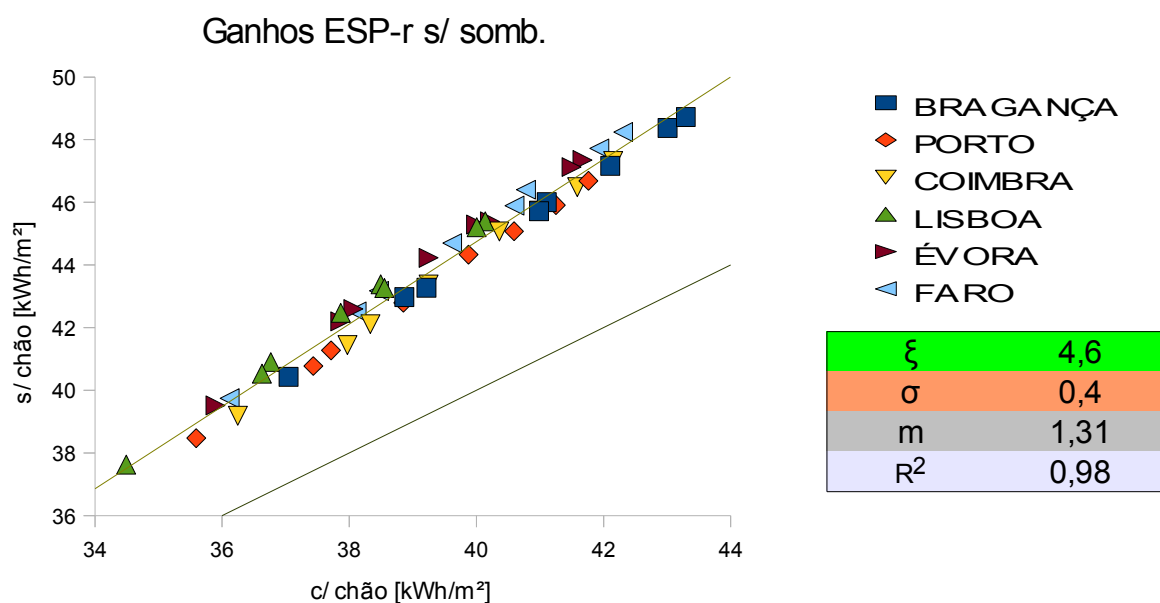


Fig. 8.5: Ganhos dissipados pelo chão (segundo o procedimento adotado).

A confrontação dos ganhos obtidos na moradia sem chão e com chão (segundo o procedimento adotado) é reveladora da existência de uma fração ($m=1,3$) importante de energia (solar e interna) que não constitui um ganho (uma vez que é diretamente dissipada pelo chão, valendo neste caso $4,6 \text{ kWh/m}^2$). Repare-se que o valor obtido é muito semelhante ao desfasamento entre os ganhos calculados segundo FCV.1f (com as perdas radiativas pelo céu incluídas) e os simulados segundo o procedimento adotado ($\xi=4,3 \text{ kWh/m}^2$, ver fig. 8.2).

O subcapítulo 9.6.2 demonstra, no entanto, que a modelação do chão adotada no procedimento (ver quadro 6.1) não traduz o comportamento térmico quanto às perdas verificadas por esse elemento. No capítulo 9.7, é incluído um novo procedimento de modelação do chão no ESP-r, mais concordante com a realidade (segundo o anexo D da norma ISO13370). Aplicando esse procedimento nas simulações do gráfico anterior (abscissas) verifica-se que o valor obtido é substancialmente menor ($4,6 \text{ kWh/m}^2 \rightarrow 1,5 \text{ kWh/m}^2$):

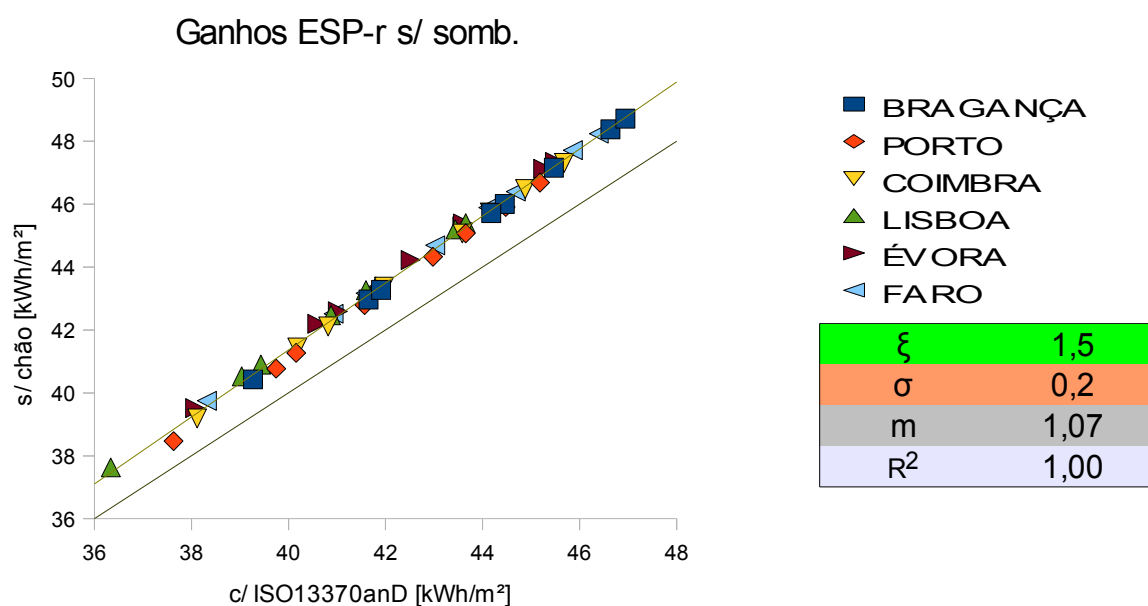


Fig. 8.6: Ganhos dissipados pelo chão (a modelação do solo no ESP-r foi realizada segundo os pressupostos do anexo D da ISO 13370).

Repare-se finalmente na comparação dos ganhos calculados com inclusão das perdas radiativas, com os obtidos pelo ESP-r, considerando agora os pressupostos do anexo D da ISO 13370 (na modelação do chão). O desfase observado ($1,2 \text{ kWh/m}^2$) é apenas ligeiramente inferior aos ganhos dissipados pelo chão ($1,5 \text{ kWh/m}^2$):

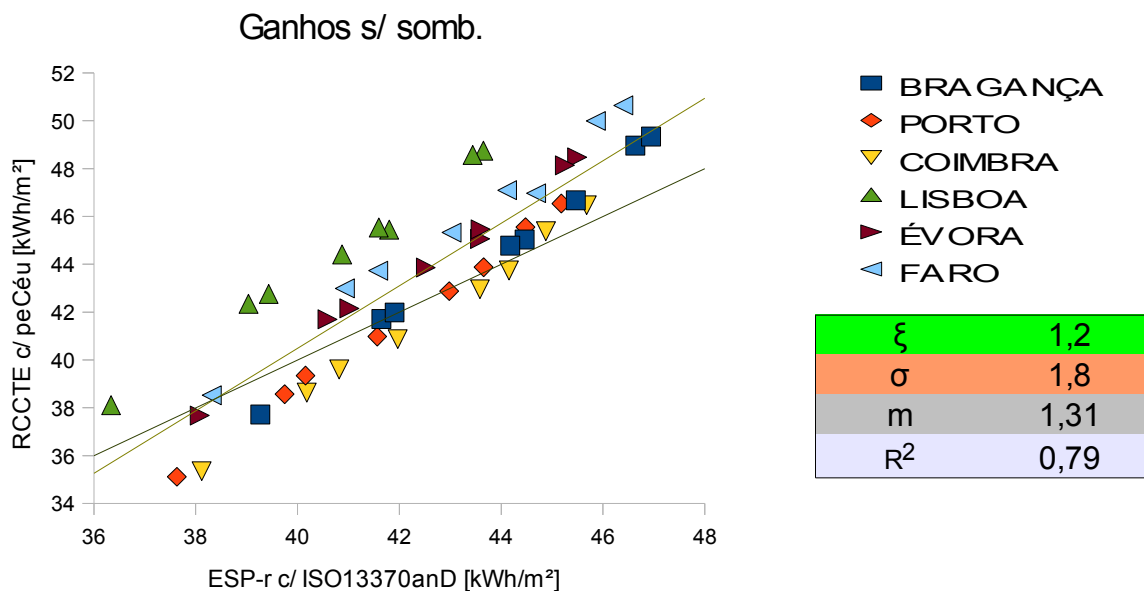


Fig. 8.7: Inclusão das perdas radiativas pelo céu nos ganhos calculados e comparação com os ganhos obtidos pelo ESP-r (com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370).

8.4 Aumento de perdas radiativas provocadas pela radiação solar

Segue-se uma breve análise que visa estimar o aumento das perdas radiativas pelo céu decorrentes da radiação solar (que incide na superfície externa da envolvente, provocando o seu aquecimento). Esta análise baseia-se na aplicação do método pormenorizado de cálculo do coeficiente externo radiativo (eq. 4.14).

Foi utilizada a mesma aproximação para o cálculo da temperatura do céu (11 K inferior à temperatura do ar) e as temperaturas médias superficiais de cada elemento da envolvente na situação simulada com e sem sol. As diferenças de temperatura conduziram aos seguintes resultados:

Quadro 8.2: Aumento de perdas radiativas devido aos ganhos solares.

| simulação | | Aumento percentual [%] | |
|------------------|-------------------|------------------------|------|
| Rotação & cidade | Perdas radiativas | Da temperatura em: | |
| | | [K] | [°C] |
| 0br | 3,1 | 2,4 | 40 |
| 0po | 3,0 | 2,2 | 39 |
| 0co | 3,1 | 2,3 | 36 |
| 0ev | 2,7 | 2,0 | 29 |
| 0fa | 2,9 | 2,2 | 31 |
| 0lx | 2,2 | 1,7 | 24 |
| 45lx | 2,2 | 1,7 | 25 |
| 90lx | 2,2 | 1,7 | 24 |
| 135lx | 2,3 | 1,8 | 26 |
| 180lx | 2,3 | 1,8 | 25 |
| 225lx | 2,3 | 1,7 | 25 |
| 270lx | 2,2 | 1,7 | 24 |
| 315lx | 2,2 | 1,7 | 24 |

O aumento das perdas radiativas com a incidência solar resulta do ligeiro aumento das temperaturas superficiais exteriores da habitação, e por conseguinte do parâmetro $\theta_{\text{sup,céu}}$ (média entre a temperatura da superfície exterior e a temperatura do céu).

As perdas radiativas assim calculadas são praticamente invariáveis com a rotação da moradia (variam apenas 0,1% em Lisboa) e registam um aumento de 2,2 a 3% com a incidência solar.

Na realidade, apesar do aumento de temperatura ser considerável em °C (40% no máximo, em Bragança, *0br*), é desprezável em unidades de temperatura absoluta (2,4%), pelo que será mínimo o respetivo aumento percentual das perdas radiativas pelo céu (3,1%). O anexo J pormenoriza os dados usados e refere ainda qual seria o aumento de perdas radiativas para o céu, calculado com base no aumento de temperatura (superficial da envolvente) resultante da anulação das trocas radiativas pelo céu (nas simulações com sol).

O próximo ponto completa a análise dos ganhos e refere-se especificamente ao cálculo da energia solar que atravessa os envidraçados.

8.5 Energia solar pormenorizada pelos envidraçados sem sombreamento

Esta última análise remete para o cálculo da energia solar que entra na moradia através dos envidraçados.

O RCCTE estima este valor na FCV.1d (eq. 2.9) com base no fator solar máximo do vidro (fração de energia que entra pelo envidraçado para um ângulo de 0° com a normal, g_{\perp}). No entanto, uma vez que o fator solar diminui com o aumento do ângulo dos raios solares com a normal (ver anexo D), g_{\perp} é ainda multiplicado (e logo diminuído) por F_w , o fator de correção da seletividade angular ($0 < F_w < 1$). O RCCTE propõe assim, para F_w , 0,8 para as orientações a norte, 0,75 a sul e 0,85 para as restantes (NE, E, SE, SW, E e NW).

Na realidade a norma ISO13790 (eq. 4.11) propõe este procedimento como estimativa simplificada dos ganhos solares pelos envidraçados (sugerindo $F_w = 0,9$ na ausência de valores nacionais pré-definidos), mas indica logo a seguir o método mais preciso para este fator.

8.5.1 Frações da energia solar direta (a_{dir}) e ângulo de incidência (θ_{dir})

Segundo o procedimento pormenorizado da norma ISO 13790, a energia solar incidente em determinada superfície é decomposta na sua componente direta, a_{dir} , que é a fração de energia solar direta,

$$a_{dir} = \frac{\sum_{hora} E_{dir,h}}{\sum_{hora} (E_{dir,h} + E_{dif,h})}, \text{ eq. 8.1}$$

($E_{dir,h}$ e $E_{dif,h}$ representam a energia solar incidente na superfície, durante a hora h e por m^2 , correspondente, respetivamente, à radiação direta e difusa)

e na sua componente difusa ($1 - a_{dir}$).

As fracções de energia são depois multiplicadas pelo fator solar respetivo e somadas (eq. 4.12).

O ESP-r considera o ângulo de 57° para a captação da radiação difusa (g_{57°).

O ângulo representativo da radiação direta, doravante designado «ângulo de incidência» (θ_{dir}), depende da orientação e clima e resulta da média ponderada do ângulo $\theta_{dir,h}$ (que a normal da superfície faz com a radiação solar direta em cada passo) com a respetiva energia direta

correspondente ao passo considerado (neste caso, horário):
$$\theta_{dir} = \frac{\sum_{hora} \theta_{dir,h} E_{dir,h}}{\sum_{hora} E_{dir,h}} \quad (\text{eq. 8.2})$$

$E_{dir,h}$ e $E_{dif,h}$ foram, assim, obtidos através dos ficheiros climáticos aplicados no ESP-r (valores horários da radiação direta e difusa na horizontal), sendo o ângulo θ_{dir} determinado pelos algoritmos apresentados no anexo C (onde se encontra ainda referência ao cálculo dos parâmetros de a_{dir}).

As frações de energia solar direta (a_{dir}) foram calculadas:

Quadro 8.3: Fração de energia solar direta, a_{dir} [-], segundo os dados climáticos usados no ESP-r.

| Clima ESP-r | FRAÇÃO DE ENERGIA DIRETA, a_{dir} [-] | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,149 | 0,472 | 0,620 | 0,622 | 0,557 | 0,622 | 0,617 | 0,465 | 0,742 |
| PORTO | 0,131 | 0,384 | 0,544 | 0,562 | 0,537 | 0,633 | 0,635 | 0,490 | 0,728 |
| COIMBRA | 0,115 | 0,346 | 0,508 | 0,529 | 0,500 | 0,599 | 0,604 | 0,462 | 0,693 |
| LISBOA | 0,380 | 0,581 | 0,678 | 0,640 | 0,512 | 0,789 | 0,833 | 0,778 | 0,736 |
| ÉVORA | 0,126 | 0,425 | 0,582 | 0,591 | 0,536 | 0,613 | 0,612 | 0,463 | 0,721 |
| FARO | 0,199 | 0,509 | 0,643 | 0,633 | 0,554 | 0,664 | 0,681 | 0,557 | 0,802 |

Bem como o ângulo de incidência (θ_{dir}) de cada cidade e orientação:

Quadro 8.4: Ângulo de incidência, θ_{dir} [°].

| Clima ESP-r | ÂNGULO DE INCIDÊNCIA, θ_{dir} [°] | | | | | | | | |
|-------------|--|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 77 | 52 | 38 | 53 | 66 | 53 | 38 | 53 | 44 |
| PORTO | 77 | 54 | 40 | 54 | 67 | 53 | 38 | 53 | 42 |
| COIMBRA | 77 | 54 | 41 | 55 | 67 | 54 | 37 | 52 | 42 |
| LISBOA | 74 | 44 | 31 | 54 | 68 | 51 | 15 | 43 | 43 |
| ÉVORA | 78 | 54 | 39 | 53 | 66 | 53 | 38 | 53 | 43 |
| FARO | 77 | 52 | 39 | 55 | 69 | 54 | 37 | 52 | 41 |

O anexo K apresenta ainda os valores de a_{dir} e θ_{dir} , obtidos a partir de outras bases de dados.

8.5.2 Fatores solares relativos à radiação direta

Seguem-se os fatores solares correspondentes aos ângulos de incidência para os três tipos de envidraçados estudados (foram obtidos por interpolação linear dos valores originais dados pelo Window5- ver anexo D):

Quadro 8.5: Fatores solares do vidro normal relativos aos ângulos de incidência.

| Clima ESP-r | Fator solar [-] do vidro normal ($g^{\perp}=0,727$) relativamente a θ_{dir} | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,314 | 0,664 | 0,708 | 0,661 | 0,534 | 0,662 | 0,707 | 0,661 | 0,695 |
| PORTO | 0,315 | 0,656 | 0,704 | 0,653 | 0,524 | 0,660 | 0,708 | 0,663 | 0,698 |
| COIMBRA | 0,314 | 0,654 | 0,702 | 0,653 | 0,518 | 0,657 | 0,708 | 0,664 | 0,700 |
| LISBOA | 0,386 | 0,695 | 0,717 | 0,656 | 0,506 | 0,672 | 0,725 | 0,696 | 0,695 |
| ÉVORA | 0,306 | 0,657 | 0,706 | 0,660 | 0,528 | 0,662 | 0,708 | 0,661 | 0,695 |
| FARO | 0,316 | 0,665 | 0,707 | 0,650 | 0,495 | 0,654 | 0,709 | 0,667 | 0,701 |

Quadro 8.6: Fatores solares do sombreamento interior relativos aos ângulos de incidência.

| Clima ESP-r | Fator solar [-] do somb. interior ($g^{\perp}=0,502$) relativamente a θ_{dir} | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,239 | 0,464 | 0,491 | 0,462 | 0,384 | 0,462 | 0,491 | 0,462 | 0,483 |
| PORTO | 0,240 | 0,459 | 0,488 | 0,457 | 0,378 | 0,461 | 0,491 | 0,463 | 0,485 |
| COIMBRA | 0,239 | 0,457 | 0,487 | 0,457 | 0,374 | 0,459 | 0,492 | 0,464 | 0,486 |
| LISBOA | 0,287 | 0,483 | 0,498 | 0,458 | 0,366 | 0,469 | 0,504 | 0,483 | 0,483 |
| ÉVORA | 0,234 | 0,459 | 0,490 | 0,461 | 0,380 | 0,462 | 0,491 | 0,462 | 0,483 |
| FARO | 0,241 | 0,464 | 0,490 | 0,455 | 0,360 | 0,457 | 0,492 | 0,466 | 0,487 |

Quadro 8.7: Fatores solares do sombreamento exterior relativos aos ângulos de incidência.

| Clima ESP-r | Fator solar [-] do somb. exterior ($g^{\perp}=0,369$) relativamente a θ_{dir} | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,176 | 0,338 | 0,358 | 0,336 | 0,278 | 0,336 | 0,358 | 0,336 | 0,352 |
| PORTO | 0,176 | 0,334 | 0,356 | 0,332 | 0,273 | 0,336 | 0,359 | 0,337 | 0,354 |
| COIMBRA | 0,176 | 0,333 | 0,356 | 0,332 | 0,270 | 0,334 | 0,359 | 0,337 | 0,354 |
| LISBOA | 0,209 | 0,352 | 0,363 | 0,334 | 0,264 | 0,341 | 0,370 | 0,353 | 0,352 |
| ÉVORA | 0,172 | 0,334 | 0,358 | 0,335 | 0,275 | 0,336 | 0,359 | 0,336 | 0,352 |
| FARO | 0,177 | 0,338 | 0,358 | 0,331 | 0,260 | 0,333 | 0,359 | 0,339 | 0,355 |

O fator solar da radiação difusa é o correspondente a uma incidência de 57° com a normal:

| vidro | $g_{dif,57^{\circ}}[-]$ |
|-----------|-------------------------|
| normal | 0,635 |
| somb. Int | 0,446 |
| somb. Ext | 0,324 |

Quadro 8.8: Fatores solares [-] relativos à radiação difusa.

8.5.3 Fatores solares resultantes

O fator solar aplicado resulta assim da combinação do fator solar relativo à radiação direta com o respetivo à radiação difusa. O peso de cada parte é determinado por a_{dir} (eq. 4.12):

Quadro 8.9: Fator solar do vidro normal segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790.

| <i>Clima ESP-r</i> | Fator solar resultante [-] para o vidro normal ($g_{\perp}=0,727$) | | | | | | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,587 | 0,649 | 0,680 | 0,651 | 0,579 | 0,652 | 0,680 | 0,647 | 0,679 |
| PORTO | 0,593 | 0,643 | 0,673 | 0,645 | 0,576 | 0,651 | 0,681 | 0,649 | 0,681 |
| COIMBRA | 0,598 | 0,642 | 0,669 | 0,644 | 0,577 | 0,648 | 0,679 | 0,648 | 0,680 |
| LISBOA | 0,540 | 0,670 | 0,691 | 0,648 | 0,569 | 0,664 | 0,710 | 0,683 | 0,679 |
| ÉVORA | 0,594 | 0,644 | 0,677 | 0,650 | 0,578 | 0,652 | 0,680 | 0,647 | 0,678 |
| FARO | 0,571 | 0,650 | 0,681 | 0,645 | 0,558 | 0,647 | 0,685 | 0,653 | 0,688 |

Quadro 8.10: Fator solar do sombreamento interior segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790.

| <i>Clima ESP-r</i> | Fator solar resultante [-] para o sombreamento interior ($g_{\perp}=0,502$) | | | | | | | | |
|--------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,415 | 0,454 | 0,474 | 0,456 | 0,411 | 0,456 | 0,473 | 0,453 | 0,473 |
| PORTO | 0,419 | 0,451 | 0,469 | 0,452 | 0,409 | 0,456 | 0,475 | 0,454 | 0,474 |
| COIMBRA | 0,422 | 0,450 | 0,467 | 0,451 | 0,410 | 0,454 | 0,473 | 0,454 | 0,473 |
| LISBOA | 0,386 | 0,467 | 0,481 | 0,454 | 0,405 | 0,464 | 0,495 | 0,475 | 0,473 |
| ÉVORA | 0,419 | 0,451 | 0,472 | 0,455 | 0,410 | 0,456 | 0,474 | 0,453 | 0,472 |
| FARO | 0,405 | 0,455 | 0,474 | 0,452 | 0,398 | 0,453 | 0,477 | 0,457 | 0,479 |

Quadro 8.11: Fator solar do sombreamento exterior segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790.

| <i>Clima ESP-r</i> | Fator solar resultante [-] para o sombreamento exterior ($g_{\perp}=0,369$) | | | | | | | | |
|--------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,302 | 0,331 | 0,345 | 0,332 | 0,298 | 0,332 | 0,345 | 0,330 | 0,345 |
| PORTO | 0,305 | 0,328 | 0,342 | 0,329 | 0,297 | 0,331 | 0,346 | 0,330 | 0,346 |
| COIMBRA | 0,307 | 0,327 | 0,340 | 0,328 | 0,297 | 0,330 | 0,345 | 0,330 | 0,345 |
| LISBOA | 0,280 | 0,340 | 0,351 | 0,330 | 0,294 | 0,338 | 0,363 | 0,346 | 0,345 |
| ÉVORA | 0,305 | 0,328 | 0,344 | 0,331 | 0,298 | 0,332 | 0,345 | 0,330 | 0,344 |
| FARO | 0,295 | 0,331 | 0,346 | 0,329 | 0,288 | 0,330 | 0,348 | 0,332 | 0,349 |

8.5.4 Comparação do modelo pormenorizado com o usado pelo RCCTE

Seguem-se os ganhos calculados (com perdas radiativas incluídas) considerando as três soluções óticas referidas no ponto 6.1. A diferença entre ordenadas e abcissas consiste no método de cálculo aplicado à energia solar que atravessa os envidraçados (nas abcissas está o procedimento pormenorizado da norma ISO 13790 e nas ordenadas o usado pelo RCCTE). Repare-se na ligeira sobrestimação provocada pela aproximação do RCCTE

Para o envidraçado incolor ($g_{\perp}=0,727$):

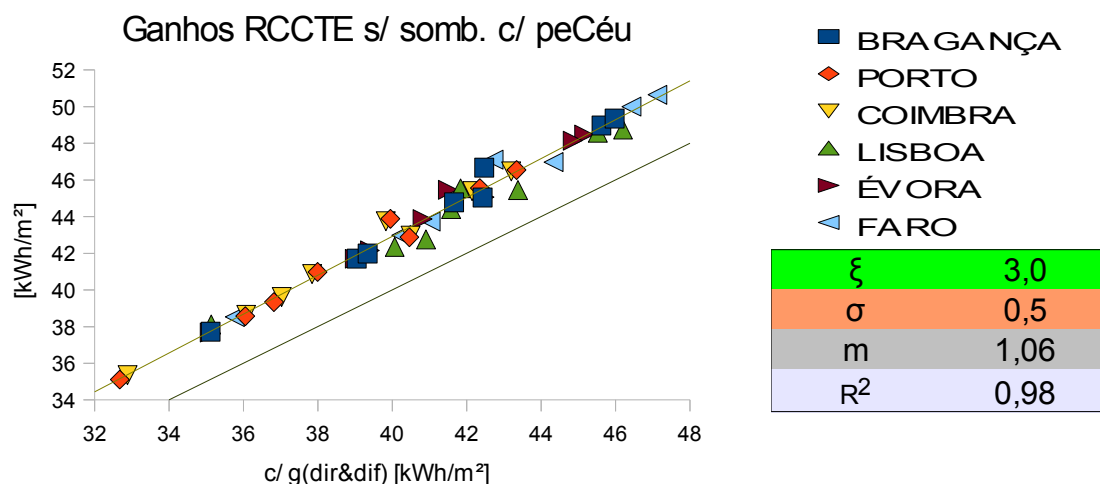


Fig. 8.8: Os ganhos solares para o envidraçado normal ($g_{\perp}=0,727$) estão sobrestimados no RCCTE em cerca de $3,0 \text{ kWh/m}^2$ (relativamente ao método pormenorizado da ISO 13790).

Para o envidraçado sombreado internamente ($g_{\perp}=0,502$):

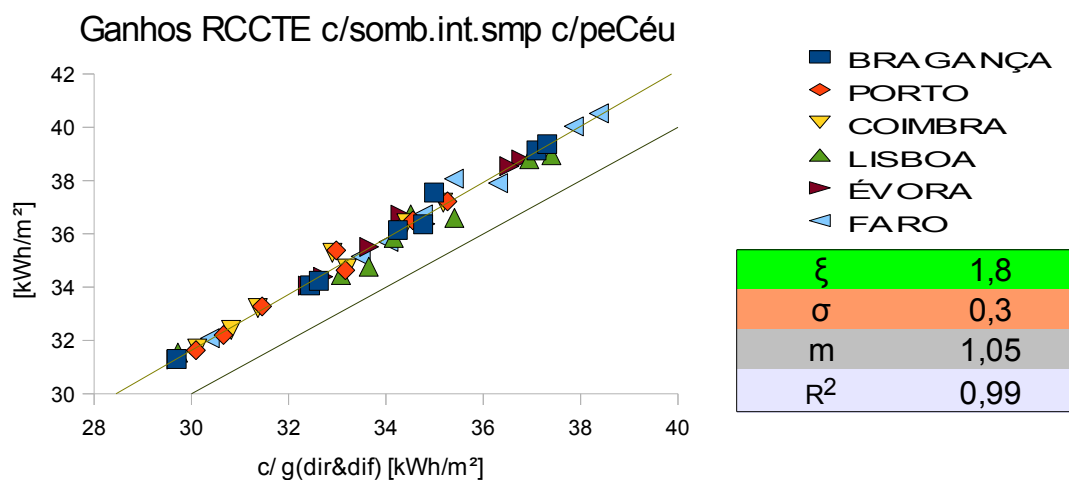


Fig. 8.9: Os ganhos solares para o sombreado interior ($g_{\perp}=0,502$) estão sobrestimados no RCCTE em cerca de $1,8 \text{ kWh/m}^2$ (relativamente ao método pormenorizado da ISO 13790).

Para o envidraçado sombreado externamente ($g_{\perp}=0,369$):

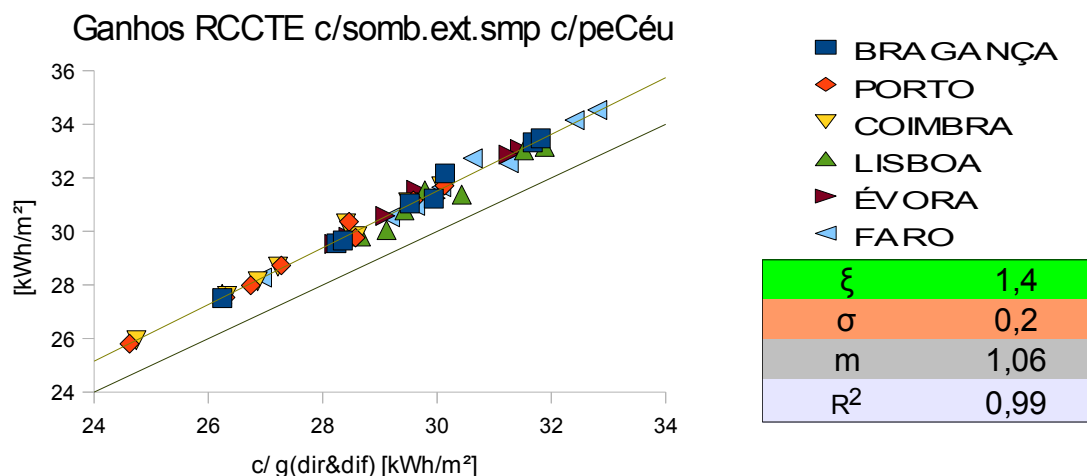


Fig. 8.10: Os ganhos solares para o sombreamento exterior ($g_{\perp}=0,369$) estão sobrestimados no RCCTE em cerca de 1,4 kWh/m² (relativamente ao método pormenorizado da ISO 13790).

8.5.5 Ganhos calculados (com modelo pormenorizado) vs ganhos simulados

Apresenta-se agora a comparação dos ganhos calculados (incluindo o procedimento pormenorizado do fator solar e as perdas radiativas para o céu) com os ganhos obtidos pelo ESP-r (considerando a modelação pelo solo segundo o anexo D da ISO 13370), para o caso do envidraçado duplo. Verifica-se, em média, uma subestimação dos ganhos calculados de 1,7 kWh/m², sendo a dispersão considerável ($\sigma= 1,8$ kWh/m²):

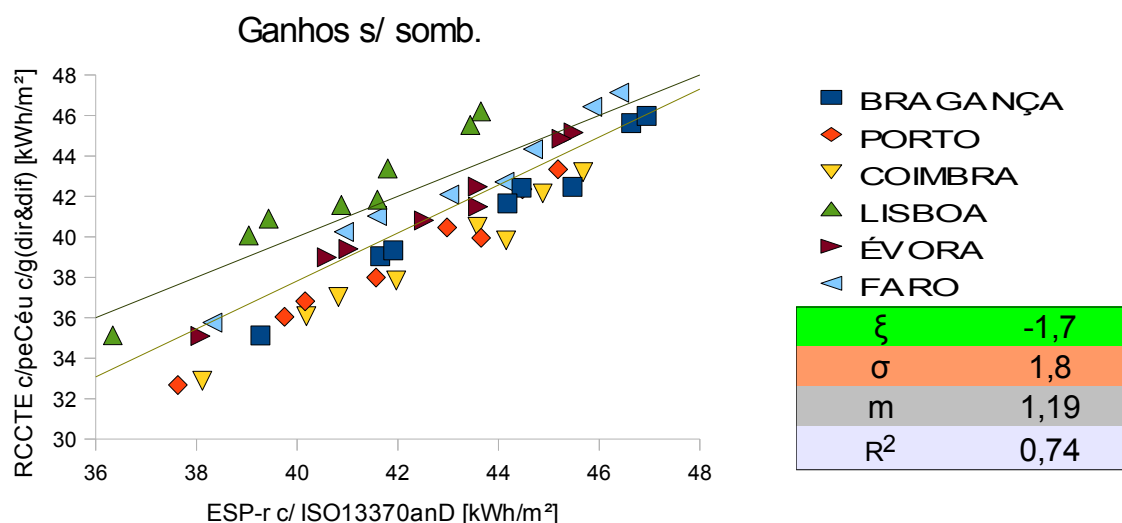


Fig. 8.11: Ganhos calculados incluindo as perdas radiativas pelo céu e fator solar pormenorizado vs ganhos obtidos pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13790), sem sombreamento.

8.6 Percentagem de sombreamento

Finalmente, ainda relativamente aos ganhos solares, é analisado o ponto 2.3 do anexo V do RCCTE que refere que «(...) o fator solar do envidraçado deve ser tomado com dispositivos de sombreamento móveis ativados a 70%, ou seja, o fator solar do vão envidraçado é igual à soma de 30% do fator solar do vidro mais 70% do fator solar do vão envidraçado com a proteção solar móvel atuada (...)»

Este procedimento é comparado com a situação simulada de sombreamento acima de 300W, indicada no ponto G.5.3.1 da ISO 13790 (segundo a qual o sombreamento deverá ser ativado sempre que a radiação incidente exceder 300W).

8.6.1 Frações reais de energia solar acima de 300 W

Verifica-se assim (a partir dos dados dos ficheiros climáticos) que para as orientações a norte (N, NE e NW) a fração de energia solar incidente acima desse valor (300 W) é radicalmente diferente da sugerida pelo RCCTE (0,70):

Quadro 8.12: Fração de energia solar relativa à incidência de radiação solar acima dos 300W, por orientação e clima (repare-se que a orientação a norte nunca é sombreada).

| frac. En↑300W | N | NW | W | SW | S | SE | E | NE |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BRAGANÇA | 0,00 | 0,47 | 0,72 | 0,77 | 0,73 | 0,71 | 0,61 | 0,27 |
| PORTO | 0,00 | 0,48 | 0,73 | 0,76 | 0,70 | 0,64 | 0,54 | 0,21 |
| COIMBRA | 0,00 | 0,47 | 0,72 | 0,74 | 0,67 | 0,62 | 0,52 | 0,20 |
| LISBOA | 0,01 | 0,54 | 0,74 | 0,75 | 0,66 | 0,66 | 0,61 | 0,33 |
| ÉVORA | 0,00 | 0,50 | 0,74 | 0,76 | 0,68 | 0,66 | 0,60 | 0,31 |
| FARO | 0,00 | 0,58 | 0,77 | 0,76 | 0,68 | 0,70 | 0,66 | 0,37 |
| média | 0,00 | 0,51 | 0,74 | 0,75 | 0,69 | 0,67 | 0,59 | 0,28 |
| σ | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 |

Repare-se no desvio percentual do valor indicado pelo RCCTE (0,70) relativamente aos valores

inferidos no ESP-r, constantes na tabela anterior ($Desvio \%_{somb.} = \frac{0,70 - f_{somb.ESP}}{0,70} \cdot 100$, eq. 8.3):

Quadro 8.13: Erro percentual da fração de sombreamento indicada pelo RCCTE.

| %err.En↑300W | N | NW | W | SW | S | SE | E | NE |
|--------------|-----|----|-----|----|----|----|----|----|
| BRAGANÇA | 100 | 33 | -4 | -9 | -4 | -2 | 12 | 62 |
| PORTO | 100 | 32 | -4 | -9 | 0 | 9 | 23 | 69 |
| COIMBRA | 100 | 34 | -3 | -6 | 4 | 11 | 25 | 72 |
| LISBOA | 99 | 24 | -6 | -7 | 6 | 5 | 12 | 53 |
| ÉVORA | 100 | 28 | -5 | -8 | 3 | 6 | 15 | 56 |
| FARO | 100 | 17 | -10 | -8 | 3 | 0 | 6 | 47 |
| média | 100 | 28 | -5 | -8 | 2 | 5 | 16 | 60 |
| σ | 0,5 | 6 | 3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |

8.6.2 Inclusão das frações reais nos ganhos e comparação com os ganhos originais

Os ganhos efetuados segundo a aproximação do RCCTE relativa à quantidade de sombreamento (70% em todas as orientações) subestimam os reais (calculados a partir das percentagens exatas de sombreamento, indicadas no quadro 8.12) em cerca de 0,91 kWh/m² no caso do sombreamento ser interior, ou em 1,45 kWh/m², para o sombreamento exterior.

Temos assim, para o sombreamento interior:

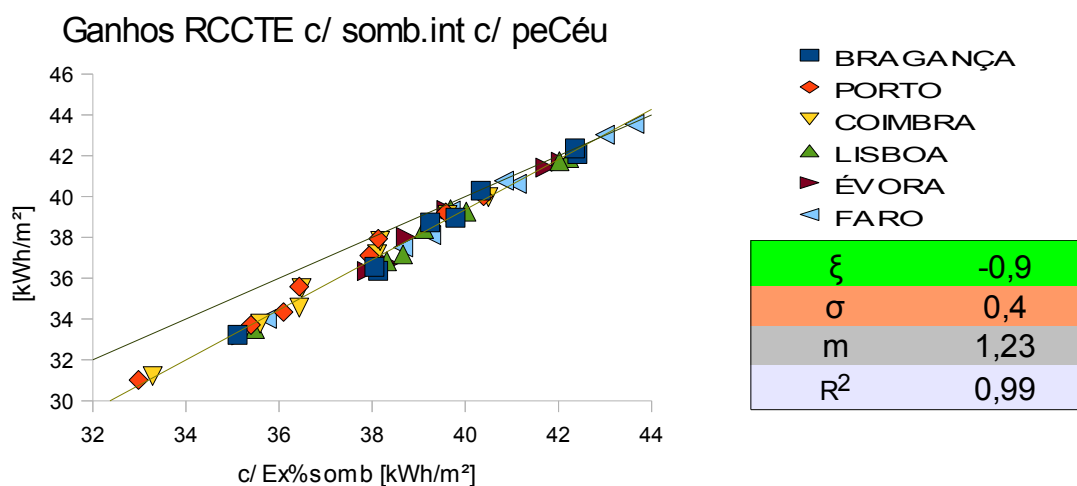


Fig. 8.12: Erro no cálculo dos ganhos, resultante da generalização da aplicação de 70% de sombreamento (interior) em todas as direções.

E sombreamento exterior:

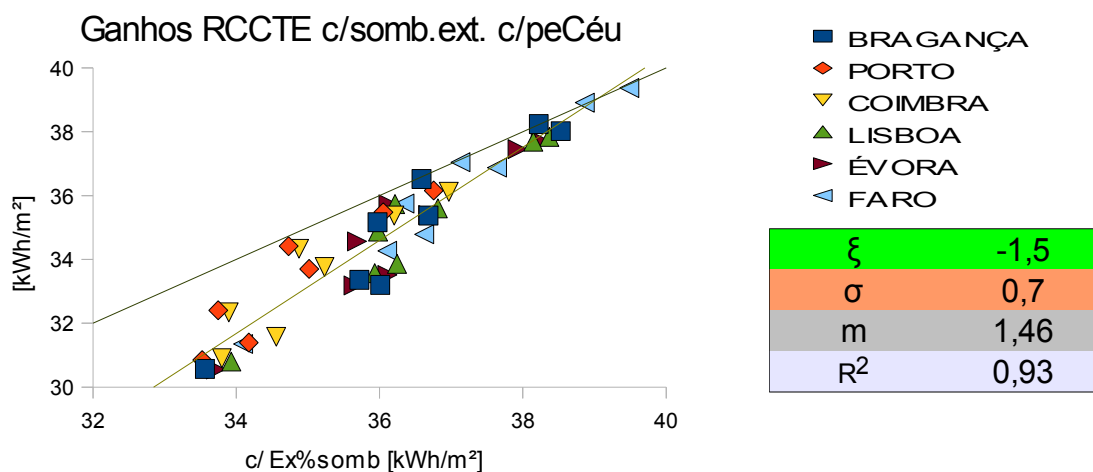


Fig. 8.13: Erro no cálculo dos ganhos, resultante da generalização da aplicação de 70% de sombreamento (exterior) em todas as direções.

Do quadro 8.12 observa-se que a orientação a norte nunca é sombreada (0%) e que a orientação a NE é ainda menos sombreada (28%) que a orientação a NW (51%).

8.6.3 Consideração de sombreamento nulo a norte e nordeste

Repare-se que se obtém um desvio médio mínimo, nos dois sombreamentos considerados, ao anular apenas o sombreamento a norte e nordeste, e mantendo o valor sugerido pelo RCCTE para as demais orientações:

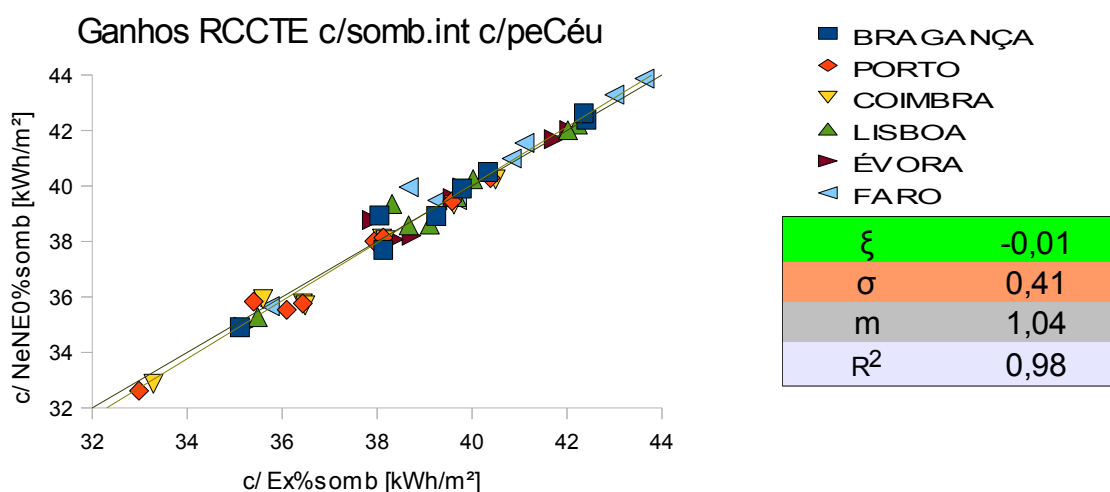


Fig. 8.14: Anulação do sombreamento (interior) a N e NE no cálculo original dos ganhos pelo RCCTE vs cálculo análogo com a percentagem exata de sombreamento.

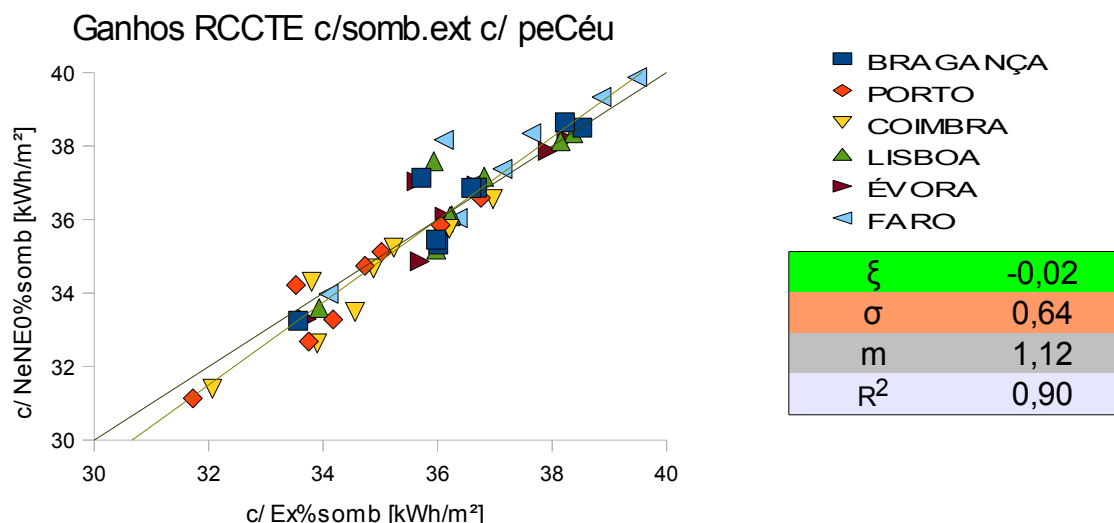


Fig. 8.15: Anulação do sombreamento (exterior) a N e NE no cálculo original dos ganhos pelo RCCTE vs cálculo análogo com a percentagem exata de sombreamento.

Anular apenas o sombreamento a norte (ver anexo L) aumenta ligeiramente o desfasamento obtido (ξ_{int} : $-0,01 \rightarrow -0,54$ e ξ_{ext} : $-0,02 \rightarrow -0,85$).

8.7 Inclusão do procedimento pormenorizado abaixo e acima de 300W

A análise anterior baseia-se apenas na variação da percentagem de sombreamento, mantendo inalteráveis os valores aplicados de fator solar ($g_{vn\pm} = 0,727$, $g_{somb,i\pm} = 0,502$ e $g_{somb,e\pm} = 0,369$), aos quais se aplicou o fator de seletividade (F_w) do RCCTE para cada orientação (eq.4.11). Este exercício permitiu estimar o desfasamento que advém da aplicação de 70% de sombreamento em todas as fachadas.

8.7.1 Valores de a_{dir} e θ_{dir} acima e abaixo de 300 W

No entanto, a aplicação de dois tipos de envidraçados distintos (abaixo e acima de 300W) implica a determinação de novos valores de a_{dir} e θ_{dir} , correspondentes ao período de tempo em que a radiação total incidente é inferior a 300W:

Quadro 8.14: Fração de energia direta para radiação total inferior a 300W.

| Clima ESP-r | FRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR DIRETA, a_{dir} [-], abaixo de 300W | | | | | | | | |
|-------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,10 | 0,05 | 0,03 | 0,10 | 0,18 | 0,09 | 0,04 | 0,06 | 0,37 |
| PORTO | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,09 | 0,18 | 0,07 | 0,03 | 0,05 | 0,23 |
| COIMBRA | 0,08 | 0,05 | 0,05 | 0,09 | 0,17 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,27 |
| LISBOA | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 0,15 | 0,19 | 0,12 | 0,06 | 0,06 | 0,51 |
| ÉVORA | 0,11 | 0,05 | 0,04 | 0,09 | 0,17 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,45 |
| FARO | 0,13 | 0,04 | 0,02 | 0,10 | 0,21 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,56 |

Quadro 8.15: Ângulo de incidência para radiação total inferior a 300W.

| Clima ESP-r | ÂNGULO DE INCIDÊNCIA, θ_{dir} [°], abaixo de 300W | | | | | | | | |
|-------------|--|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 80 | 61 | 22 | 68 | 81 | 67 | 45 | 65 | 76 |
| PORTO | 80 | 61 | 21 | 64 | 80 | 69 | 47 | 64 | 75 |
| COIMBRA | 79 | 60 | 31 | 61 | 80 | 64 | 43 | 66 | 75 |
| LISBOA | 76 | 53 | 36 | 64 | 80 | 66 | 42 | 57 | 68 |
| ÉVORA | 78 | 57 | 27 | 66 | 81 | 67 | 44 | 63 | 76 |
| FARO | 79 | 62 | 24 | 66 | 83 | 70 | 51 | 71 | 78 |

e ao período complementar (acima de 300W inclusive):

Quadro 8.16: Fração de energia direta para radiação total acima de 300W inclusive.

| Clima ESP-r | FRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR DIRETA, a_{dir} [-], acima de 300W | | | | | | | | |
|-------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,67 | 0,76 | 0,79 | 0,74 | 0,64 | 0,75 | 0,79 | 0,78 | 0,76 |
| PORTO | 0,71 | 0,74 | 0,76 | 0,71 | 0,64 | 0,76 | 0,81 | 0,79 | 0,76 |
| COIMBRA | 0,66 | 0,72 | 0,74 | 0,69 | 0,60 | 0,73 | 0,78 | 0,77 | 0,72 |
| LISBOA | 0,87 | 0,83 | 0,84 | 0,77 | 0,63 | 0,87 | 0,92 | 0,92 | 0,75 |
| ÉVORA | 0,41 | 0,73 | 0,77 | 0,71 | 0,61 | 0,73 | 0,78 | 0,75 | 0,73 |
| FARO | 0,71 | 0,78 | 0,81 | 0,75 | 0,65 | 0,78 | 0,83 | 0,81 | 0,81 |

Quadro 8.17: Ângulo de incidência para radiação total superior a 300W.

| Clima ESP-r | ÂNGULO DE INCIDÊNCIA, θ_{dir} [°], acima de 300W | | | | | | | | |
|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 73 | 52 | 38 | 52 | 65 | 52 | 38 | 52 | 43 |
| PORTO | 73 | 53 | 41 | 54 | 66 | 53 | 38 | 52 | 42 |
| COIMBRA | 74 | 54 | 41 | 54 | 66 | 53 | 37 | 52 | 41 |
| LISBOA | 74 | 43 | 31 | 53 | 67 | 50 | 15 | 43 | 42 |
| ÉVORA | 74 | 54 | 39 | 53 | 66 | 52 | 38 | 52 | 42 |
| FARO | 75 | 52 | 39 | 55 | 68 | 54 | 37 | 51 | 40 |

8.7.2 Fatores solares relativos à radiação direta abaixo e acima de 300 W

Seguem-se os valores de fator solar do vidro incolor, respetivos aos ângulos de incidência correspondentes ao período de radiação total inferior a 300 W (quadro 8.15):

Quadro 8.18: Fator solar do vidro incolor correspondente ao ângulo de incidência do quadro 8.15.

| Clima ESP-r | Fator solar [-] do vidro normal ($g_{\perp}=0,727$) relativamente a θ_{dir} obtido abaixo de 300 W | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,259 | 0,595 | 0,723 | 0,506 | 0,228 | 0,514 | 0,690 | 0,550 | 0,352 |
| PORTO | 0,257 | 0,604 | 0,723 | 0,565 | 0,248 | 0,494 | 0,684 | 0,558 | 0,369 |
| COIMBRA | 0,274 | 0,611 | 0,717 | 0,604 | 0,256 | 0,566 | 0,697 | 0,536 | 0,379 |
| LISBOA | 0,341 | 0,662 | 0,710 | 0,555 | 0,261 | 0,529 | 0,698 | 0,638 | 0,507 |
| ÉVORA | 0,292 | 0,633 | 0,720 | 0,538 | 0,241 | 0,519 | 0,693 | 0,575 | 0,347 |
| FARO | 0,272 | 0,592 | 0,721 | 0,538 | 0,171 | 0,485 | 0,670 | 0,462 | 0,311 |

Os ângulos de incidência do período complementar (radiação total acima de 300 W inclusive, ver quadro 8.17) determinarão os valores de fator solar (relativo à radiação direta) para o sombreamento interior e exterior:

Quadro 8.19: Fatores solares do sombreamento interior respetivos aos ângulos de incidência do quadro 8.17.

| Clima ESP-r | Fator solar [-] do somb. interior ($g_{\perp}=0,502$) relativamente a θ_{dir} obtido acima de 300 W | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,299 | 0,465 | 0,491 | 0,463 | 0,391 | 0,464 | 0,491 | 0,464 | 0,484 |
| PORTO | 0,300 | 0,461 | 0,488 | 0,458 | 0,386 | 0,462 | 0,491 | 0,465 | 0,486 |
| COIMBRA | 0,284 | 0,459 | 0,487 | 0,457 | 0,383 | 0,460 | 0,492 | 0,466 | 0,487 |
| LISBOA | 0,294 | 0,483 | 0,498 | 0,460 | 0,377 | 0,470 | 0,504 | 0,484 | 0,485 |
| ÉVORA | 0,288 | 0,460 | 0,490 | 0,462 | 0,386 | 0,464 | 0,491 | 0,463 | 0,485 |
| FARO | 0,279 | 0,465 | 0,490 | 0,456 | 0,370 | 0,458 | 0,492 | 0,467 | 0,489 |

Quadro 8.20: Fatores solares do sombreamento exterior relativos aos ângulos de incidência do quadro 8.17.

| Clima ESP-r | Fator solar [-] do somb. exterior ($g_{\perp}=0,369$) relativamente a θ_{dir} obtido acima de 300W | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,217 | 0,339 | 0,358 | 0,337 | 0,283 | 0,338 | 0,358 | 0,338 | 0,353 |
| PORTO | 0,218 | 0,335 | 0,356 | 0,333 | 0,279 | 0,337 | 0,359 | 0,338 | 0,355 |
| COIMBRA | 0,207 | 0,334 | 0,355 | 0,333 | 0,277 | 0,335 | 0,359 | 0,339 | 0,355 |
| LISBOA | 0,214 | 0,353 | 0,363 | 0,335 | 0,272 | 0,342 | 0,370 | 0,353 | 0,354 |
| ÉVORA | 0,210 | 0,335 | 0,358 | 0,336 | 0,280 | 0,337 | 0,359 | 0,337 | 0,354 |
| FARO | 0,203 | 0,339 | 0,358 | 0,332 | 0,267 | 0,333 | 0,359 | 0,340 | 0,357 |

8.7.3 Fatores solares resultantes

O fator solar resultante (eq. 4.14) obtém-se para cada período (de radiação total inferior a 300 W ou superior a 300 W inclusive) através da ponderação, segundo o respetivo parâmetro a_{dir} (quadro 8.14 ou quadro 8.16), do fator solar correspondente ao ângulo de incidência (quadro 8.18 , quadro 8.19 ou quadro 8.20), com o fator solar da radiação difusa (quadro 8.8):

Quadro 8.21: Fator solar do vidro incolor, obtido segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790, para o período de radiação total inferior a 300W.

| Clima ESP-r | Fator solar resultante [-] para o vidro incolor ($g_{\perp}=0,727$), abaixo de 300 W | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,597 | 0,633 | 0,637 | 0,622 | 0,563 | 0,624 | 0,637 | 0,631 | 0,531 |
| PORTO | 0,603 | 0,633 | 0,638 | 0,629 | 0,566 | 0,625 | 0,637 | 0,631 | 0,574 |
| COIMBRA | 0,607 | 0,634 | 0,639 | 0,632 | 0,570 | 0,629 | 0,638 | 0,630 | 0,567 |
| LISBOA | 0,603 | 0,637 | 0,640 | 0,623 | 0,563 | 0,623 | 0,639 | 0,635 | 0,570 |
| ÉVORA | 0,596 | 0,635 | 0,639 | 0,627 | 0,569 | 0,625 | 0,638 | 0,632 | 0,505 |
| FARO | 0,588 | 0,634 | 0,637 | 0,625 | 0,539 | 0,628 | 0,636 | 0,628 | 0,453 |

Quadro 8.22: Fator solar do sombreamento interior, obtido segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790, para o período de radiação total superior a 300W.

| Clima ESP-r | Fator solar resultante [-] para o sombreamento interior ($g_{\perp}=0,502$), acima de 300 W | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,348 | 0,461 | 0,481 | 0,459 | 0,411 | 0,459 | 0,481 | 0,460 | 0,475 |
| PORTO | 0,342 | 0,457 | 0,477 | 0,454 | 0,408 | 0,458 | 0,482 | 0,461 | 0,476 |
| COIMBRA | 0,340 | 0,455 | 0,476 | 0,454 | 0,408 | 0,456 | 0,482 | 0,461 | 0,476 |
| LISBOA | 0,313 | 0,477 | 0,490 | 0,457 | 0,402 | 0,467 | 0,500 | 0,481 | 0,475 |
| ÉVORA | 0,382 | 0,456 | 0,479 | 0,457 | 0,409 | 0,459 | 0,481 | 0,459 | 0,474 |
| FARO | 0,327 | 0,461 | 0,482 | 0,454 | 0,397 | 0,455 | 0,484 | 0,463 | 0,481 |

Quadro 8.23: Fator solar do sombreamento exterior, obtido segundo o procedimento pormenorizado da ISO 13790, para o período de radiação total superior a 300W.

| Clima ESP-r | Fator solar resultante [-] para o sombreamento exterior ($g_{\perp}=0,369$), acima de 300 W | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | HOR |
| BRAGANÇA | 0,253 | 0,335 | 0,351 | 0,334 | 0,298 | 0,334 | 0,351 | 0,335 | 0,346 |
| PORTO | 0,248 | 0,332 | 0,348 | 0,331 | 0,296 | 0,334 | 0,352 | 0,335 | 0,347 |
| COIMBRA | 0,247 | 0,331 | 0,347 | 0,330 | 0,296 | 0,332 | 0,351 | 0,336 | 0,347 |
| LISBOA | 0,228 | 0,348 | 0,357 | 0,333 | 0,292 | 0,340 | 0,367 | 0,351 | 0,346 |
| ÉVORA | 0,278 | 0,332 | 0,350 | 0,333 | 0,297 | 0,334 | 0,351 | 0,334 | 0,346 |
| FARO | 0,238 | 0,335 | 0,351 | 0,330 | 0,287 | 0,331 | 0,353 | 0,337 | 0,351 |

8.7.4 Comparação do modelo pormenorizado com o usado pelo RCCTE

Repare-se na comparação do procedimento original do RCCTE com o procedimento pormenorizado especificado, no caso do sombreamento aplicado ser interior:

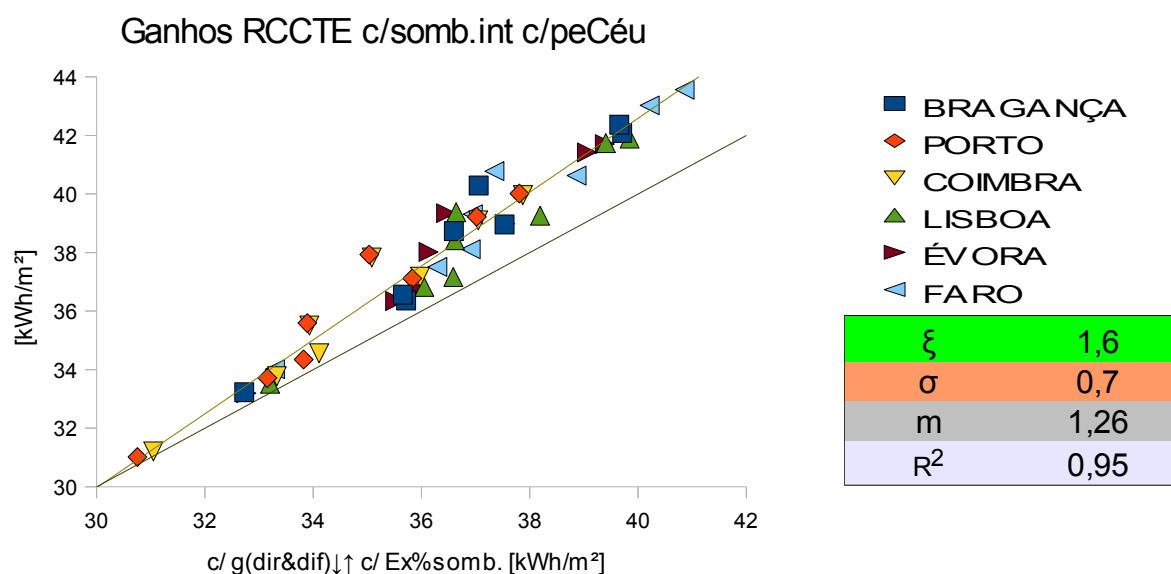


Fig. 8.16: Comparação do procedimento original do RCCTE com o resultante da precisão dos valores de a_{dir} e θ_{dir} abaixo e acima de 300W, para o sombreamento interior.

E exterior:

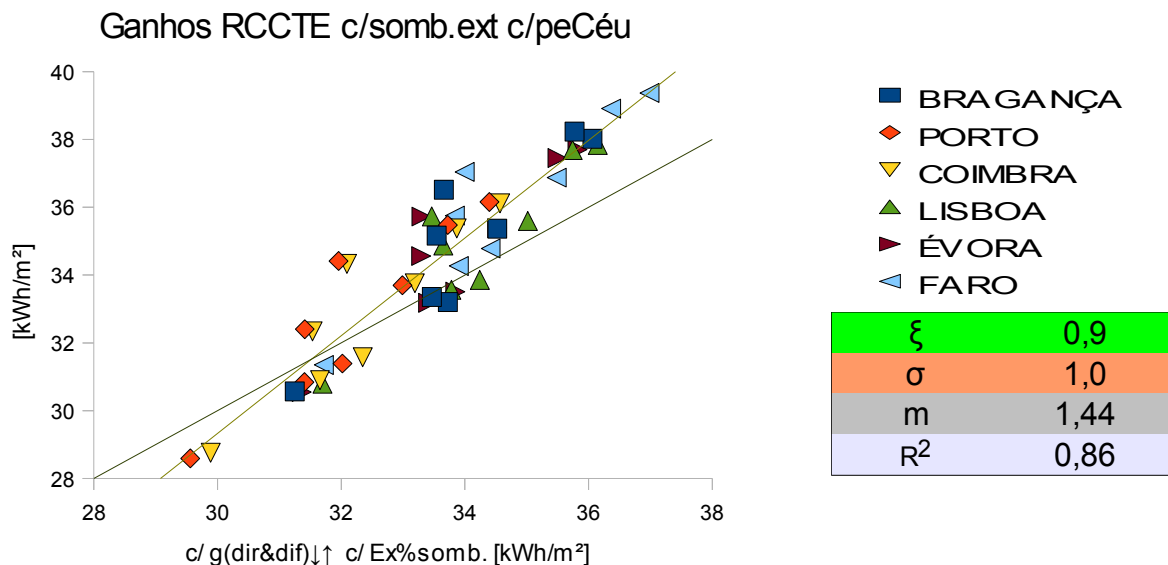


Fig. 8.17: Comparação do procedimento original do RCCTE com o resultante da precisão dos valores de a_{dir} e θ_{dir} abaixo e acima de 300W, para o sombreamento exterior.

8.7.5 Impacto da correção exclusiva da percentagem de sombreamento

Repare-se, finalmente, que corrigir apenas a percentagem de sombreamento (duas figuras seguintes) provoca um erro maior que o verificado na situação original do RCCTE (com a percentagem de 70% para todas as orientações). Temos, no caso de o sombreamento ser interior:

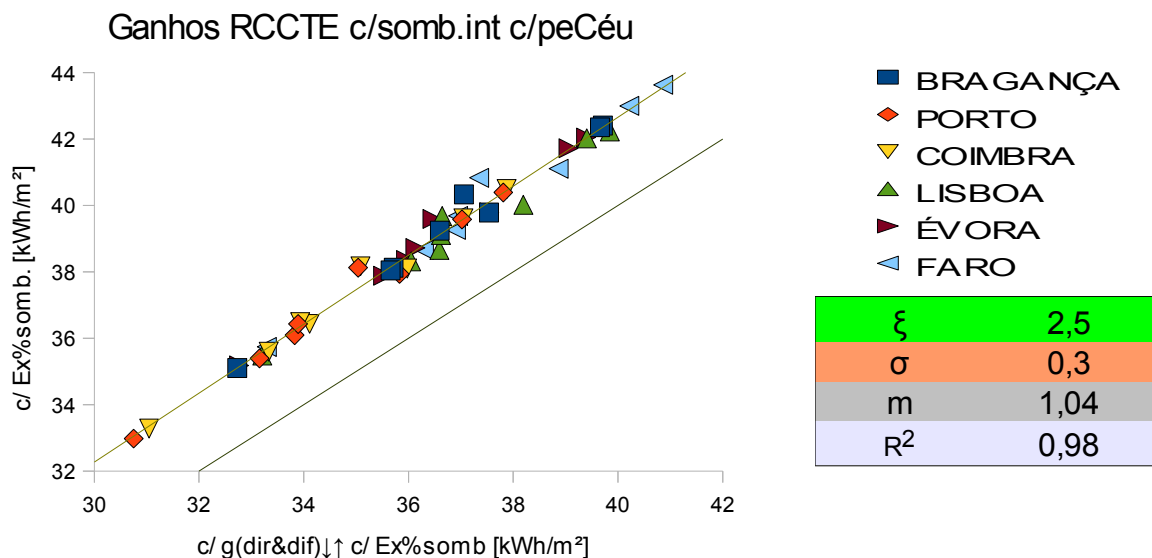


Fig. 8.18: Desfasamento nos ganhos, provocado pela correção exclusiva da percentagem de sombreamento, na situação de sombreamento interior.

E para o sombreamento exterior:

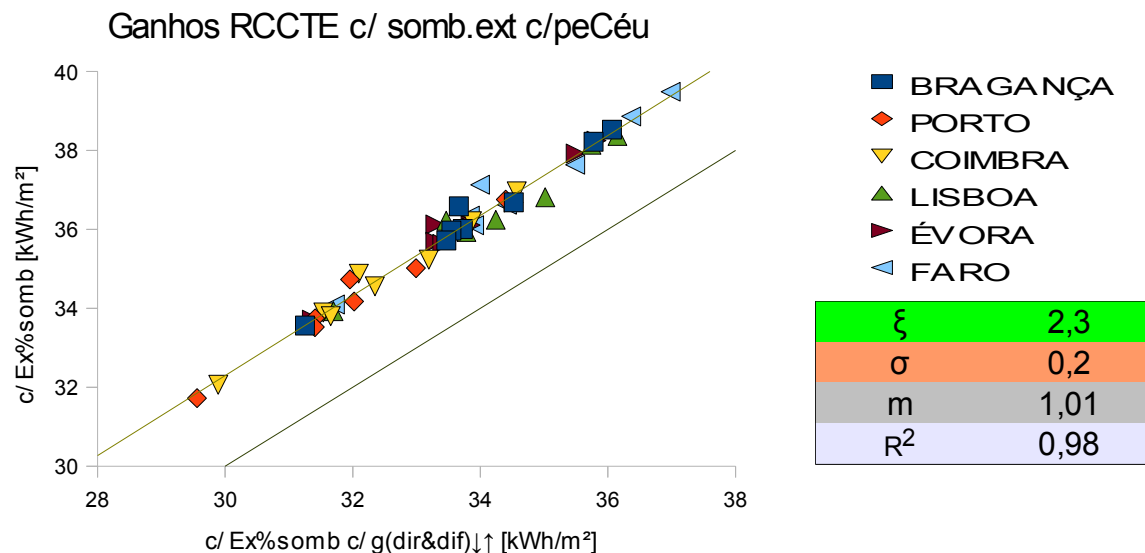


Fig. 8.19: Desfasamento nos ganhos, provocado pela correção exclusiva da percentagem de sombreamento, na situação de sombreamento exterior.

Na realidade, os ganhos solares pelos envidraçados já se encontram sobrestimados pelos fatores de seletividade (F_w) aplicados no método aproximado (eq. 2.9) do RCCTE (como verificam as figs. 8.8 , 8.9 e 8.10), pelo que precisar a percentagem de sombreamento (figs. 8.18 e 8.19) provocará assim um desfasamento maior (2,5 kWh/m² e 2,3 kWh/m²) que o verificado originalmente pelo RCCTE (1,6 e 0,9 kWh/m², figs. 8.16 e 8.17, para o caso de sombreamento interior e exterior, respetivamente).

9. ANÁLISE DAS PERDAS

O desfasamento entre os resultados da folha de cálculo FCV.1a do RCCTE (perdas totais) e os constatados pelas simulações (fig. 7.7) sugere que os primeiros estarão subestimados numa média de 19 kWh/m².

9.1 Verificação do problema chão

O anulamento das trocas de calor pelo solo (no ESP-r) permite-nos deduzir que será esta a origem das perdas não contabilizadas (19 kWh/m²):

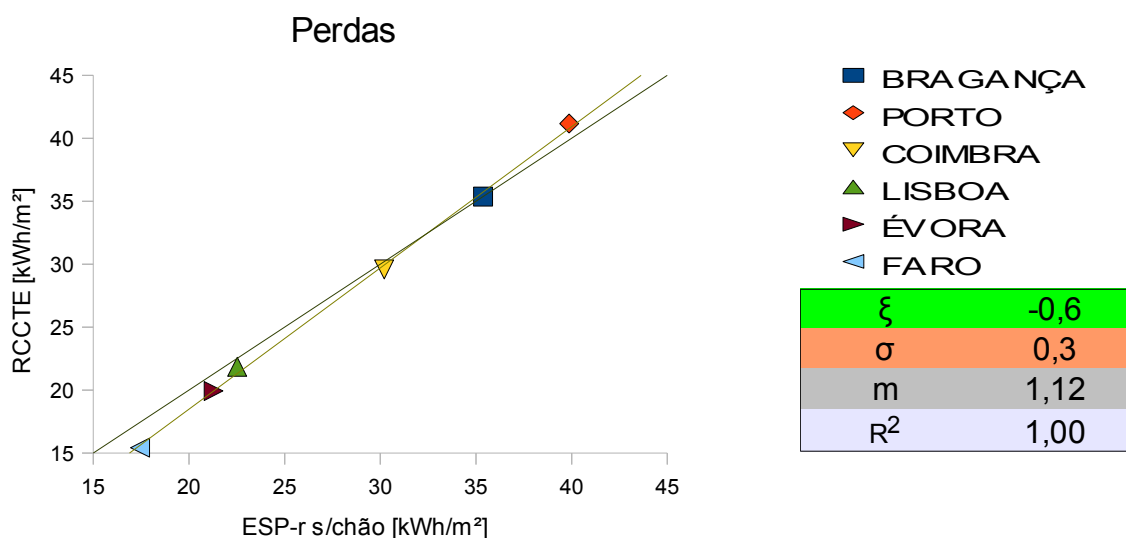


Fig. 9.1: Comparação das perdas calculadas pelo RCCTE com as obtidas pelo ESP-r (sem o fator chão).

9.2 Perdas pela garagem

9.2.1 Valor obtido através do ESP-r

O gráfico seguinte indica as perdas registadas pela garagem através do ESP-r:

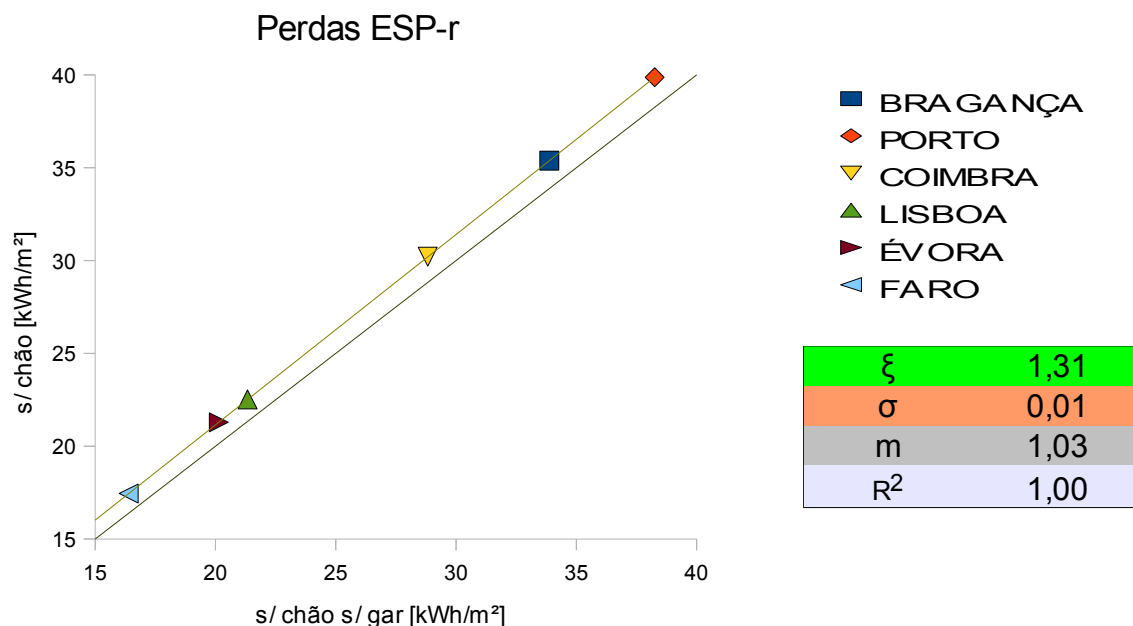


Fig. 9.2: Perdas pela garagem obtidas através do ESP-r.

9.2.2 Perdas pela garagem segundo o método do RCCTE para o inverno

O RCCTE contabiliza as perdas pelos espaços não-úteis apenas na estação de inverno e através do coeficiente τ , que é um indicador da temperatura dos espaços não-úteis,

$$\theta_u = \theta_{atm} + (1 - \tau) (\theta_i - \theta_{atm}) .$$

A contabilização das perdas pelos espaços não úteis é feita segundo a eq. 2.14, acrescentando na referida equação a multiplicação do parâmetro τ ao coeficiente de transferência entre a zona útil e o espaço não útil ($U_j A_j \rightarrow \tau_j U_j A_j$).

Neste caso, de acordo com a tabela IV.1 do RCCTE, $\tau = 0,8$, uma vez que se trata de uma garagem privada com $A_i / A_u = 0,33$ (a razão entre a área da garagem comum à zona útil e a área da garagem que contacta com o exterior é menor que a unidade).

A inclusão das perdas pela garagem em FCV.1a conduz ao seguinte gráfico:

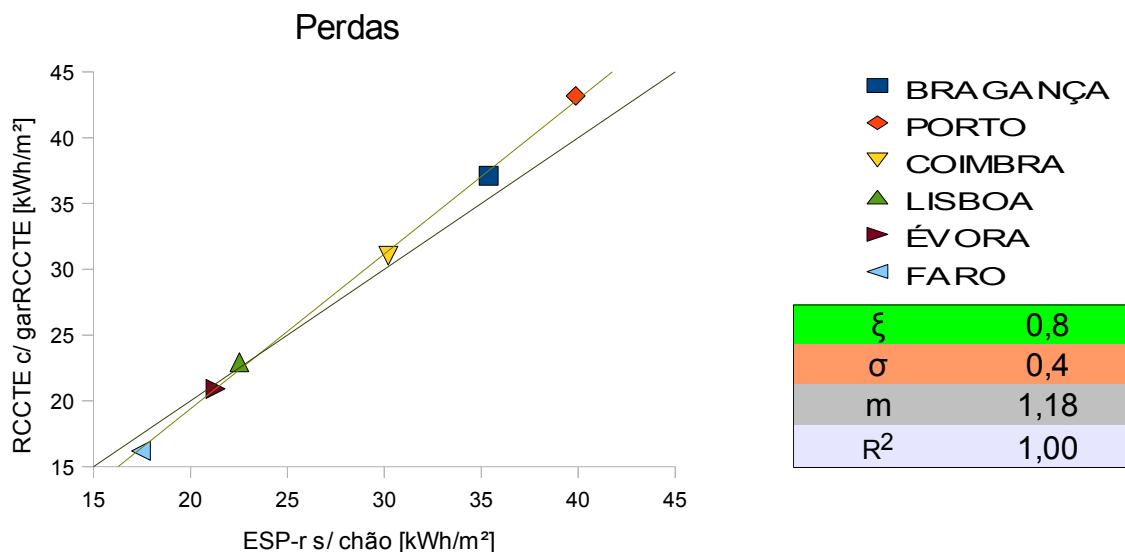


Fig. 9.3: Perdas calculadas com inclusão da garagem segundo o modelo usado pelo RCCTE para o inverno (vs perdas pelo ESP-r).

9.2.3 Perdas pela garagem segundo a ISO 13789

Segundo a norma ISO 13789 $\tau = 0,69$. Neste valor está incluído o coeficiente de transferência de calor por ventilação entre a garagem e o exterior ($H_{V,ue} = 25,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$ correspondente a 0,8 rph), sendo nulo o coeficiente análogo $H_{V,iu}$, entre a garagem e a zona-útil da habitação (nas simulações foi considerada nula a ventilação entre divisões). A correção é no entanto muito ténue:

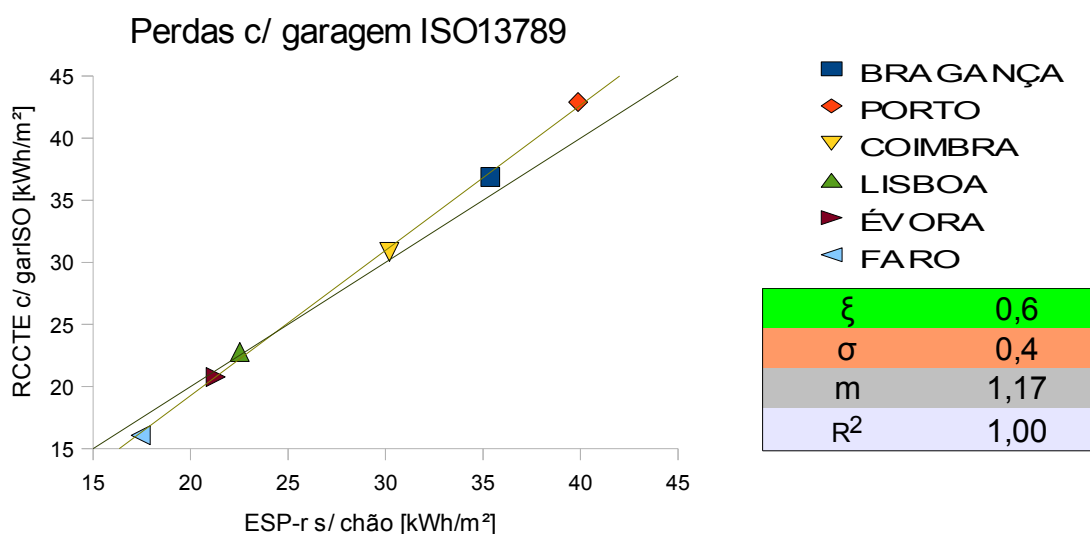


Fig. 9.4: Perdas com inclusão da garagem segundo a ISO 13789 (vs perdas pelo ESP-r).

9.2.4 Variação de τ com ventilação (ISO 13789)

Repare-se ainda que a inclusão de ventilação entre a zona-útil e a garagem, reduziria a diferença entre o valor de τ obtido pela ISO 13789 e o verificado pelo RCCTE:

Quadro 9.1: Variação de τ com a ventilação entre a zona-útil e a garagem (ISO 13789).

| rph [h^{-1}] | $H_{v,ui}$ [$\text{W}/^{\circ}\text{C}$] | τ [-] |
|-------------------------|--|------------|
| 0 | 0,0 | 0,69 |
| 0,4 | 12,6 | 0,71 |
| 0,8 | 25,3 | 0,73 |
| 1,2 | 37,9 | 0,75 |
| 1,6 | 50,5 | 0,77 |
| 2,0 | 63,2 | 0,78 |
| 2,4 | 75,8 | 0,79 |
| 2,6 | 82,1 | 0,80 |
| 3,0 | 94,7 | 0,81 |

Veja-se finalmente a situação (mais concordante com a realidade) de ventilação reduzida entre a garagem e a zona útil (são considerados os casos de 0,4 e 0,8 rph, respetivamente na 1.^a e 2.^a coluna de τ) e de variação da ventilação entre a garagem e o exterior:

Quadro 9.2: Variação de τ com a ventilação entre a garagem e o exterior (ISO 13789).

| rph gar/ext [h^{-1}] | rph gar/ zona-útil [h^{-1}] | | $H_{v,ue}$ [$\text{W}/^{\circ}\text{C}$] |
|---------------------------------|--|------|--|
| | 0,4 | 0,8 | |
| 0 | 0,75 | 0,69 | 0,0 |
| 0,4 | 0,77 | 0,71 | 12,6 |
| 0,8 | 0,79 | 0,73 | 25,3 |
| 1,2 | 0,81 | 0,75 | 37,9 |
| 1,6 | 0,82 | 0,77 | 50,5 |
| 2 | 0,83 | 0,78 | 63,2 |
| 2,4 | 0,84 | 0,79 | 75,8 |
| 2,6 | 0,84 | 0,8 | 82,1 |
| 3 | 0,85 | 0,81 | 94,7 |
| | 12,6 | 25,3 | $H_{v,ui}$ [$\text{W}/^{\circ}\text{C}$] |

9.3 Perdas pelo sótão

9.3.1 Valor obtido pelo ESP-r

O gráfico seguinte estima as perdas registadas pelo sótão através do ESP-r:

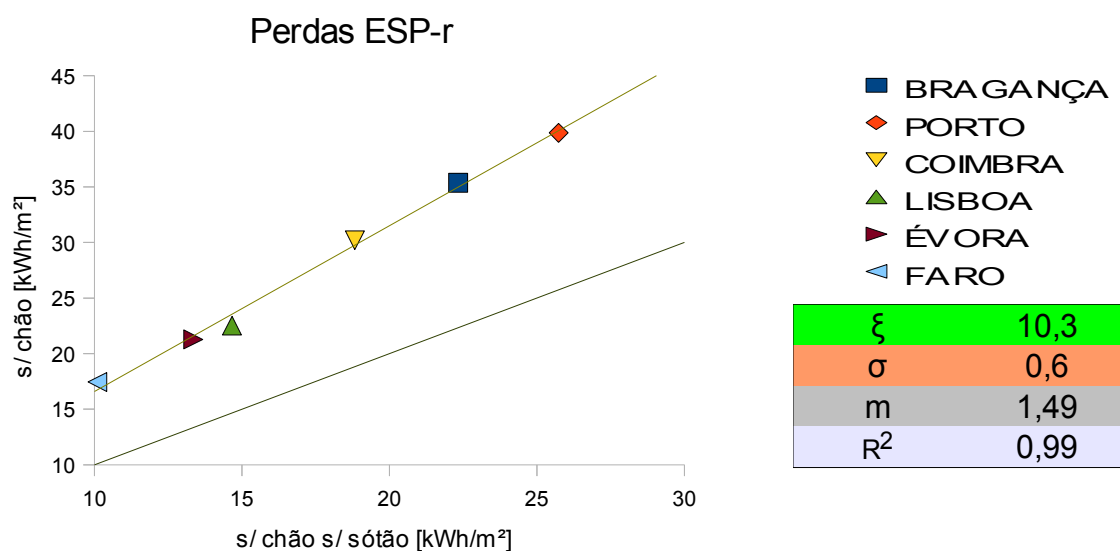


Fig. 9.5: Perdas pelo sótão obtidas através do ESP-r.

9.3.2 Precisão da aproximação do ITE50 para as perdas pelo sótão

Repare-se agora na precisão (muito satisfatória) da aproximação do ITE50 (*Santos 2006*) para o sótão (que é assim considerado equivalente a uma cobertura plana de $0,73 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$). As perdas calculadas deste modo são somadas às perdas verificadas nas simulações com sótão adiabático, sendo comparadas com as simulações com sótão normal (o fator chão é anulado em ambas as simulações):

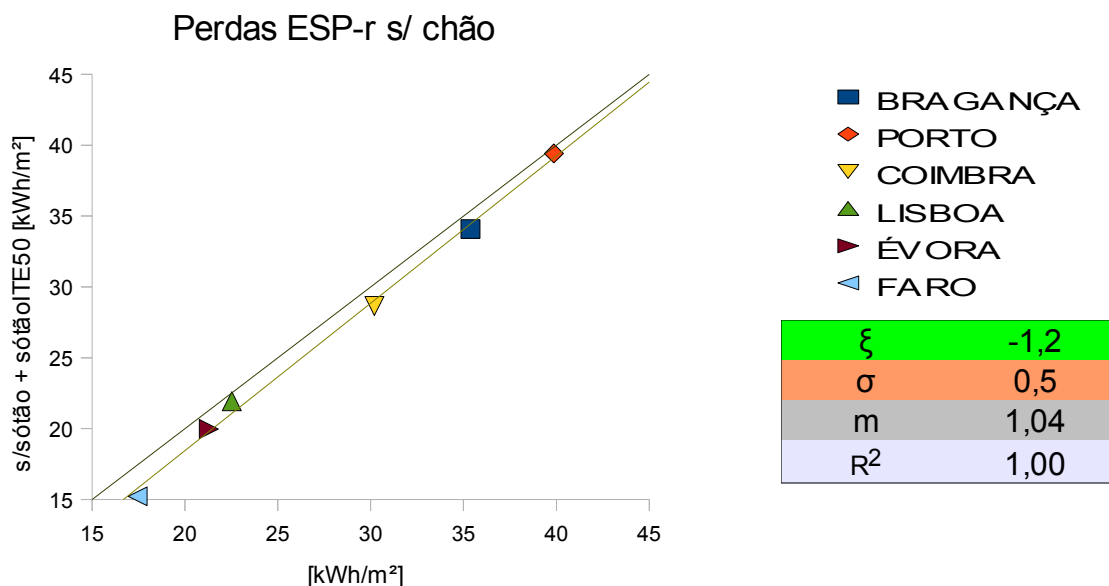


Fig. 9.6: Precisão do modelo do ITE50 para o sótão quanto às perdas.

Verifica-se ainda que é desprezável a variação de perdas, ganhos, N_{vc} e η , resultante do aumento da altura do sótão (quadriplicar a altura do sótão provoca um desfasamento médio de apenas -0,25, -0,27, 0,02 kWh/m² e -0,001, respetivamente, nas perdas, ganhos, N_{vc} e η , ver anexo M) o que comprova a aproximação do ITE50 (que não tem em atenção o pé direito do desvão do telhado).

9.4 Variação das perdas com a diferença de temperatura operativa

Repare-se ainda na dependência das perdas com a diferença de temperatura interior/exterior, $\Delta\theta$, quando são também anuladas as trocas de calor pelos espaços não-úteis (sótão e garagem, que possuem temperaturas diferentes da exterior).

Na situação em que a envolvente da habitação é limitada às superfícies que contactam diretamente com o exterior (linha de baixo, sem chão) as perdas e $\Delta\theta$ têm origem no zero:

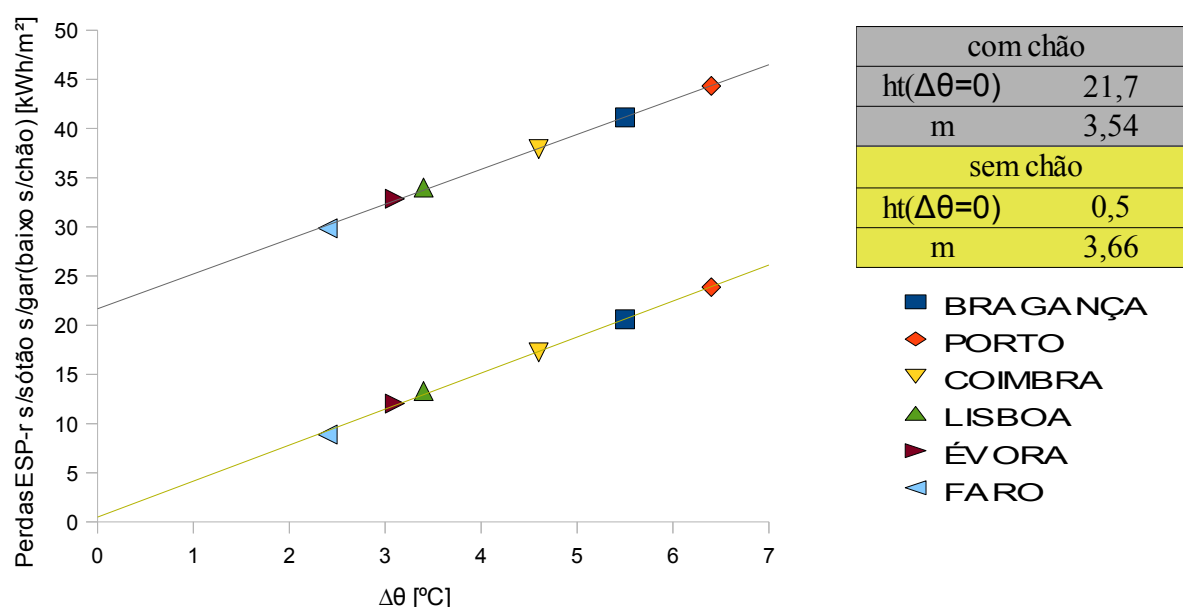


Fig. 9.7: Dependência das perdas com a diferença de temperatura interior/exterior ($\Delta\theta$).

A anulação das trocas de calor pelos espaços não-úteis e pelo chão limita a envolvente da habitação às superfícies (paredes e vidros) que contactam diretamente com o ambiente exterior. Neste caso, as perdas (que dependem da diferença entre a temperatura operativa interior e a exterior) serão nulas (aproximadamente) quando a diferença referida for nula, como se pode verificar pela regressão linear da simulação sem chão.

Recorde-se ainda (cap. 6.3), que nas simulações das perdas o balanço radiativo da envolvente é nulo (caso contrário, devido às perdas radiativas pelo céu, a linha passaria significativamente acima da origem).

9.5 Verificação do problema chão em Nvc

Segue-se, finalmente, a comparação de Nvc calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu, com Nvc obtido no ESP-r considerando nulas as trocas de calor pelo chão:

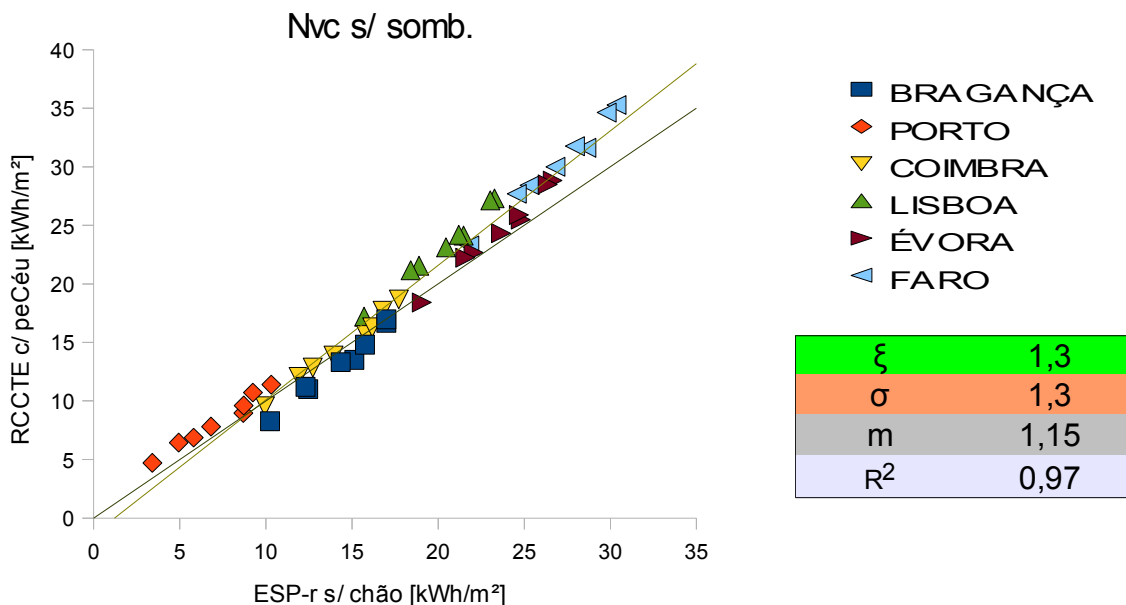


Fig. 9.8: Nvc calculado com perdas radiativas para o céu vs Nvc segundo o ESP-r (sem trocas de calor pelo chão).

Este resultado seria ótimo, no entanto a casa troca efetivamente quantidades importantes de calor com o solo, pelo que foi feito o cálculo das mesmas através dos quatro métodos (anual, sinusoidal, mensal e sazonal) sugeridos pela norma ISO 13370 e também pelo método aplicado pelo RCCTE na estação de inverno.

9.6 Perdas pelo solo segundo a ISO 13370 e método do RCCTE para o inverno

O método mais pormenorizado é o mensal, que aplica variações sinusoidais da temperatura (eq. 4.22). Neste, tal como no método sazonal, são considerados três termos, para melhor traduzir o efeito da grande inércia térmica do chão.

O primeiro termo é a componente estacionária («steady state»), sendo obtido pela multiplicação do respetivo coeficiente (H_g , eq. 4.27) com a diferença de temperatura interior/exterior anual média (isoladamente, este termo constitui o método anual). Os dois últimos termos traduzem a variação anual periódica, sendo o 2.º termo relacionado com a variação interna da temperatura (associado ao termo H_{pi} , eq. 4.30) e o último à variação externa da temperatura (associado a H_{pe} , eq. 4.31).

Os três coeficientes de transferência de calor (H_g , H_{pi} e H_{pe}) foram determinados (59,7, 65,6 e 34,2 W/K respetivamente):

Quadro 9.3: Coeficientes de transferência de calor pelo solo (H_g , H_{pi} e H_{pe}).

| | | | | | |
|----------|-------|-------------------------|-------------|-------|-----------------------|
| A_f | 163,3 | [m ²] | w | 0,390 | [m] |
| P_f | 55,6 | [m] | λ_g | 1,28 | [W/(m·K)] |
| B' | 5,87 | [m] | R_{si} | 0,17 | [m ² ·K/W] |
| dt | 1,19 | [m] | R_f | 0,41 | [m ² ·K/W] |
| U_{fg} | 0,37 | [W/(m ² ·K)] | R_{se} | 0,04 | [m ² ·K/W] |
| δ | 3,16 | [m] | ρ | 1460 | [kg/m ³] |
| | | | c | 879 | [J/(kg·K)] |

| | | |
|----------|------|-------|
| H_g | 59,7 | (W/K) |
| H_{pi} | 65,6 | (W/K) |
| H_{pe} | 34,2 | (W/K) |

De notar que apenas a camada «terra» (ver secção *Pavimento* do anexo I) não é incluída em R_f , sendo a de cascalho contabilizada dada a sua condutibilidade térmica, 0,52 W/(m·K), ser muito diferente da do solo, 1,28 W/(m·K) (contrariando assim o pressuposto do ponto 9.1 da ISO 13370, que assume que os elementos imediatamente por baixo do chão terão uma condutibilidade semelhante à do solo sendo desprezáveis).

Como $dt < B'$, o U_g calculado é o correspondente à opção superior da eq. 4.29.

Dado o controlo a que a habitação foi sujeita nas simulações das perdas ($T_i = 25\text{ °C}$) e de acordo com o último exemplo dado no ponto K.5 da norma ISO 13370 (situação de temperatura interior constante), a temperatura interior anual média considerada é de 25 °C , sendo a exterior a correspondente à média anual da temperatura da localidade em causa.

A aproximação anual produz os seguintes resultados [W, kWh e kWh/m²]:

Quadro 9.4: Potência anual e energia transferida para o solo durante o verão, segundo a aproximação anual da norma ISO 13370.

| Aprox.Anual | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO | unidades |
|---------------|----------|-------|---------|--------|-------|------|-----------------------|
| $T_{an,méd.}$ | 12,4 | 14,3 | 15,3 | 16,3 | 15,8 | 17,7 | [°C] |
| Potência | 755 | 639 | 578 | 520 | 551 | 434 | [W] |
| En.Verão | 2210 | 1871 | 1693 | 1523 | 1614 | 1271 | [kWh] |
| En.Verão | 13,5 | 11,5 | 10,4 | 9,3 | 9,9 | 7,8 | [kWh/m ²] |

Os outros dois termos (relativos a H_{pi} e H_{pe}) traduzem a variação sinusoidal da potência de perdas em torno deste valor pelo que, caso o objetivo fosse o cálculo anual de perdas pelo solo, qualquer um dos três métodos produziria exatamente o mesmo resultado que este.

Segue-se o cálculo mensal sinusoidal pormenorizado (eq. 4.22). Como não existe variação da temperatura interior nas simulações das perdas ($T_i = 25\text{ °C}$) o termo relativo a H_{pi} (amplitude da variação mensal da temperatura interna) é nulo. Considerando que a amplitude das variações de temperatura externa é metade da diferença entre a máxima e a mínima temperatura anual (ponto 6.2 da ISO 13370) e que o mês mais frio das cidades consideradas é janeiro e o mais quente agosto (excepto em Bragança e Faro – ver quadro E.1 do anexo E) obtemos os seguintes valores para o cálculo mensal sinusoidal pormenorizado:

Quadro 9.5: Perdas pelo solo no verão segundo o modelo sinusoidal da ISO 13370.

| | $\alpha=0,99$ | $\beta=1,35$ | | | | | | |
|---------------|---------------|--------------|---------|--------|-------|------|-----------------------|--|
| Apr.Sinus. | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO | unidades | |
| $T_{an,méd.}$ | 12,4 | 14,3 | 15,3 | 16,3 | 15,8 | 17,7 | [°C] | |
| Amplex | 8,7 | 5,0 | 5,8 | 6,0 | 7,1 | 6,1 | [°C] | |
| Pot. junho | 655 | 581 | 512 | 451 | 470 | 364 | [W] | |
| Pot. julho | 528 | 509 | 428 | 364 | 366 | 276 | [W] | |
| Pot. agosto | 462 | 471 | 385 | 318 | 313 | 230 | [W] | |
| Pot. set.º | 475 | 478 | 393 | 327 | 323 | 239 | [W] | |
| En.Verão | 1550 | 1492 | 1257 | 1067 | 1076 | 812 | [kWh] | |
| En.Verão | 9,5 | 9,1 | 7,7 | 6,5 | 6,6 | 5,0 | [kWh/m ²] | |

Quando são conhecidas as temperaturas mensais exteriores (quadro e fig. E.1 do anexo E), a norma ISO 13370 prevê ainda o cálculo das perdas pelo solo assumindo que as diferenças de fase (α e β , eq. 4.23 e eq. 4.24 respetivamente) são nulas (eq. 4.32). Temos nesse caso:

Quadro 9.6: Perdas pelo solo no verão segundo a aproximação mensal da ISO 13370.

| Apr. Mensal | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO | unidades |
|-------------------|----------|-------|---------|--------|-------|------|----------|
| $T_{an,méd.}$ | 12,4 | 14,3 | 15,3 | 16,3 | 15,8 | 17,7 | [°C] |
| $T_{e, junho}$ | 17,6 | 17,8 | 19 | 20,1 | 19,8 | 21,1 | [°C] |
| $T_{e, julho}$ | 21,7 | 19 | 20,8 | 22,4 | 22,7 | 23,9 | [°C] |
| $T_{e, agosto}$ | 21 | 19,4 | 21,1 | 22,6 | 23 | 23,7 | [°C] |
| $T_{e, setembro}$ | 17,5 | 18 | 20,6 | 21,2 | 22 | 21,8 | [°C] |
| Pot. junho | 576 | 519 | 452 | 390 | 413 | 319 | [W] |
| Pot. julho | 436 | 478 | 391 | 311 | 314 | 223 | [W] |
| Pot. agosto | 459 | 465 | 381 | 304 | 304 | 230 | [W] |
| Pot. set.º | 579 | 512 | 398 | 352 | 338 | 295 | [W] |
| En. Verão | 1497 | 1444 | 1186 | 992 | 1001 | 779 | [kWh] |
| En. Verão | 9,2 | 8,8 | 7,3 | 6,1 | 6,1 | 4,8 | [kWh/m²] |

No cálculo sazonal (eq. 4.33) as diferenças de fase entre a transferência de calor e as variações de temperatura (α e β) podem geralmente ser ignoradas, tendo o cálculo sazonal, por base, a média dos termos do cosseno da aproximação mensal (γ , eq. 4.34). Obtêm-se os seguintes valores:

Quadro 9.7: Perdas pelo solo no verão segundo a aproximação sazonal da ISO 13370.

| Apr. Sazonal | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO | unidades |
|---------------|----------|-------|---------|--------|-------|------|----------|
| $\gamma =$ | 0,83 | | | | | | |
| $T_{an,méd.}$ | 12,4 | 14,3 | 15,3 | 16,3 | 15,8 | 17,7 | [°C] |
| Ampl. ext. | 8,7 | 5,0 | 5,8 | 6,0 | 7,1 | 6,1 | [°C] |
| Potência | 1001 | 780 | 741 | 690 | 752 | 605 | [W] |
| En. Verão | 2931 | 2285 | 2169 | 2019 | 2202 | 1771 | [kWh] |
| En. Verão | 18,0 | 14,0 | 13,3 | 12,4 | 13,5 | 10,9 | [kWh/m²] |

O cálculo das perdas pelo solo é feito pelo RCCTE (para o período de inverno) recorrendo ao perímetro da área útil da moradia que contacta diretamente com o exterior (49,7 m), que multiplica pela diferença entre a temperatura interior de referência e a temperatura exterior média [°C], pelo fator 2,928 (eq. 2.8) e pelo coeficiente de transmissão térmica linear pelo solo, ψ_{solo} [W/(m·°C)]

($Q_{soloRCCTE} = 2,928 P_{\text{útil}} (T_i - T_e) \Psi_{\text{solo}}$, eq. 9.1). Este coeficiente depende da diferença de nível entre a face superior do pavimento e a cota do terreno exterior e da eventual existência de isolante térmico (camada com condutibilidade térmica inferior a 0,065 W/(m·°C) e espessura tal que conduza a uma resistência térmica superior a 0,30 m²·°C/W).

A moradia considerada não possui qualquer isolamento no pavimento, que se encontra à mesma cota que o terreno exterior. Nesta situação, segundo a tabela IV 2.1 do decreto-lei 80/2006 (RCCTE), $\psi_{\text{solo}} = 1,50$ W/(m·°C) , pelo que se obtém:

Quadro 9.8: Perdas pelo solo, calculadas segundo o modelo aplicado pelo RCCTE no inverno.

| Cidades | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO | unidades |
|---------------------------|----------|-------|---------|--------|-------|------|-----------------------|
| T_e | 19,5 | 18,6 | 20,4 | 21,6 | 21,9 | 22,6 | [°C] |
| $\Delta\theta$ | 5,5 | 6,4 | 4,6 | 3,4 | 3,1 | 2,4 | [°C] |
| | 1200 | 1396 | 1004 | 742 | 676 | 524 | [kWh] |
| $\Psi_{\text{inv.rccte}}$ | 7,4 | 8,6 | 6,1 | 4,5 | 4,1 | 3,2 | [kWh/m ²] |

9.6.1 Inclusão das perdas pelo solo em FCV.1a

Na tabela seguinte estão sistematizadas todas as perdas pelo solo atrás determinadas, incluídas na FCV.1a do RCCTE (por m²):

Quadro 9.9: Perdas (FCV.1a) com o fator solo segundo a norma ISO 13370 e segundo o procedimento usado pelo RCCTE para o inverno ($\psi_{\text{inv.rccte}}$). Indicação do desfasamento (ξ), desvio padrão (σ) e declive (m) relativamente às perdas obtidas pelo ESP-r.

| Perdas [kWh/m ²] | ESP-r | FCV.1a | Apr.anual | Apr.sinus. | Apr.mensal | Apr.sazonal | $\Psi_{\text{inv.rccte}}$ |
|------------------------------|-------|--------|-----------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| BRAGANÇA | 53,2 | 35,4 | 48,9 | 44,9 | 44,5 | 53,3 | 42,7 |
| PORTO | 57,5 | 41,2 | 52,6 | 50,3 | 50,0 | 55,2 | 49,7 |
| COIMBRA | 48,3 | 29,6 | 40,0 | 37,3 | 36,8 | 42,9 | 35,7 |
| LISBOA | 40,9 | 21,9 | 31,2 | 28,4 | 27,9 | 34,2 | 26,4 |
| ÉVORA | 39,8 | 19,9 | 29,8 | 26,5 | 26,1 | 33,4 | 24,1 |
| FARO | 36,2 | 15,4 | 23,2 | 20,4 | 20,2 | 26,3 | 18,6 |
| ξ | | -18,8 | -8,4 | -11,3 | -11,7 | -5,1 | -13,1 |
| σ | | 0,4 | 0,9 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,4 |
| m [-] | | 1,18 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,42 |
| R ² [-] | | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 0,98 | 1,00 |

A que corresponde a seguinte representação gráfica:

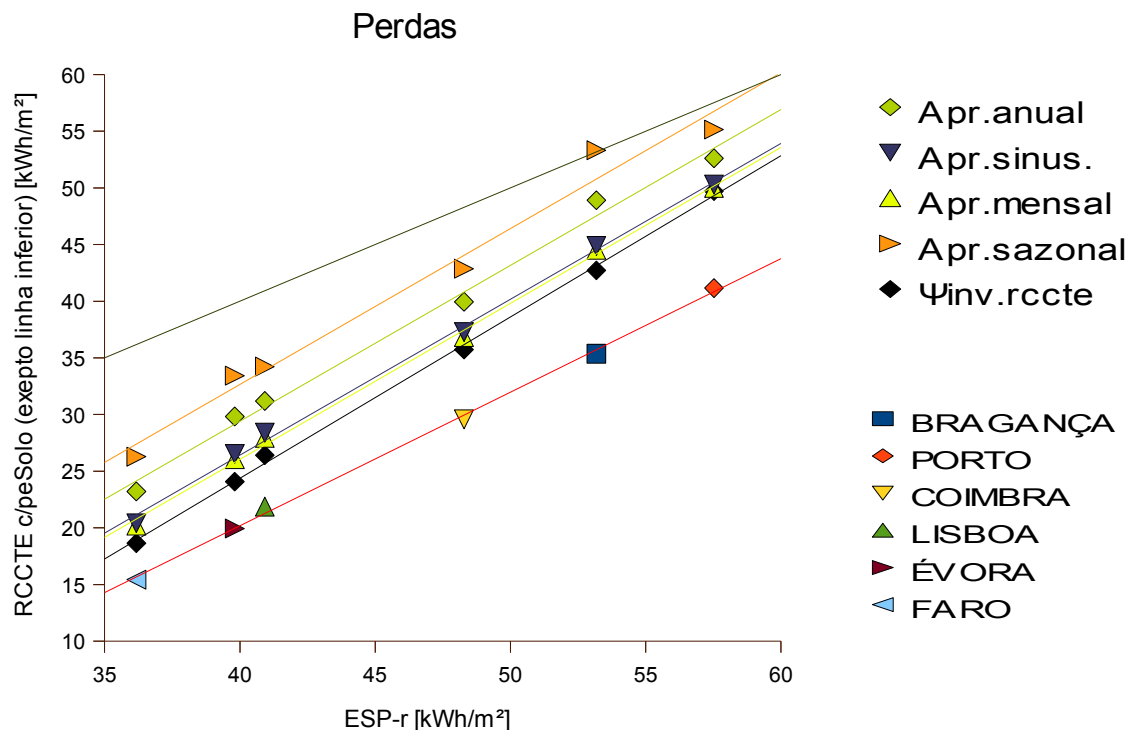


Fig. 9.9: Comparação das perdas totais calculadas (incluindo o fator solo) com as obtidas pelo ESP-r (segundo o procedimento subjacente ao quadro 6.1).

A inclusão das perdas pelo solo em FCV.1a (quaisquer que sejam as aproximações) diminui o desfaseamento entre as perdas totais calculadas e as determinadas pelo ESP-r, como constata o quadro (e fig.) 9.9. Todavia, o mesmo quadro (e figura) verifica um aumento do declive dessa comparação ($m_{(FCV.1a \text{ vs } PerdasESP)} = 1,18 \rightarrow m_{(FCV.1a+ISO13370) \text{ vs } PerdasESP} = 1,38$, $m_{(FCV.1a+RCCTEinv) \text{ vs } PerdasESP} = 1,42$) o que não é desejável.

9.6.2 Perdas pelo solo segundo o procedimento adotado (medidas pelo ESP-r)

Na realidade, ao considerar a mesma temperatura do solo (quadro 6.1) para todas as localidades, a contribuição do chão será invariante com o clima ($m \approx 1$), contrariando os resultados obtidos no capítulo anterior (fig. 9.9):

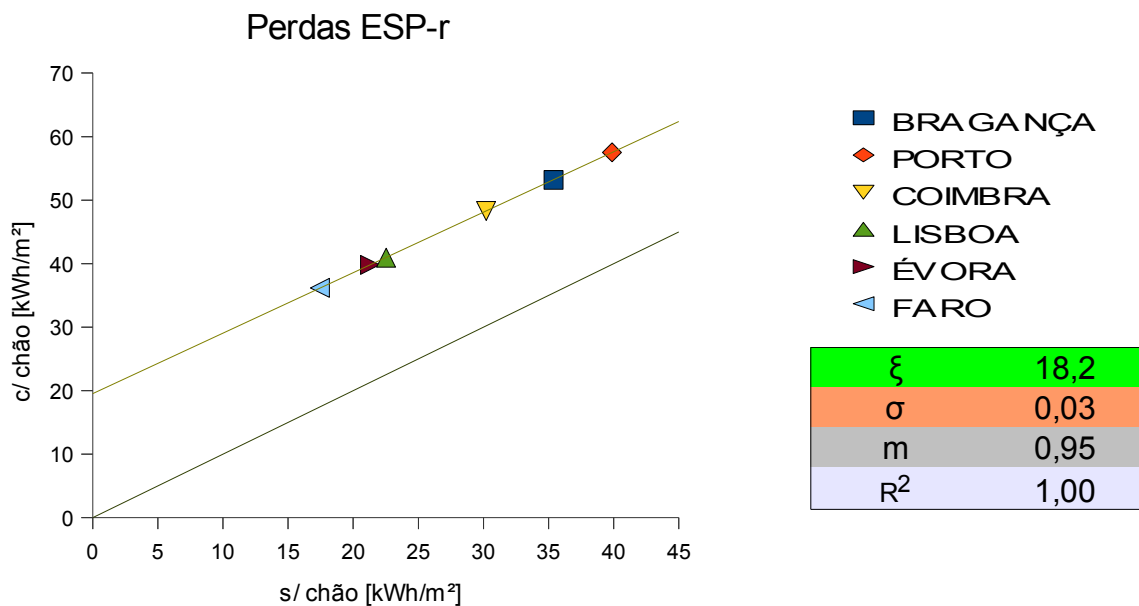


Fig. 9.10: Perdas pelo chão medidas através do ESP-r (segundo o procedimento subjacente ao quadro 6.1).

O cálculo das trocas de calor pelo solo segundo a norma ISO 13370 (e o método do RCCTE para o inverno) observa, assim, que a variação do comportamento térmico deste elemento com o clima existe e não é desprezável (fig. 9.9), pelo que o solo não poderá ser modelado de igual modo independentemente do clima aplicado (ver subcapítulo seguinte).

9.7 Simulação no ESP-r com chão modelado segundo o anexo D da ISO13370

A realidade simulada (ESP-r) difere da realidade proposta pelo modelo de cálculo da ISO 13370 (eq. 4.22, eq. 4.32 , eq. 4.33 , e eq. 4.35 , correspondentes ao anexo A da referida norma) e do RCCTE (método aplicado no inverno, eq. 9.1). O anexo A da ISO 13370 considera a interação com o solo intrinsecamente ligada ao clima em que se encontra, pois depende da diferença de temperaturas entre o interior e exterior da habitação (*idem* no RCCTE) e ainda da amplitude da temperatura anual interna e externa. Por outro lado, nas simulações realizadas anteriormente a contribuição do solo é constante (fig. 9.10), independentemente da variação climática (anexo E). A não dependência (das perdas pelo solo) com o clima deve-se ao facto de se ter considerado as mesmas temperaturas do solo para todas as cidades (foram introduzidas as temperaturas do solo do Solar XXI, medidas a 5 m de profundidade, quadro 6.1).

9.7.1 Pressupostos do anexo D

O anexo D da norma 13370 faz referência à modelação do solo nos programas de simulação dinâmica. Segundo este anexo o chão deve ser modelado como um conjunto de camadas sendo a última constituída por 0,5 m de solo mais uma camada «virtual». Esta camada virtual tem capacidade térmica desprezável (a massa específica e o calor específico são respetivamente 1 kg/m^3 e $1 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$), o mínimo admitido pelo programa ESP-r) e é incluída de maneira a que o fluxo de calor anual pelo solo seja correto. A sua resistência térmica é dada por:

$$R_{virt} = \frac{1}{U_{fg}} - R_{si} - R_f - R_g \quad (\text{eq. 9.2}),$$

R_g [$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$] é a resistência térmica de 0,5 m de solo

Com exceção de R_g , todos os valores foram já apresentados no quadro 9.3. R_g vale $0,39 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ (razão entre a espessura da camada de solo, 0,5 m, e a condutibilidade do solo, $1,28 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), pelo que $R_{virt} = 1,76 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.

A camada virtual deve ter espessura de 0,1 m sendo a sua condutibilidade $0,1 / R_{virt}$ (ou seja, $0,057 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).

Para além da satisfação destes requisitos «construtivos» é necessário introduzir as seguintes temperaturas mensais do solo no programa de simulação dinâmica:

$$\theta_{virt,m} = \theta_{i,m} - \frac{\Phi_m}{A_f U_{fg}} \quad (\text{eq. 9.3}),$$

sendo Φ_m calculado de acordo com o anexo A da ISO 13370 (foi aplicada a eq. 4.32)

9.7.2 Perdas obtidas

Os valores de H_g , H_{pi} e H_{pe} não dependem da espessura da camada de solo considerada no ESP-r (0,5 m em vez dos iniciais 0,25 m, ver capítulo 6.1), pelo que se mantém os resultados de perdas pelo solo calculados pelo anexo A da ISO 13370 (quadro 9.9).

As temperaturas virtuais do solo ($\theta_{virt,m}$) foram calculadas e introduzidas no ESP-r para todos os meses do ano e climas considerados (anexo N), tendo em conta as potências de perdas pelo solo obtidas pela aproximação mensal, Φ_m (quadro 9.6). Repare-se nas temperaturas virtuais relativas aos meses de verão:

Quadro 9.10: Temperaturas virtuais do solo no verão (anexo D da ISO 13370).

| θ_v [°C] | Junho | Julho | Agosto | Setembro |
|-----------------|-------|-------|--------|----------|
| BRAGANÇA | 15,4 | 17,7 | 17,3 | 15,3 |
| PORTO | 16,3 | 17,0 | 17,2 | 16,4 |
| COIMBRA | 17,4 | 18,5 | 18,6 | 18,3 |
| LISBOA | 18,5 | 19,8 | 19,9 | 19,1 |
| ÉVORA | 18,1 | 19,7 | 19,9 | 19,3 |
| FARO | 19,7 | 21,3 | 21,1 | 20,1 |

Obtiveram-se as seguintes perdas totais (ESP-r) ao modelar o chão segundo o anexo D da ISO 13370:

Quadro 9.11: Perdas totais segundo o ESP-r, obtidas considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão.

| Perdas pelo ESP-r segundo o anexo D da ISO13370 [kWh/m ²] | | | | | |
|---|-------|---------|--------|-------|------|
| BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO |
| 41,9 | 46,0 | 35,1 | 26,4 | 25,3 | 20,3 |

9.7.3 Comparação das perdas calculadas com as simuladas

Repare-se no novo objetivo, a comparação das perdas totais calculadas (eq. 2.6) com as obtidas através do ESP-r em condições realísticas de perdas pelo solo (ou seja, modelando o chão no ESP-r segundo os pressupostos do anexo D da ISO 13370, capítulo 9.7.1):

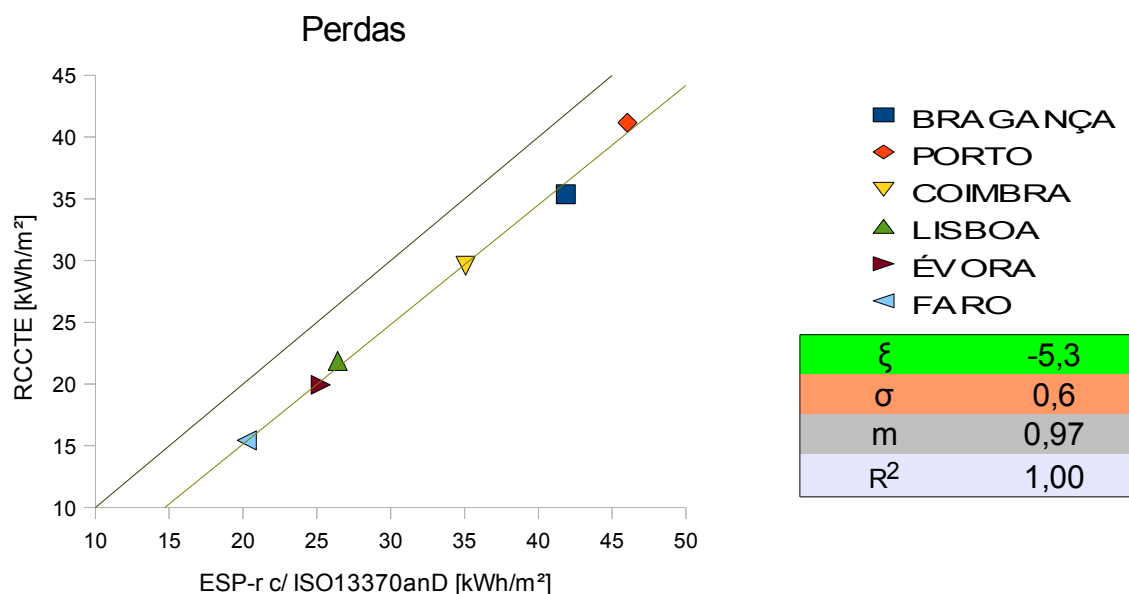


Fig. 9.11: Perdas segundo o RCCTE vs perdas pelo ESP-r (obtidas com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370).

Segue-se a inclusão da aproximação mensal do anexo A da ISO13370 (quadro 9.6) no cálculo das perdas:

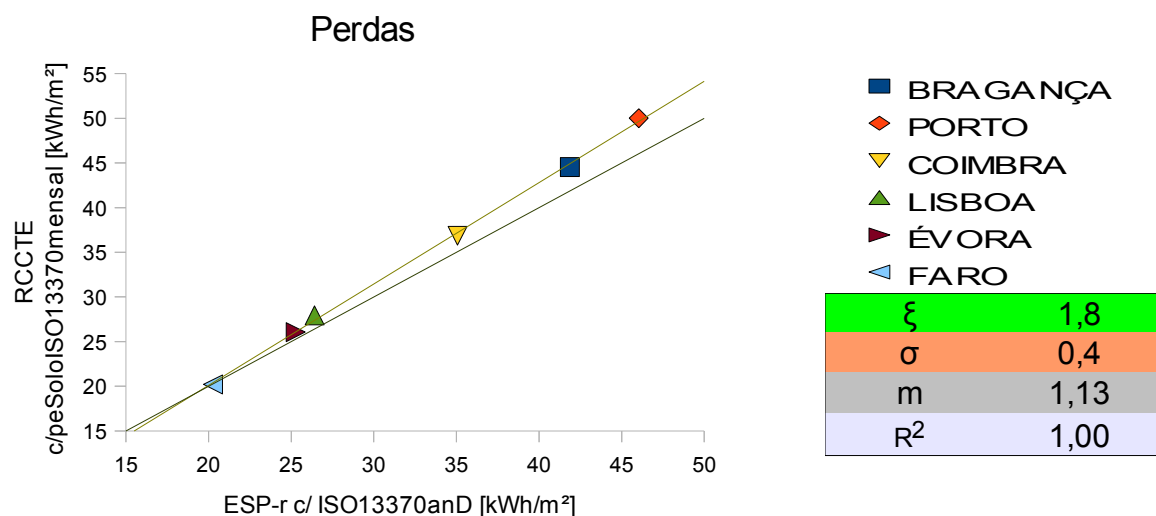


Fig. 9.12: Perdas calculadas com inclusão do solo (segundo a aproximação mensal do anexo A da ISO 13370) vs perdas pelo ESP-r (obtidas com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370).

O desfasamento acima verificado (1,8 kWh/m², fig. 9.12) é menor que o desfasamento resultante da inclusão de qualquer outra aproximação do anexo A da ISO 13370, uma vez que estas produzem resultados superiores aos verificados pela aproximação mensal (fig. 9.9).

Apresenta-se, finalmente, a comparação das perdas calculadas, incluindo as verificadas pelo solo segundo o procedimento do RCCTE para o inverno, com as obtidas pelo ESP-r (modelando o chão conforme o anexo D da ISO 13370). Os resultados obtidos são ainda mais concordantes com o esperado (o desfasamento desce para 0,4 kWh/m², sendo desprezável o aumento de declive verificado relativamente à fig. 9.12, m : 1,13 → 1,17):

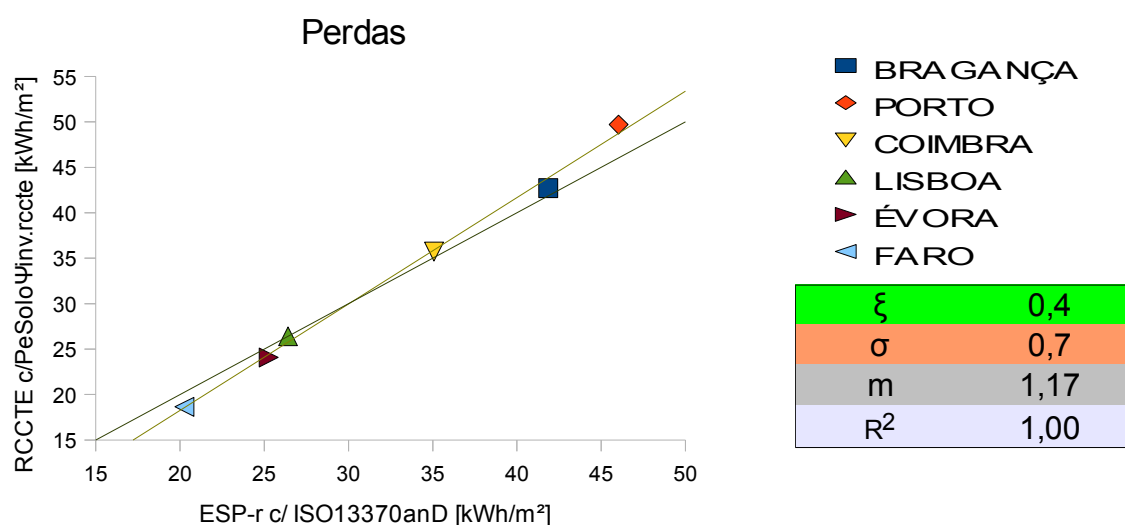


Fig. 9.13: Perdas calculadas com inclusão do solo (segundo o modelo aplicado pelo RCCTE no inverno) vs perdas pelo ESP-r (obtidas com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370).

10. ANÁLISE DO FATOR DE UTILIZAÇÃO

As necessidades de arrefecimento de uma habitação são estimadas pela diferença entre os ganhos e as perdas (repare-se, em 5.1, que o modelo usado pelo RCCTE, eq. 2.1, é algebricamente equivalente ao da norma internacional, eq. 4.1).

A necessidade de aplicação do fator de utilização (dos ganhos, eq. 2.1, ou das perdas, eq. 4.1) resulta do desconhecimento da temperatura interior média real (alínea *a* do ponto I.2.1.3 da ISO 13790).

Esta temperatura é geralmente inferior à temperatura interior de referência, 25°C (anexo F). A aplicação de uma temperatura interior superior à real conduzirá à sobrestimação das perdas (eq. 2.5, RCCTE ou eq. 4.16., ISO 13790) pelo que se torna necessário corrigi-las, através do fator de utilização das perdas, eq. 4.1 (ou dos ganhos, eq. 2.1, para o caso da formulação do RCCTE).

Repare-se ainda que a análise do fator de utilização das perdas, eq. 4.37 (ou dos ganhos, eq. 2.2) consiste na análise do fator a_C (designado *a* pelo RCCTE), uma vez que γ depende apenas da razão entre os ganhos e as perdas (eq. 2.3 ou eq. 4.36), parâmetros já precisados nos capítulos anteriores (cap. 8 e cap. 9 respetivamente).

10.1 Relação entre η_p e γ

O fator de utilização das perdas é função de γ (razão entre os ganhos e as perdas) e do parâmetro a_C (eq. 4.37). Veja-se a relação entre η_p e γ , obtida através dos dados das simulações no ESP-r:

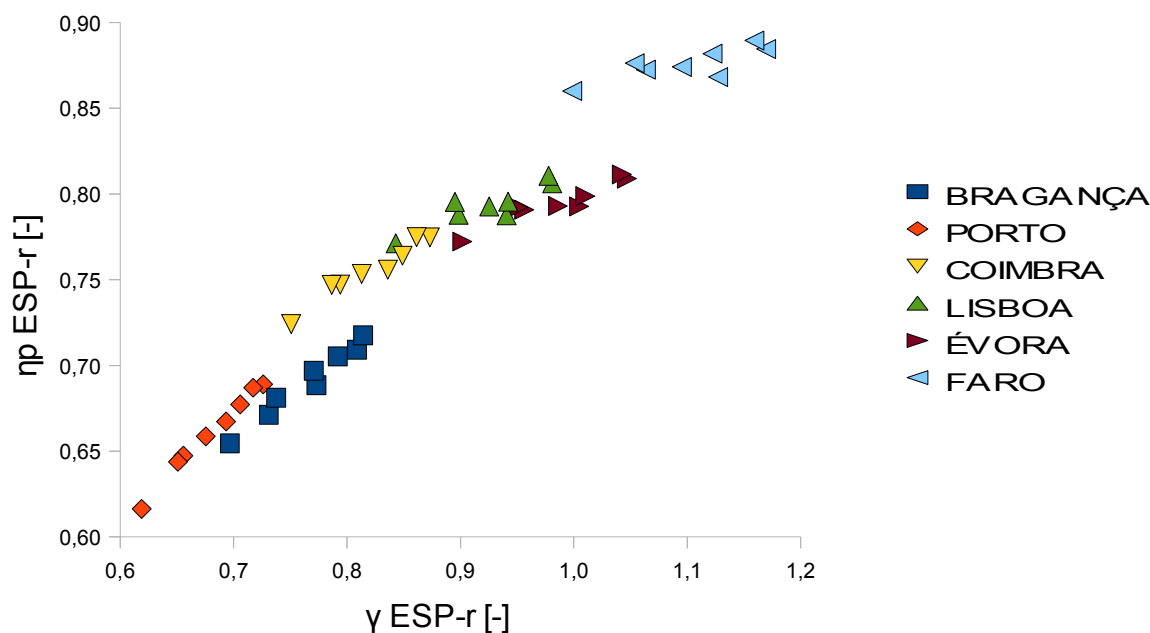


Fig. 10.1: Fator de utilização das perdas, η_p , vs razão entre ganhos e perdas, γ (parâmetros obtidos através dos dados do ESP-r).

10.2 Teste da constante a_c proposta pelo RCCTE

Em relação ao parâmetro a_c (denominado a pelo regulamento português), o RCCTE discrimina, simplifadamente, três valores ($a = 1,8$, $2,6$ e $4,2$), consoante a massa interior útil da habitação, M_{si} , calculada na folha de cálculo «Inércia» ($M_{si} < 150$, $M_{si} < 400$ ou $M_{si} \geq 400$ kg/m² respetivamente). Como a moradia tem 639 Kg/m² (quadro A.7 do anexo A) a inércia correspondente será a forte ($M_{si} \geq 400$ kg/m²) e logo $a = 4,2$.

Aplicando os valores reais de γ e o parâmetro a do RCCTE ($a = 4,2$) no cálculo de η_p (eq. 4.37) obtém-se:

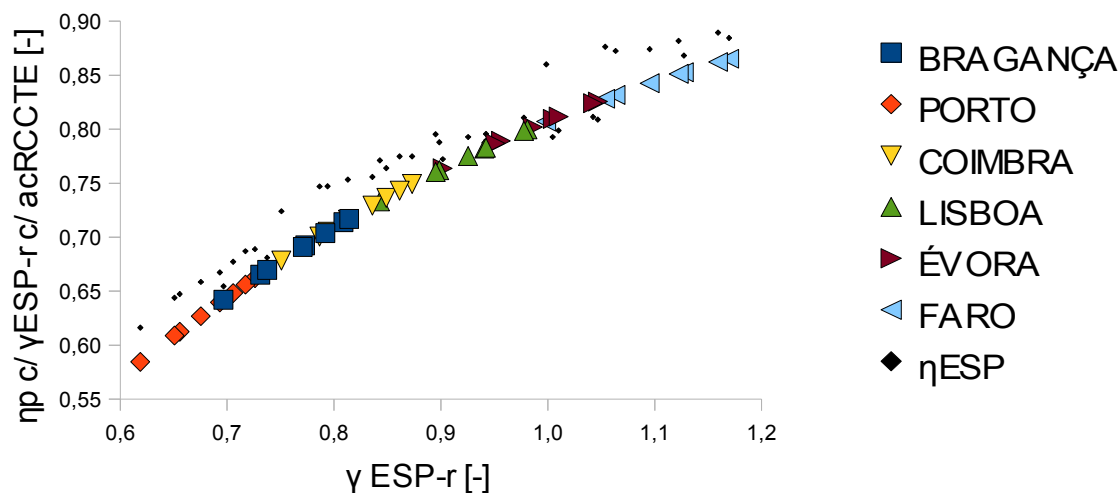


Fig. 10.2: Fator de utilização das perdas (η_p) segundo a ISO 13790 (obtido com γ do ESP-r e a_c do RCCTE, $a_{cRCCTE}=4,2$) vs γ do ESP-r. Os pontos η_{ESP} correspondem aos dados simulados (da fig. 10.1).

Torna-se assim fundamental, na análise de a_c , eliminar os erros no cálculo de γ_p , resultantes da incorreta determinação dos ganhos e perdas:

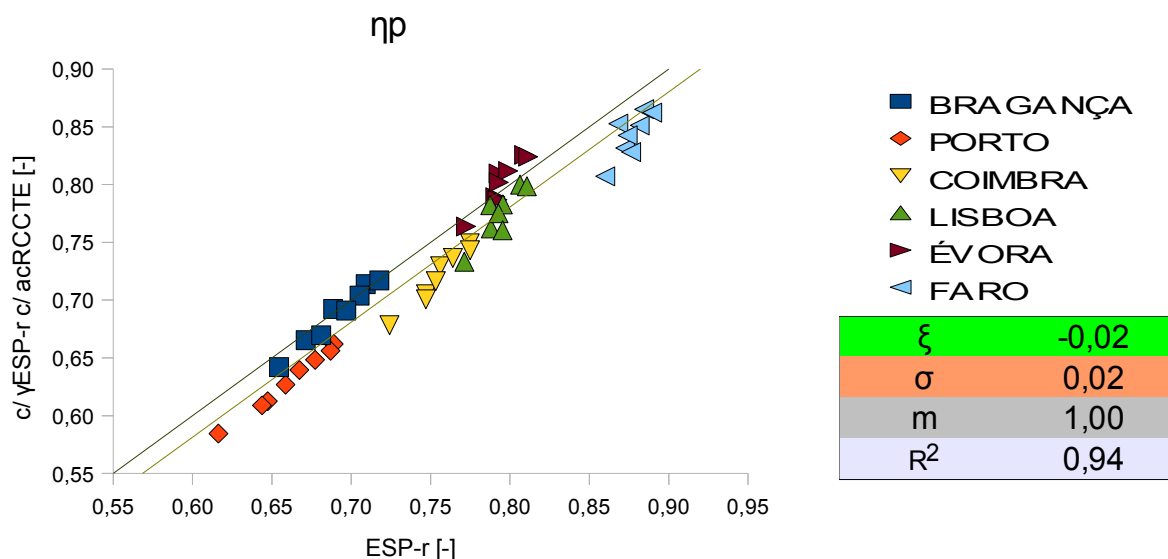


Fig. 10.3: Fator de utilização das perdas (η_p) segundo a ISO 13790 (obtido com γ do ESP-r e a_c do RCCTE, $a_{cRCCTE}=4,2$), comparado com η_p simulado.

A diferença desta análise relativamente à da fig. 7.8 consiste assim na eliminação do erro de cálculo de γ_p (uma vez que foram aqui aplicados os valores de ganhos e perdas obtidos pelo ESP-r).

10.3 Teste da constante a_c proposta pela aproximação sazonal da ISO 13790

Segundo a norma ISO 13790, o cálculo do parâmetro a_c exige o conhecimento da constante de tempo da habitação, τ , e de duas constantes pré-determinadas $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$:

Foi calculada a capacidade calorífica da habitação (C_m) segundo a ISO13786 (eq. 4.40) tendo-se obtido 65379 kJ/K.

Quadro 10.1: Cálculo da capacidade calorífica da habitação, C_m [MJ/K].

| Tperiodo [h] | elementos | κ [kJ/(m ² ·K)] | A [m ²] | $\kappa \cdot A$ [kJ/K] |
|---------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|
| 24 | parede ext. | 60,7 | 115,1 | 6986 |
| 24 | vidros | 10,1 | 19,6 | 198 |
| 24 | porta entrada | 14,5 | 1,9 | 27 |
| 24 | lage sótão | 97,8 | 163,3 | 15963 |
| 8760 | pavimento | 228,5 | 163,3 | 37297 |
| 24 | paredes int. | 17,7 | 215,5 | 3808 |
| 24 | portas int. | 5,7 | 26,3 | 149 |
| 24 | parede gar. | 63,6 | 14,3 | 912 |
| 24 | porta gar. | 20,4 | 1,9 | 39 |
| $C_m =$ | | | | 65379 |

Através dos valores de H_{cond} (236 W/K) e H_{ve} (122 W/K) obteve-se (eq. 4.39) $\tau = 50,6$ h.

O valor das constantes $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ deverá ser otimizado para o clima do país em questão (segundo a bibliografia referida na nota 1 do ponto 12.2.1.2 da ISO 13790). Na ausência de valores nacionais pré-definidos a norma ISO 13790 sugere para o método sazonal os valores únicos de $a_{c,0} = 0,8$ e $\tau_{c,0} = 30$ h pelo que, nesse caso, $a_c = 2,47$ (eq. 4.38). O desfasamento de η_p calculado com este valor de a_c (relativamente a η_p obtido pelo ESP-r, eq. 6.4) revela no entanto que estes valores não serão adequados para o clima português:

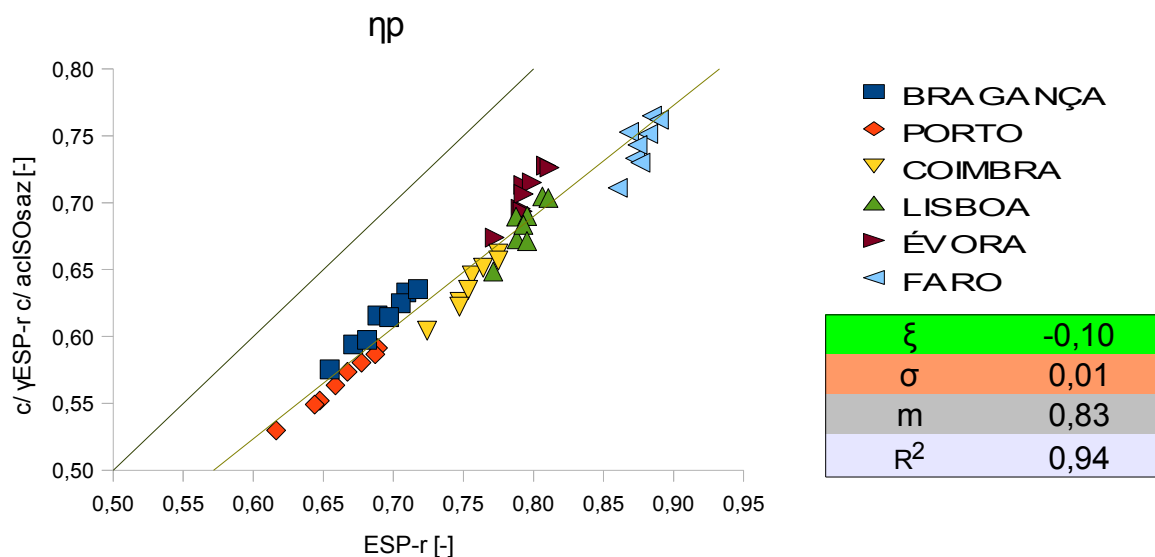


Fig. 10.4: Fator de utilização das perdas (η_p) calculado com γ do ESP-r e a partir dos valores de $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ sugeridos pelo cálculo sazonal da ISO 13790 ($a_c=2,47$) vs η_p simulado.

10.4 Teste da constante a_c proposta pela aproximação mensal da ISO 13790

Verifica-se, para a habitação em causa e climas considerados, que os parâmetros mensais sugeridos no mesmo ponto (12.12 da ISO 13790), $a_{c,0} = 1,0$ e $\tau_{c,0} = 15$ h (ou seja, $a_c = 4,34$) produzem valores mais próximos aos simulados:

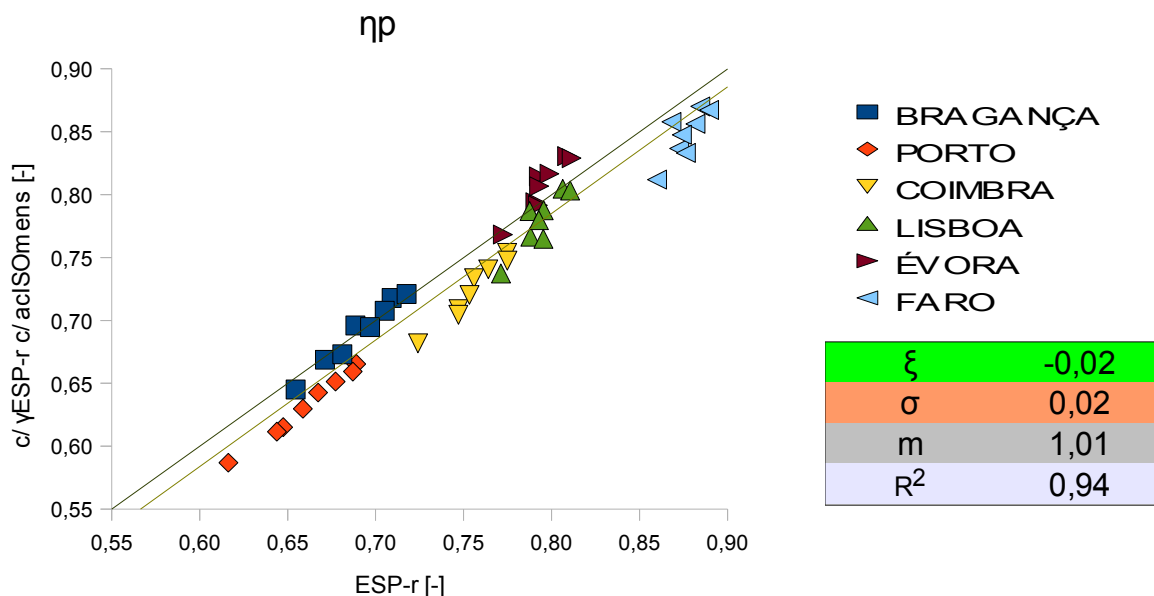


Fig. 10.5: Fator de utilização das perdas (η_p) calculado com γ do ESP-r e a partir dos valores de $a_{c,0}$ e $\tau_{c,0}$ sugeridos pelo cálculo mensal da ISO 13790 ($a_c=4,34$) vs η_p simulado.

10.5 Consideração da situação de erro médio nulo (a_c matematicamente ideal)

Os resultados obtidos pelo RCCTE ($a_c = 4,2$) e pela aproximação mensal da ISO ($a_c = 4,34$) estão muito próximos do resultado ideal (correspondente à situação de desfasamento médio nulo, entre η_p calculado e η_p obtido pelo ESP-r), que neste caso seria $a_c = 4,90$:

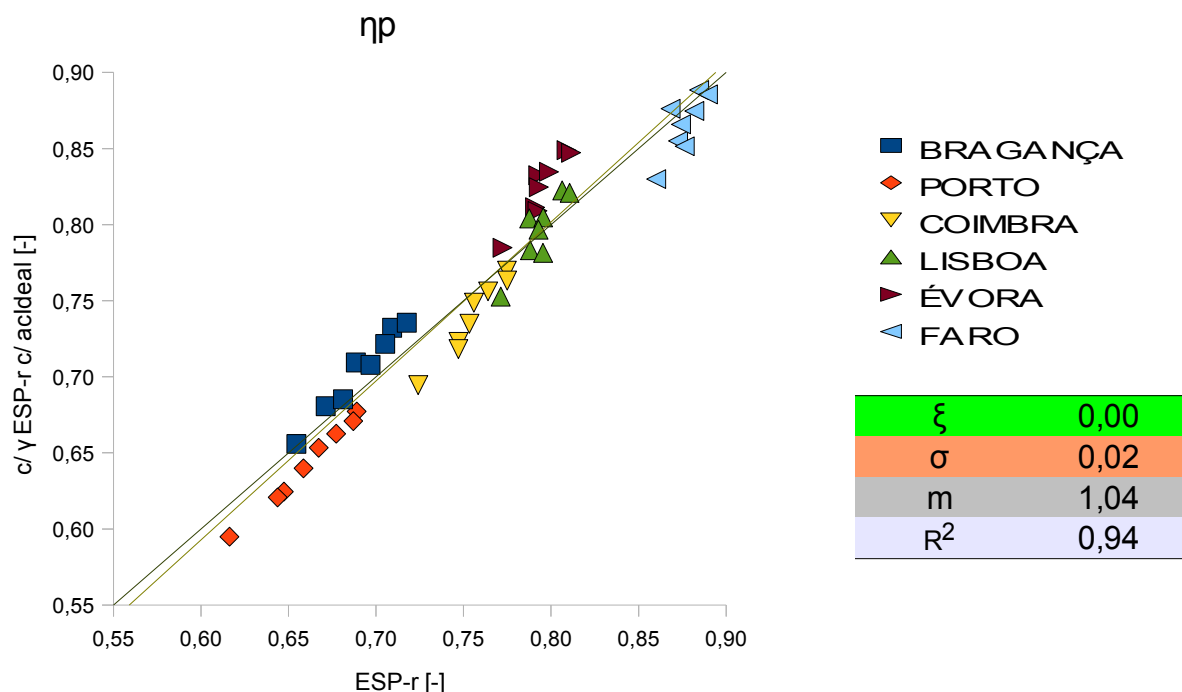


Fig. 10.6: Fator de utilização das perdas (η_p) calculado com a_c ideal ($a_c=4,90$) vs η_p simulado.

Na situação ideal o desvio padrão é pequeno ($\sigma = 0,02$) e m e R^2 assumem valores muito próximos da unidade ($m = 1,04$ e $R^2 = 0,94$ respetivamente) o que comprova que a variedade climática analisada relativamente a η_p pode ser corretamente representada a nível nacional por parâmetros $a_{C,0}$ e $\tau_{C,0}$ únicos.

Veja-se ainda a relação entre η_p e γ_p nessa situação:

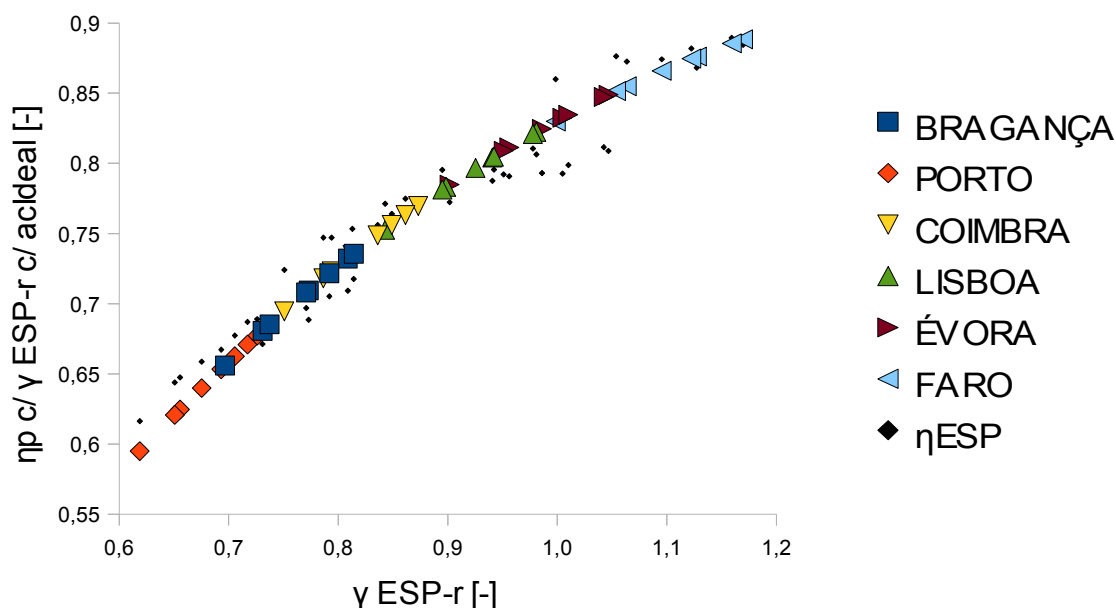


Fig. 10.7: Fator de utilização das perdas (η_p) com $a_c=4,90$ (situação de desfaseamento nulo entre η_p calculado e simulado) vs γ . Os pontos η_{ESP} correspondem aos dados simulados (da fig. 10.1).

A tabela seguinte sistematiza os dados estatísticos anteriormente apresentados (relativos à comparação dos fatores de utilização das perdas calculados com os obtidos através do ESP-r) e apresenta ainda os valores estatísticos obtidos para o caso de serem considerados os pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão (capítulo 9.7.1).

Quadro 10.2: Dados estatísticos relativos à comparação do fator de utilização das perdas calculado (a partir de γ_{ESP} e de a_c) com o verificado pelo ESP-r. A aplicação do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão (no ESP-r) não altera (significativamente) os resultados obtidos (os respetivos gráficos encontram-se no anexo O).

| | ac do: | RCCTE | ISO sazonal | ISO mensal | ideal |
|-----------------------|----------------|-------|-------------|------------|-------|
| CHÃO IGUAL | ξ | -0,02 | -0,10 | -0,02 | 0,00 |
| | σ | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| | m | 1,00 | 0,83 | 1,01 | 1,04 |
| | R ² | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |
| CHÃO ANEXO D ISO13370 | ξ | -0,02 | -0,11 | -0,02 | 0,00 |
| | σ | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| | m | 0,98 | 1,08 | 0,97 | 0,92 |
| | R ² | 0,83 | 0,85 | 0,83 | 0,82 |

11. ANÁLISE DAS CORREÇÕES EM NVC

Neste capítulo, são determinadas as alterações em Nvc decorrentes da inclusão dos fatores analisados anteriormente (perdas radiativas para o céu, perdas pelo solo, perdas pela garagem, cálculo pormenorizado da energia solar pelos envidraçados e aplicação da percentagem correta de sombreamento interior, ou exterior).

11.1 Erro resultante da não-consideração do anexo D em simulações dinâmicas

Começemos no entanto por verificar a divergência nos valores de Nvc obtidos pelo ESP-r, resultante da não consideração dos pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão (não é ainda considerado qualquer tipo de sombreamento):

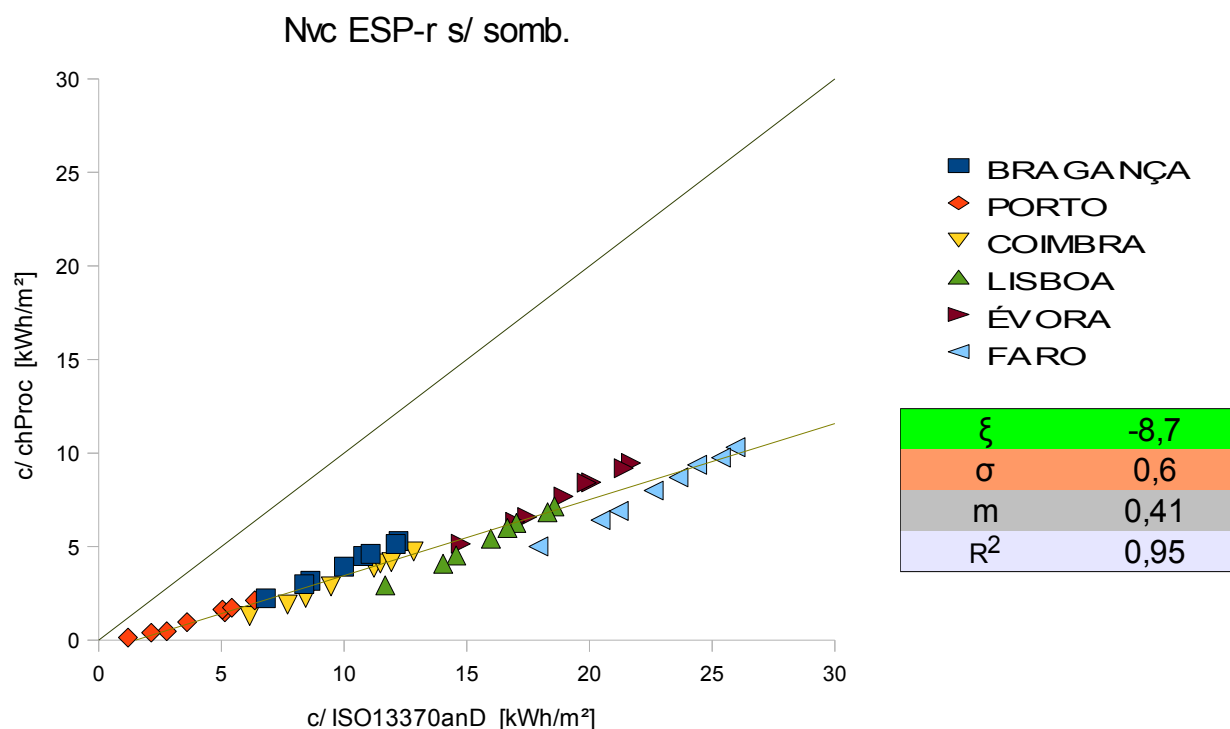


Fig. 11.1: Erro em Nvc simulado (sem sombreamento), resultante da não consideração do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão. É sempre negativo (em média 8,7 kWh/m²), máximo na rot.135° em Faro (15,6 kWh/m²) e mínimo no Porto sem rotação (1,1 kWh/m²).

Apresenta-se agora o problema inicial, considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão, no ESP-r (e sem aplicação de sombreamento):

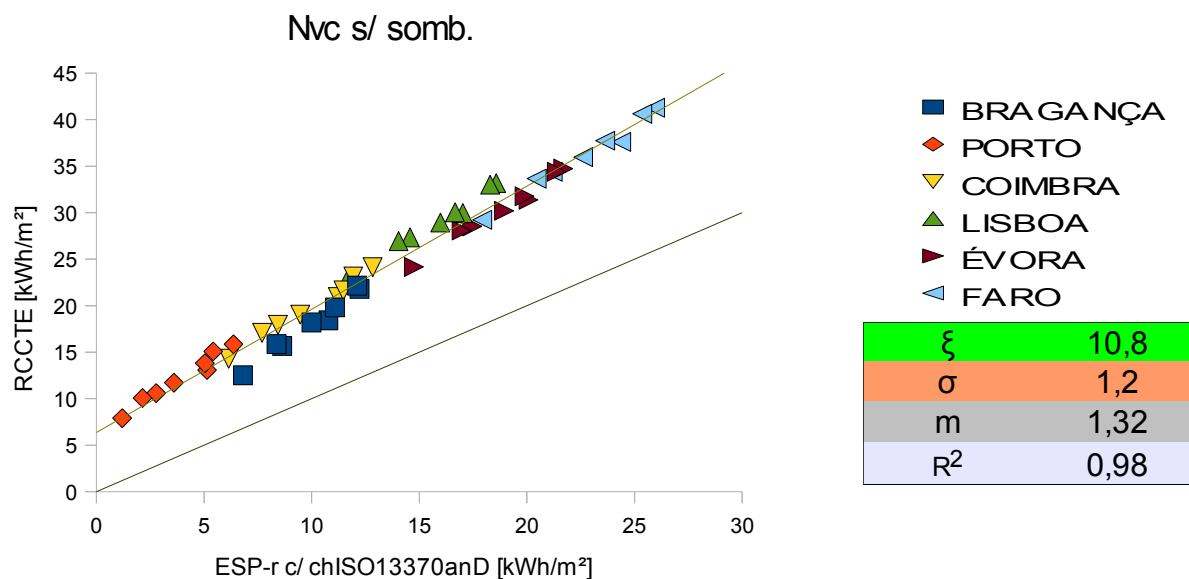


Fig. 11.2: Nvc sem sombreamento obtido pelo RCCTE vs Nvc segundo o ESP-r (com consideração do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão).

11.2 Inclusão das perdas radiativas (ISO 13790) no cálculo de Nvc

A subtração das perdas radiativas aos ganhos conduz ao seguinte gráfico:

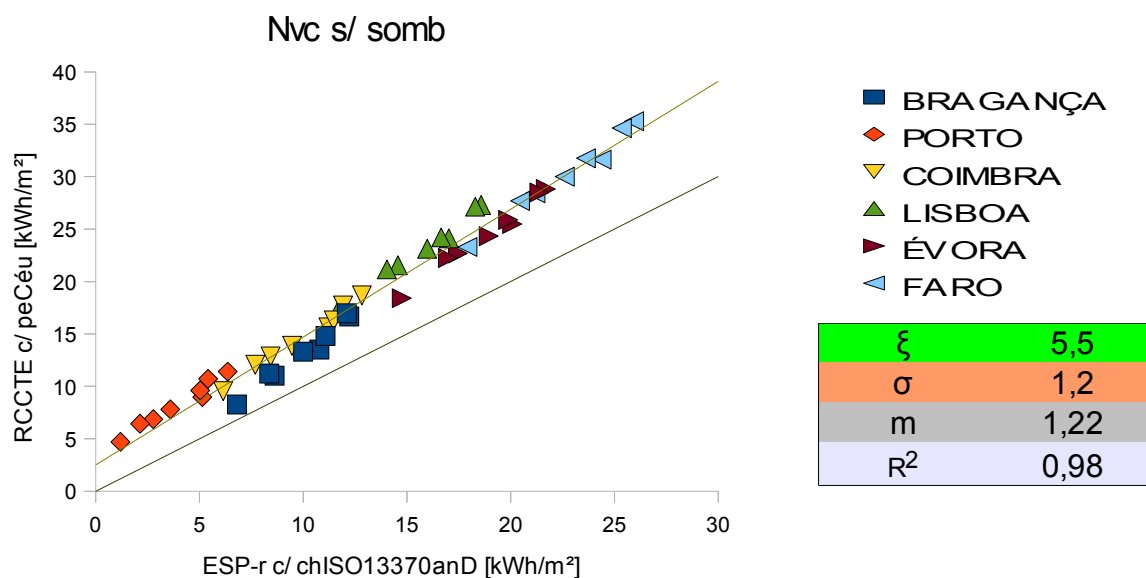


Fig. 11.3: Nvc sem sombreamento, calculado com inclusão das perdas radiativas pelo céu vs Nvc obtido pelo ESP-r, de acordo com o anexo D da ISO 13370.

11.3 Inclusão da energia solar pormenorizada (ISO 13790) em Nvc

Segue-se a inclusão do cálculo pormenorizado da energia solar pelos envidraçados (segundo a ISO 13790, eq. 4.12):

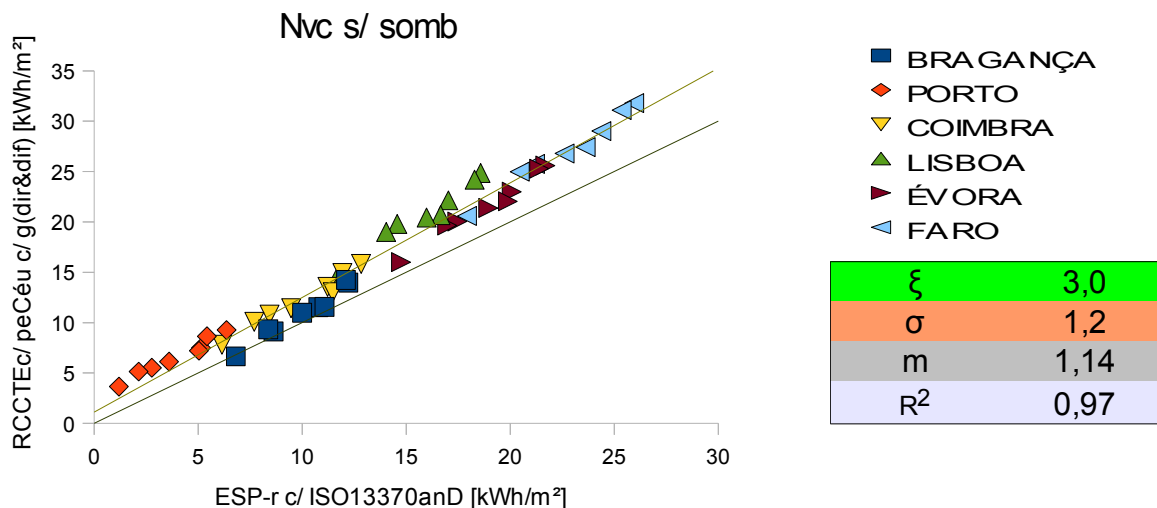


Fig. 11.4: Nvc sem sombreamento, calculado com perdas radiativas para o céu e análise pormenorizada da energia solar vs Nvc obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370).

11.4 Inclusão das perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) em Nvc

Temos, finalmente, a inclusão das perdas pelo solo pelo método aplicado pelo RCCTE (para a estação de inverno):

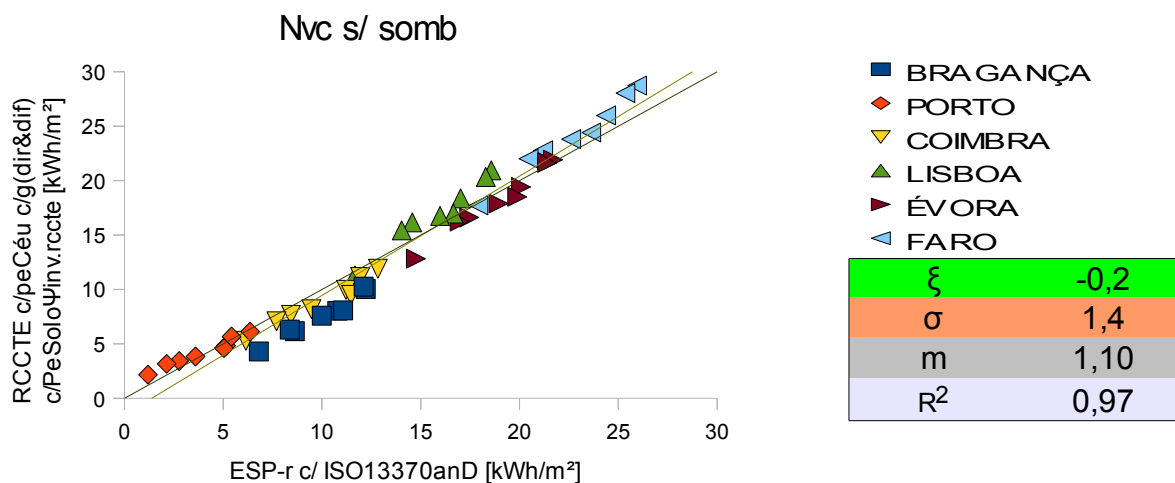


Fig. 11.5: Nvc sem sombreamento, calculado com perdas radiativas para o céu, análise pormenorizada da energia solar (ISO 13790) e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs Nvc obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370).

11.5 Impacto em Nvc das perdas pelo solo e radiativas com o fator sombreamento

Observe-se o resultado do cálculo original do RCCTE, para o caso do sombreamento ser interior,

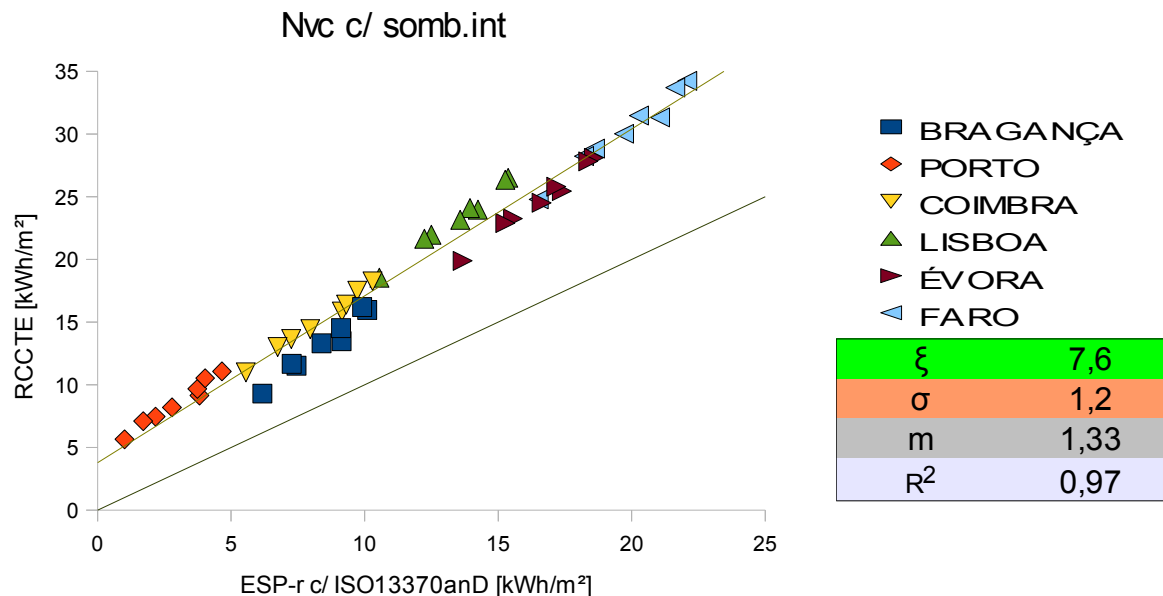


Fig. 11.6: Comparação de Nvc calculado pelo RCCTE (sujeito a sombreamento interior) com Nvc obtido pelo ESP-r, de acordo com o anexo D da ISO 13370.

e exterior:

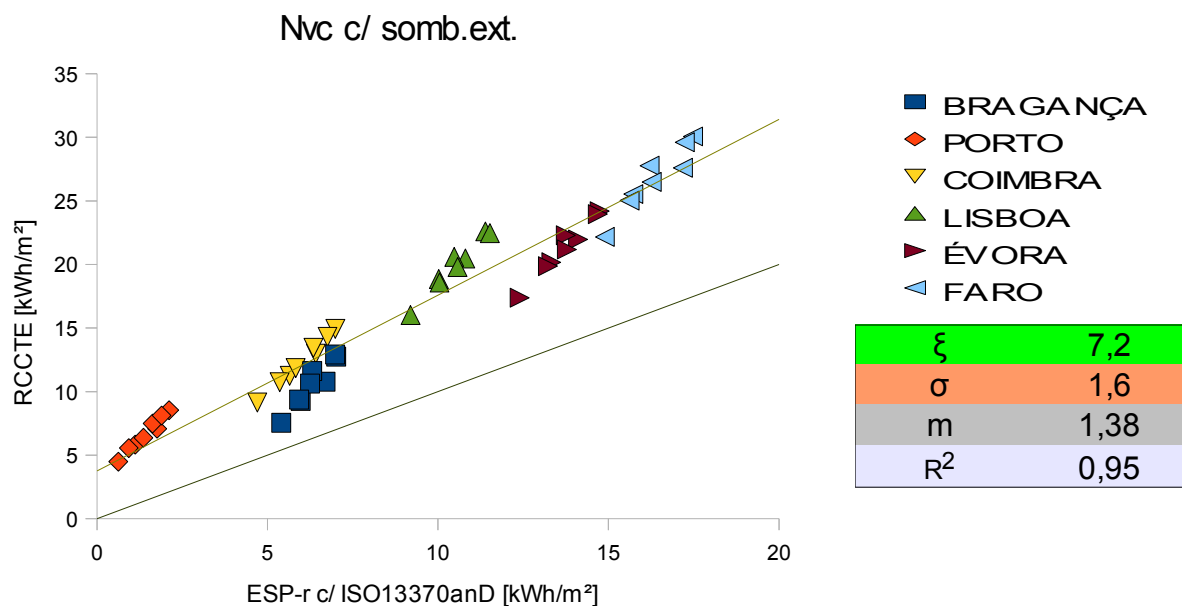


Fig. 11.7: Comparação de Nvc calculado pelo RCCTE (sujeito a sombreamento exterior) com Nvc obtido pelo ESP-r, de acordo com o anexo D da ISO 13370.

Repare-se agora na melhoria verificada pela inclusão das perdas radiativas para o céu segundo a ISO 13790 (eq. 4.13) e das perdas pelo solo segundo o procedimento do RCCTE (eq. 9.1), para o caso do sombreamento ser interior:

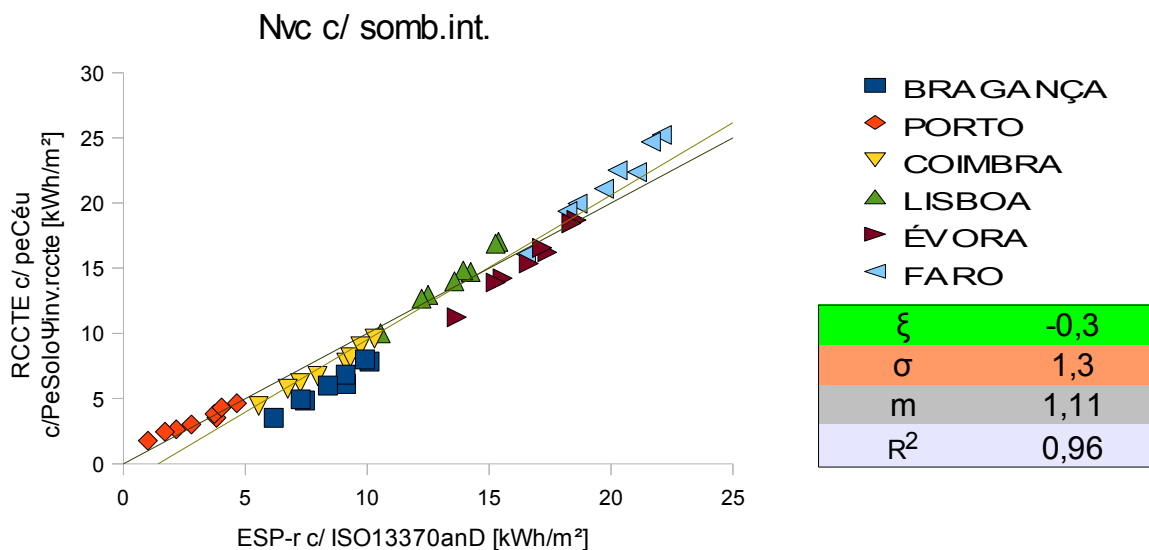


Fig. 11.8: Nvc sujeito a sombreamento interior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu (ISO13790) e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs Nvc obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370).

E exterior:

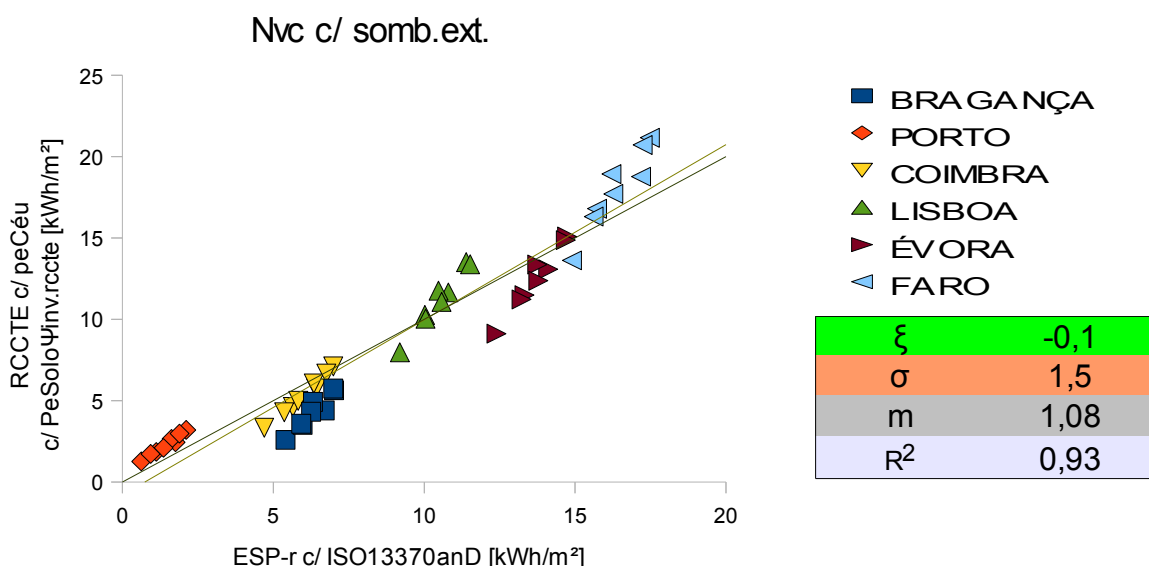


Fig. 11.9: Nvc sujeito a sombreamento exterior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu (ISO 13790) e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs Nvc obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370).

11.6 Energia solar pelos envidraçados pormenorizada em Nvc (com sombreamento)

Segue-se a inclusão, no cálculo de Nvc, da percentagem de sombreamento exata, aplicando também os valores exatos do fator solar, obtidos através dos parâmetros a_{dir} e θ_{dir} respetivos ao período em que a radiação total incidente é inferior a 300 W e ao período complementar (capítulo 8.7).

A alteração é muito tímida (o declive aproxima-se da unidade e a média de Nvc baixa ligeiramente).

Temos assim, para o caso do sombreamento ser interior:

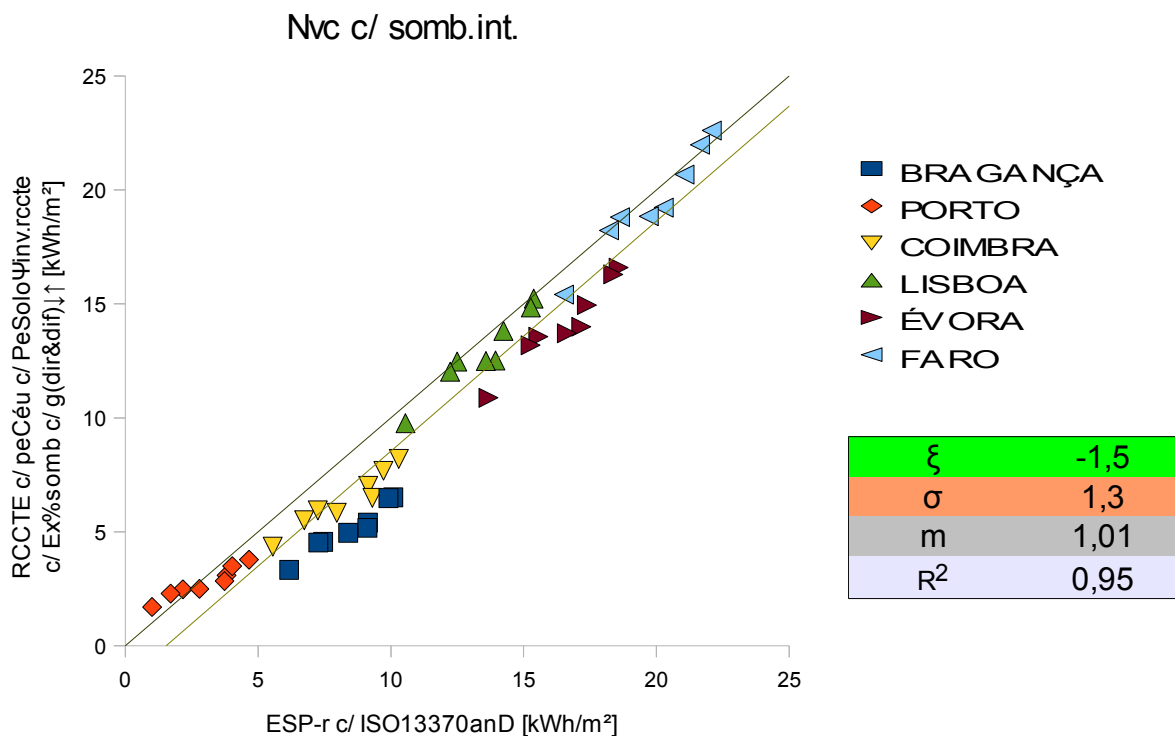


Fig. 11.10: Nvc sujeito a sombreamento interior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu, fator solar pormenorizado acima e abaixo de 300 W (ISO 13790), percentagem exata de sombreamento e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs Nvc obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370).

e exterior:

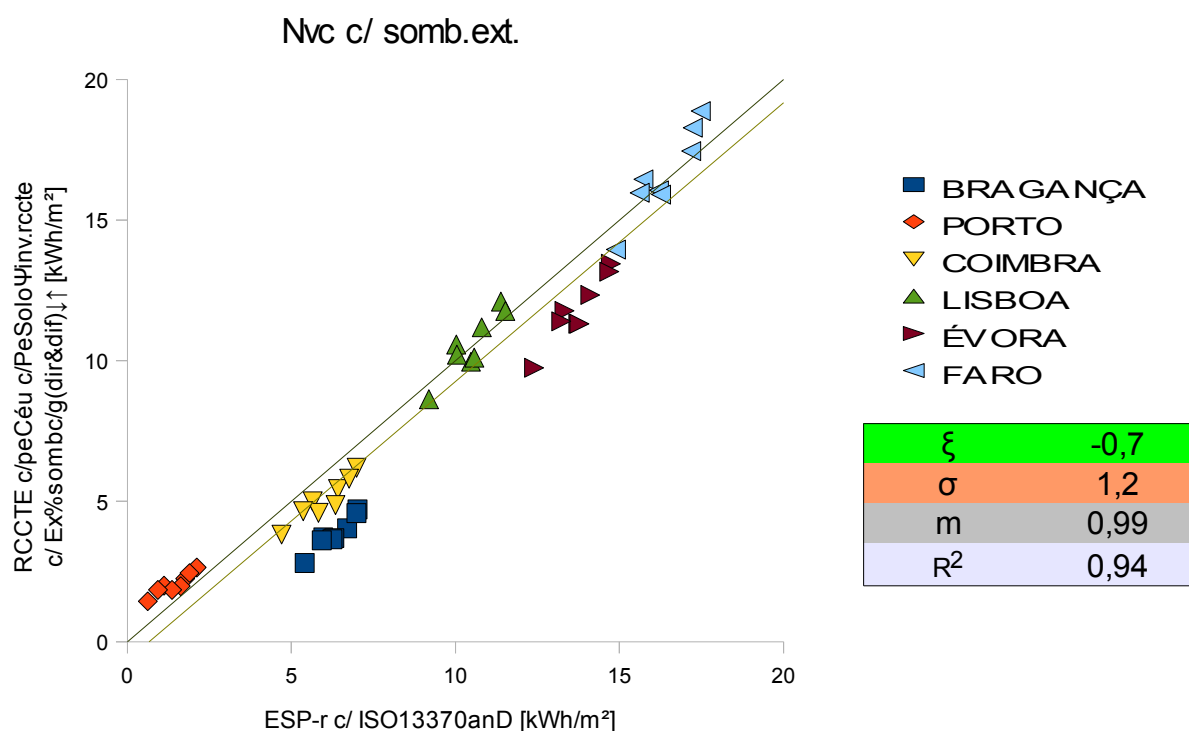


Fig. 11.11: Nvc sujeito a sombreamento exterior, calculado com inclusão das perdas radiativas para o céu, fator solar pormenorizado acima e abaixo de 300 W (ISO 13790), percentagem exata de sombreamento e perdas pelo solo (método do RCCTE para o inverno) vs Nvc obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370).

11.7 Estimativa percentual das correções propostas no cálculo de Nvc

Observou-se no capítulo anterior um desfasamento, entre Nvc calculado e Nvc obtido pelo ESP-r, de 7,6 kWh/m² para o caso do sombreamento ser interior e de 7,2 kWh/m² para o sombreamento exterior (fig. 11.6 e fig. 11.7 respetivamente).

Verificou-se ainda (fig. 11.8 e fig. 11.9) que o desfasamento anula-se ($\xi = -0,3$ e $-0,1$ kWh/m², para o sombreamento interior e exterior respetivamente) com a introdução, no cálculo de Nvc, das perdas radiativas para o céu (calculadas segundo a ISO 13790) e das perdas pelo solo (calculadas segundo o procedimento do RCCTE para o inverno).

Repare-se agora que a diminuição de desfasamento entre N_{vc} calculado e N_{vc} obtido pelo ESP-r, provocada pela introdução simultânea destes dois fatores (apresenta-se o caso do sombreamento interior, fig. 11.6 → fig. 11.8, correspondente a uma diminuição de 7,9 kWh/m²), é inferior à soma das diminuições verificadas pela introdução exclusiva de cada fator (5,0 kWh/m² + 3,5 kWh/m² = 8,5 kWh/m²):

Quadro 11.1: Desfasamento médio (ξ [kWh/m²]) entre N_{vc} calculado e N_{vc} obtido pelo ESP-r (segundo o anexo D da ISO 13370 e com sombreamento interior). É considerado o cálculo original de N_{vc} , a introdução das perdas radiativas para o céu e das perdas pelo solo, apenas as perdas para o céu e também o caso de perdas pelo solo (gráficos respetivos no anexo P). A linha inferior ($\Delta\xi$) apresenta a diminuição de desfasamento relativamente ao caso original.

| $\xi_{\text{somb.int}} (N_{vc_{\text{RCCTE}}} \text{ vs } N_{vc_{\text{ESP-r}}}) \text{ [kWh/m}^2\text{]}$ | | | |
|--|-------------|--------|---------|
| original | c/ céu&solo | c/ céu | c/ solo |
| 7,6 | -0,3 | 2,6 | 4,1 |
| $\Delta\xi$ | 7,9 | 5,0 | 3,5 |

A equação de N_{vc} apresentada pela ISO 13790, eq. 4.1 (equivalente à do RCCTE, eq. 2.1), revela que N_{vc} depende exclusivamente dos ganhos e das perdas. Na realidade o fator de utilização das perdas, η_p , também depende dos ganhos e das perdas (a_c é um parâmetro constante, variável apenas com a inércia térmica da habitação, ver eq. 4.38), ou seja:

$$\begin{aligned}
 N_{vc} &= \text{Ganhos} - \eta \text{ Perdas} = \\
 &= \text{Ganhos} - \frac{1 - \left(\frac{\text{Ganhos}}{\text{Perdas}}\right)^{-a_c}}{1 - \left(\frac{\text{Ganhos}}{\text{Perdas}}\right)^{-(a_c+1)}} \text{ Perdas} \quad \text{se } \frac{\text{Ganhos}}{\text{Perdas}} > 0 \quad e \neq 1 \quad \text{ou} \\
 &= \text{Ganhos} - \frac{a_c}{a_c+1} \text{ Perdas} \quad \text{se } \frac{\text{Ganhos}}{\text{Perdas}} = 1 \quad \text{ou} \\
 &= 1 \quad \text{se } \frac{\text{Ganhos}}{\text{Perdas}} < 0
 \end{aligned}
 \tag{eq. 11.1}$$

O seguinte gráfico materializa a dependência evocada:

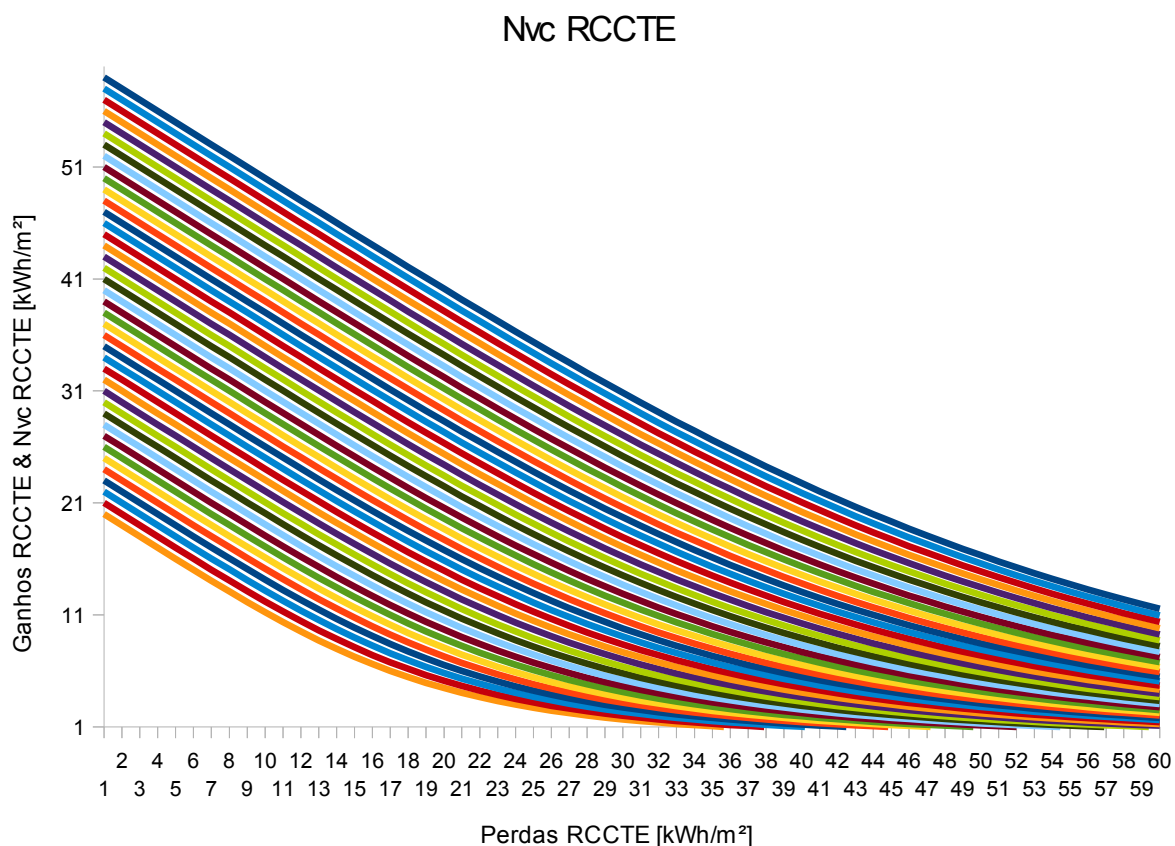


Fig. 11.12: Representação gráfica da equação de Nvc. A coordenada yy do ponto de interceção da linha que parte dum determinado valor de ganhos (eixo das ordenadas) com a linha resultante da projeção vertical do valor de perdas (abscissas), corresponde ao valor de Nvc calculado segundo a ISO 13790 (ou RCCTE). Foi considerada a constante a_c sugerida pelo RCCTE ($a_c=4,2$).

O gráfico apresentado reconhece que o declive das curvas é sucessivamente menos acentuado com a diminuição dos ganhos e com o aumento das perdas, o que coincide com o sentido das correções sugeridas anteriormente.

Apresenta-se a seguir o desfasamento provocado pela introdução isolada de cada fator corretivo (perdas radiativas para o céu, perdas pelo solo, perdas pela garagem e análise pormenorizada da energia solar pelos envidraçados) no cálculo de Nvc. No anexo Q encontram-se todos os gráficos respetivos. Temos para a situação de sombreamento interior e exterior:

Quadro 11.2: Comparação de Nvc calculado com inclusão (separada) de fatores corretivos com Nvc sem correções. O peso de cada fator é também apresentado na forma percentual (para os dois tipos de sombreamento considerados).

| Desfasamento [kWh/m ²] de Nvc Original versus Nvc com: | | | | |
|--|----------|----------------------------|-------------|----------|
| sombreamento | perd.Céu | perd.Solo _{RCCTE} | perd.Garag. | %&gExato |
| interior | 5,0 | 3,5 | 0,9 | 1,4 |
| % fator | 46 | 33 | 8 | 13 |
| exterior | 4,7 | 3,2 | 0,8 | 0,8 |
| % fator | 50 | 34 | 9 | 8 |

A análise feita é finalmente visualizada, para o caso de sombreamento interior,

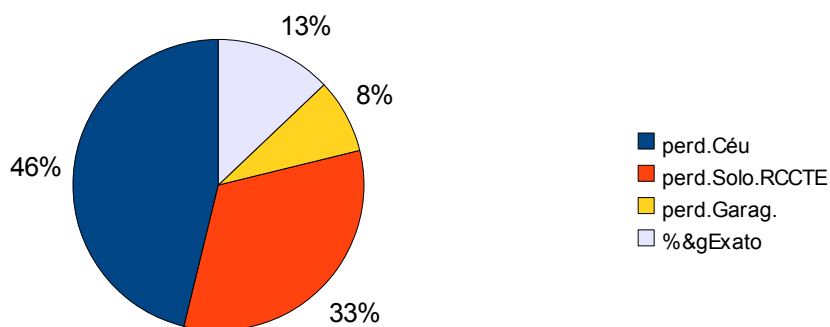


Fig. 11.13: Peso de cada fator corretivo no valor calculado de Nvc (para o caso de sombreamento interior).

E para o sombreamento exterior:

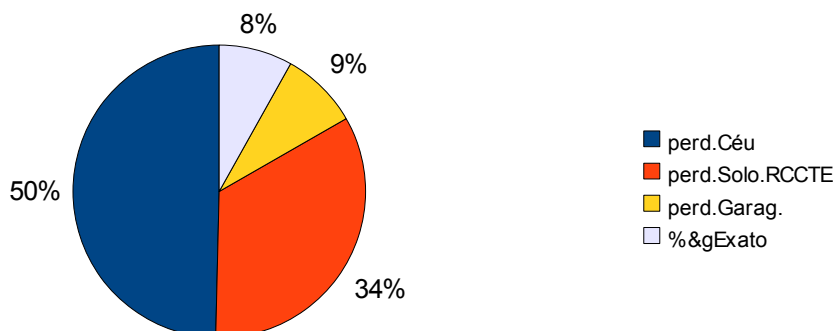


Fig. 11.14: Peso de cada fator corretivo no valor calculado de Nvc (para o caso de sombreamento exterior).

12. CONCLUSÕES

Nos capítulos anteriores, foram tecidas várias considerações sendo as mais significativas aqui sistematizadas.

Verificou-se que:

- A não consideração dos pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão invalida os resultados obtidos por meio de simulação dinâmica (fig. 11.1).
- O modelo de cálculo aplicado pelo RCCTE no período de inverno para as trocas de calor pelo solo é válido para o período de verão (fig. 9.13).
- A correção exclusiva da percentagem de sombreamento (figs. 8.18 e 8.19) provoca um erro maior que o original (figs. 8.16 e 8.17).
- A constante a_c considerada pelo RCCTE é adequada para o caso analisado (fig. 10.3).
- A inclusão das perdas pela garagem no modelo de cálculo do RCCTE não é determinante em N_{vc} (figs. 11.13 e 11.14).
- A inclusão das perdas radiativas para o céu pelo método simplificado (ISO 13790), juntamente com as perdas pelo solo (segundo o procedimento do RCCTE para o inverno), justificam o desfasamento original verificado (figs. 11.8 e 11.9).

O último *item* indica a alteração que o RCCTE poderá assumir no período de verão e, simultaneamente com o primeiro *item*, explica o desfasamento díspar inicialmente verificado (capítulo 7), entre as necessidades nominais de arrefecimento originais calculadas pelo RCCTE e as obtidas pelo ESP-r.

Repare-se que as alterações sugeridas são facilmente introduzidas nas folhas de cálculo do RCCTE:

- As perdas radiativas para o céu, em W, são calculadas segundo a eq. 4.13, aplicando a aproximação dada pela eq. 4.15 ($h_r \approx 5 \varepsilon$) e multiplicando o resultado obtido pelo fator de forma com o céu (que, simplificado, é 0,5 para a envolvente vertical e 1 para a horizontal). O valor obtido é multiplicado pelo fator 2.928 (eq. 2.8) e assim convertido em kWh, sendo finalmente subtraído aos ganhos térmicos totais, na FCV.1f.
- As perdas pelo solo, consideradas pelo RCCTE no período de inverno, encontram-se estimadas em W/°C na FCIV.1a, pelo que basta somar esse valor às perdas específicas totais, na FCV.1a.

Bibliografia

- Camelo, S (1995). *Estudo do comportamento térmico de edifícios no período de verão*. Lisboa: Instituto Superior Técnico (*apud* Clarke *et al*, 1990)
- Camelo, S & Santos, C & Ramalho, A *et al.* (Eds) Gonçalves, H & Maldonado, E (2006). *Manual de apoio à aplicação do RCCTE*. Lisboa: INETI
- Corrado, V & Fabrizio, E (2006). *Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model: Simplified correlation for gain-loss mismatch*. Energy and buildings, 39 (2007). www.sciencedirect.com . 569-579
- Conselho de ministros (2006), *Decreto Lei n° 80/2006*. *Diário da República*
- European Commission (2012). *EU energy in figures - statistical pocketbook 2012*. Luxembourg: Publications Office of the European Union (http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2012_energy_figures.pdf , consultado em 10 de setembro de 2012)
- International Organization for Standardization (2012). *About ISO*. Genève: ISO (www.iso/about.htm , consultado a 10 de setembro de 2012)
- *En Iso 13790 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling* (2007)
- *En Iso 13370 Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods* (2007)
- *En Iso 13786 Thermal performance of buildings components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods* (2007)

- *En Iso 13789 Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation methods* (2007)
- *En Iso 6946 Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method* (2007)
- Energy Plus Energy Simulation Software (2012 [a]). *Whether Data. All Regions: Europe WMO Region 6: Portugal*. USA: U. S. Department of Energy (consultado a 11 de setembro de 2012, em http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal)
- Energy Plus Energy Simulation Software (2012 [b]). *Whether Data Sources*. USA: U. S. Department of Energy (consultado a 11 de setembro de 2012, em http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm)
- Energy Systems Research Unit (1997). *The ESP-r System for Building Energy Simulation User Guide Version 9 Series*. Glasgow, UK: University of Strathclyde
- Gonçalves, H & Cabrito, P & Diniz, I (2010). *Solar XXI: em direcção à energia zero: towards zero energy*. Lisboa: LNEG.
- Hand, J (2008). *The ESP-r COOKBOOK Strategies for Deploying Virtual Representations of the Build Environment*. Glasgow, UK: University of Strathclyde
- Leal, V & Ferreira, H & Fernandes, E (2008). *Relating energy indicators of regulations to passive comfort in residential buildings*. Proceedings of the 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin: PLEA 2008
- Santos, C & Matias, L (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. LNEC, ITE 50

- Ramalho, A (1995). *Avaliação Térmica e Energética dos Edifícios no inverno na região de Lisboa e Porto – Contributo para a revisão do RCCTE*. Lisboa: Instituto Superior Técnico (apud Fernandes, 1980; apud Alamdari et Hammond, 1993)

- Panão, M & Camelo, S & Gonçalves, H (2011). *Assessment of the Portuguese building thermal code: New revised requirements for cooling energy needs to prevent buildings summer overheating*. Energy, vol. 36, pp. 3262-3271.

- Panão, M (2011). *Heat transfer in Buildings - Climate*. Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

- Spínola, C (2007). *Guia de pesquisa de normas*. Faro: Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve (consultado a 10 de setembro em http://www.bib.ualg.pt/bibliotecas/EST/Documentos/Guia_Pesquisa_Normas.pdf)

- Stallinga, P (2012). *The climate dossier (Anthropogenic Global Warming)*. Faro: Universidade do Algarve (consultado a 15 Julho de 2012, em www.stallinga.org/Climate)

Anexo A - Folhas de cálculo do RCCTE usadas para obtenção de Nvc

Apresentam-se as folhas de cálculo referenciadas no capítulo 2.2, aqui preenchidas de acordo com os dados climáticos de Lisboa (V2 Sul, ver quadro 7.1) para a moradia sem rotação e sujeita a sombreamento interior.

As perdas são contabilizadas em *FCV.1a*,

Quadro A.1- FCV.1a
Folha de cálculo FC V. 1a
 Perdas

| | | | |
|---|-----------|--------------|--------|
| Perdas associadas às paredes exteriores (U.A) | (FCIV.1a) | 61,5 | (W/°C) |
| | | + | |
| Perdas associadas aos pavimentos exteriores (U.A) | (FCIV.1a) | 0,0 | (W/°C) |
| | | + | |
| Perdas associadas às coberturas exteriores (U.A) | (FCIV.1a) | 119,2 | (W/°C) |
| | | + | |
| Perdas associadas aos envidraçados exteriores (U.A) | (FCIV.1c) | 55,8 | (W/°C) |
| | | + | |
| Perdas associadas à renovação do ar | (FCIV.1d) | 122,1 | (W/°C) |
| | | = | |
| Perdas específicas totais | (Q1a) | 358,6 | (W/°C) |

| | | | |
|---|-------|---------------|--------|
| Temperatura interior de referência | | 25 | (°C) |
| | | - | |
| Temperatura média do ar exterior na estação de arrefecimento (Quadro III.9) | | 23 | (°C) |
| | | = | |
| Diferença de temperatura interior-exterior | | 2 | |
| | | x | |
| Perdas específicas totais | (Q1a) | 358,6 | (W/°C) |
| | | x | |
| | | 2,928 | |
| | | = | |
| Perdas térmicas totais | (Q1b) | 2099,8 | (kWh) |

que faz referência aos coeficientes de transmissão térmica já determinados nas folhas do RCCTE para o período de inverno (*FCIV.1a – FCIV.1d*, com exceção de *FCV.1b*, relativa aos espaços não úteis):

Quadro A.3- FCIV.1c

Folha de cálculo FC IV. 1c
Perdas associadas aos vãos envidraçados exteriores

| Vãos envidraçados exteriores | Área (m ²) | U (W/m ² .°C) | U.A (W/°C) |
|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------|
| Verticais: | | | |
| Vãos com vidro duplo em caixi. Met. | 19,63 | 2,84 | 55,77 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| Horizontais: | | | |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| | | | 0,00 |
| TOTAL | | | 55,77 |

Quadro A.4- FCIV.1d

Folha de cálculo FC IV. 1d
Perdas associadas à renovação de ar

| | | |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Área Útil de Pavimento | <input type="text" value="163,25"/> | (m ²) |
| | x | |
| Pé-direito médio | <input type="text" value="2,75"/> | (m) |
| | = | |
| Volume interior (V) | <input type="text" value="448,95"/> | (m ³) |

VENTILAÇÃO NATURAL *(Quadro a considerar sempre que o único dispositivo de ventilação mecânica existente seja o exaustor da cozinha)*

Cumprir a NP 1037-1? (S ou N) se SIM: RPH =

Se NÃO:

| | | |
|--|----------------------------------|---|
| Classe da Caixilharia (s/c, 1, 2 ou 3) | <input type="text" value="s/c"/> | Taxa de Renovação Nominal: Ver Quadro IV.1 RPH = <input type="text" value="0,8"/> |
| Caixas de Estore (S ou N) | <input type="text" value="s"/> | |
| Classe de Exposição (1, 2, 3 ou 4) <i>(Ver Quadro IV.2)</i> | <input type="text" value="2"/> | |
| Aberturas Auto-reguladas? (S ou N) | <input type="text" value="N"/> | |
| Área de envidraçados > 15% Ap? (S ou N) | <input type="text" value="N"/> | |
| Portas Exteriores bem vedadas? (S ou N) | <input type="text" value="N"/> | |

| | | |
|---------------------------|-------------------------------------|--------|
| Volume | <input type="text" value="448,95"/> | |
| | x | |
| Taxa de Renovação Nominal | <input type="text" value="0,8"/> | |
| | x | |
| | <input type="text" value="0,34"/> | |
| | = | |
| TOTAL | <input type="text" value="122,11"/> | (W/°C) |

Seguem-se as folhas de cálculo referentes aos ganhos, solares pela envolvente opaca (*FCV.1c*),

Quadro A.5- FCV.1c

Folha de cálculo FC V. 1c
Ganhos solares pela envolvente opaca

| Orientação | POR ORIENTAÇÃO E HORIZONTAL (inclui paredes e cobertura) | | | | | | |
|--|--|---------------|--------------|---------------|----------------|-------------|----------------------|
| | N | E | S | W | HOR | ... | ... |
| Área, A (m ²) | 34,4 | 36,85 | 11,77 | 36,85 | 163,25 | | |
| | x | x | x | x | x | x | x |
| U (W/m ² °C) | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,73 | | |
| | x | x | x | x | x | x | x |
| Coefficiente de absorção, α (Quadro V.5) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | | |
| | = | = | = | = | = | = | = |
| α.U.A (W/°C) | 6,61 | 7,08 | 2,26 | 7,08 | 47,67 | 0,00 | 0,00 |
| | x | x | x | x | x | x | x |
| Int. de rad. solar na estação de arrefec. (kWh/m ²) (Quadro III.9) | 200 | 470 | 380 | 470 | 820 | | |
| | x | x | x | x | x | x | x |
| | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | = | = | = | = | = | = | = |
| Ganhos Solares pela Envolvente Opaca Exterior | 52,84 | 133,01 | 34,35 | 133,01 | 1563,58 | 0,00 | 0,00 |
| | | | | | | | TOTAL |
| | | | | | | | 1916,80 (kWh) |

solares pela envolvente envidraçada (*FCV.1d*),

Quadro A.6- FCV.1d

Folha de cálculo FC V. 1d
Ganhos solares pelos envidraçados

| Orientação | POR ORIENTAÇÃO E HORIZONTAL | | | | | | |
|--|-----------------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|----------------------|
| | N | E | S | W | ... | ... | |
| Área, A (m ²) | 10,93 | 6,12 | 1,39 | 1,19 | | | |
| | x | x | x | x | x | x | |
| Factor solar do vão envidraçado (protecção solar activada a 70%) | 0,57 | 0,57 | 0,57 | 0,57 | | | |
| | x | x | x | x | x | x | |
| Fracção envidraçada, Fg (Quadro IV.5) | 1 | 1 | 1 | 1 | | | |
| | x | x | x | x | x | x | |
| Factor de obstrução, Fs | 1 | 1 | 1 | 1 | | | |
| | x | x | x | x | x | x | |
| Factor de selectividade do vidro, Fw (Quadro V.3) | 0,8 | 0,85 | 0,75 | 0,85 | | | |
| | = | = | = | = | = | = | |
| Área Efectiva, Ae | 4,98 | 2,96 | 0,60 | 0,58 | 0,00 | 0,00 | |
| | x | x | x | x | x | x | |
| Int. de rad. solar na estação de arrefec. (kWh/m ²) (Quadro III.9) | 200 | 470 | 380 | 470 | | | |
| | = | = | = | = | = | = | |
| Ganhos Solares pelos Vãos Envidraçados Exteriores | 995,85 | 1392,17 | 226,26 | 270,29 | 0,00 | 0,00 | |
| | | | | | | | TOTAL |
| | | | | | | | 2884,56 (kWh) |

e internos (FCV.1e)

Quadro A.7- FCV.1e
Folha de cálculo FC V. 1e
 Ganhos internos

| | | |
|---|----------------|--------------|
| Ganhos Internos médios (W/m ²) (Quadro IV.3) | 4 | |
| | x | |
| Área Útil de Pavimento (m ²) | 163,25 | |
| | x | |
| | 2,928 | |
| | = | |
| Ganhos internos Totais | 1912,03 | (KWh) |

Os ganhos totais resultam do somatório dos anteriormente calculados (FCV.1f):

Quadro A.8- FCV.1f
Folha de cálculo FC V. 1f
 Ganhos totais na estação de arrefecimento (Verão)

| | | |
|--|----------------|--------------|
| Ganhos Solares pelos Vãos Envidraçados Exteriores (FCV.1d) | 2884,56 | (KWh) |
| | + | |
| Ganhos Solares pela Envolvente Opaca Exterior (FCV.1c) | 1916,80 | (KWh) |
| | + | |
| Ganhos internos (FCV.1e) | 1912,03 | (KWh) |
| | = | |
| Ganhos Térmicos Totais | 6713,39 | (KWh) |

A inércia térmica da habitação é classificada em *Inércia*:

Quadro A.9- Inércia

INÉRCIA TÉRMICA

| Elementos de construção | Mi (kg/m ²) | Imposição Regulamentar | Msi (kg/m ²) | Si (m ²) | Factor de Correção (r) | Msi x Si (kg) | |
|---|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|---------------|-------|
| Tectos | 480,0 | 150 | 150 | 167,2 | 1 | 25080 | |
| Paredes Exteriores alvenaria | 146,0 | 150 | 146 | 109,9 | 1 | 16038 | |
| Pavimentos em contacto com o terreno | 656,3 | 300 | 300 | 163,3 | 1 | 48976 | |
| Paredes em contacto com outras fracções | 214,0 | 150 | 150 | 112,2 | 1 | 16824 | |
| Paredes interiores de compartimentação | 214,0 | 300 | 214 | 112,2 | 0 | 0 | |
| Total | | | | | | 106918 | |
| Área útil de pavimento, Ap (m ²) | | | | | | / | 167,2 |
| Massa superficial Util por m ² de área útil de pavimentos, It (kg/m ²) | | | | | | = | 639 |

Inércia Térmica

FORTE

As necessidades de arrefecimento são obtidas, finalmente, em *FCV.1g*:

Quadro A.10- FCV.1g

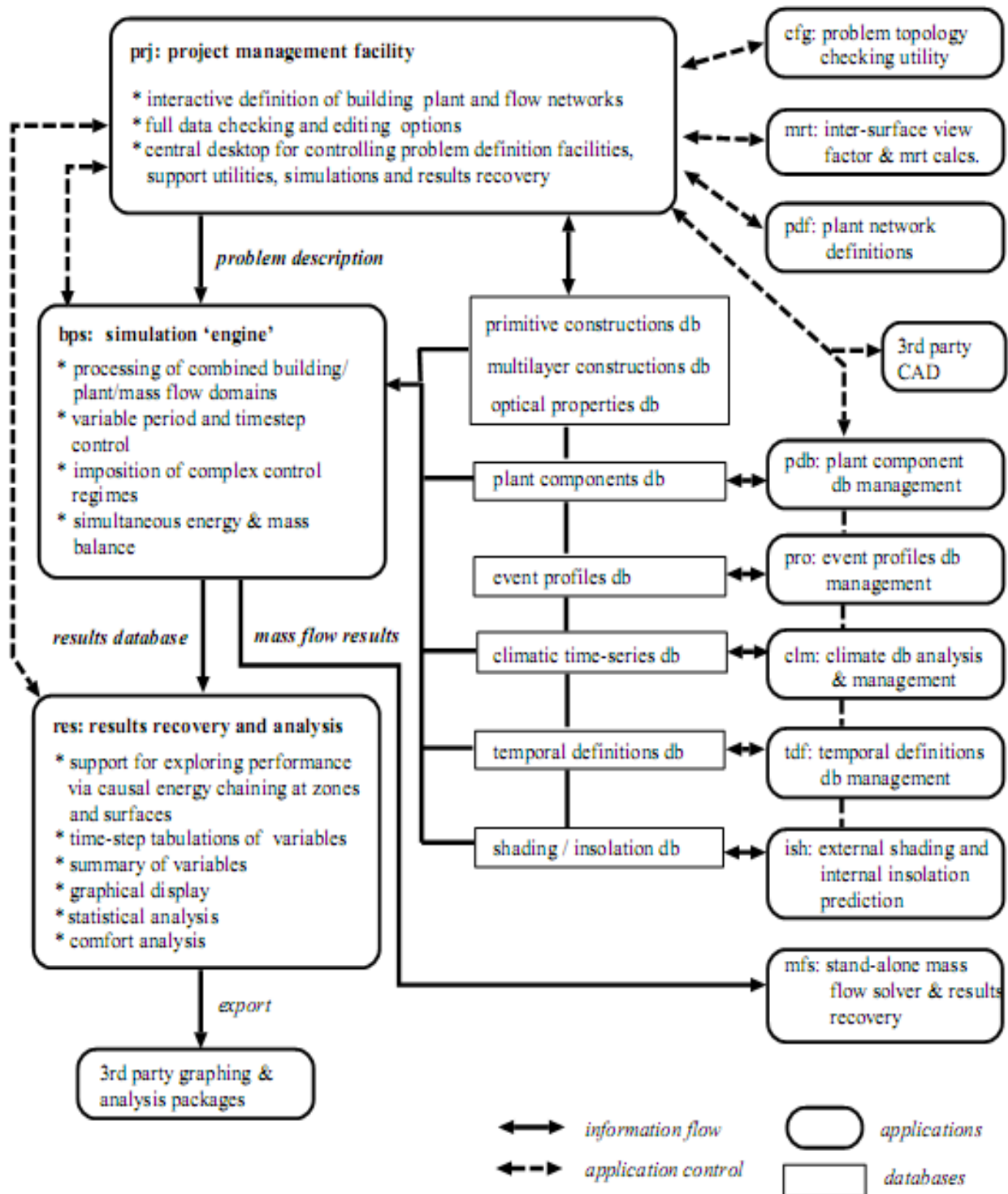
Folha de cálculo FC V. 1g
Valor das necessidades nominais de arrefecimento (Nvc)

| | | |
|--|---------|-------|
| Ganhos Térmicos Totais (FCV.1f) | 6713,39 | (kWh) |
| | / | |
| Perdas Térmicas Totais (FCV.1a) | 2099,80 | (kWh) |
| | = | |
| Relação Ganhos-Perdas γ | 3,2 | |
| Inércia do edifício (In. Fraca=1; In. Média=2; In. Forte=3) | 3 | |

| | | | |
|--|---------|---------------------------|---|
| | 1 | | Cálculo intermédio: a = 4,2 γ = 1 η = 0,81 γ ≠ 1 η = 0,3 |
| | - | | |
| Factor de utilização dos ganhos, η (Gráfico IV.1) | 0,3 | | |
| | = | | |
| | 0,69 | | |
| | x | | |
| Ganhos Térmicos Totais (FCV.1f) | 6713,39 | (kWh) | |
| | = | | |
| Necessidades Brutas de Arrefecimento | 4624,56 | (kWh/ano) | |
| | + | | |
| Consumo dos ventiladores | | (Ev=Pvx24x0,03x4(kWh)) | |
| | = | | |
| TOTAL | 4624,56 | (kWh/ano) | |
| | / | | |
| Área Útil de Pavimento (m ²) | 163,25 | | |
| | = | | |
| Necessidades Nominais de Arrefecimento - Nvc | 28,33 | (kWh/m ² .ano) | |
| | ≤ | | |
| Necessidades Nominais de Arref. Máximas - Nv (Nº2 do Artigo 15º) | 32 | (kWh/m ² .ano) | |

Anexo B - Ilustração representativa do funcionamento modular do ESP-r

Este esquema é uma cópia da fig. 2.1 do manual *ESP-r User Guide Version 9 Series* (Energy 1997):



Anexo C - Determinação do ângulo entre a radiação solar e a superfície da envolvente

Este anexo baseia-se em Panão (2011), *Heat transfer in Buildings*.

O ângulo que os raios solares fazem com a normal de uma determinada orientação numa determinada localidade (θ) é conhecido a partir de:

$\cos \theta = \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta$ sendo:

β a inclinação da fachada com o solo,

α a altura solar e

$\gamma = |\varphi - \psi|$;

ψ o ângulo entre Sul e a orientação cardinal da fachada

φ o ângulo definido pela orientação a Sul com a cardinal solar respetiva

$$\cos \varphi = \frac{\sin \alpha \sin \lambda - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \lambda} ; \lambda \text{ é a latitude e } \delta \text{ a declinação solar,}$$

$$\delta = 0,13 \pi \sin \left[\frac{2\pi(284 + J)}{365} \right] ; J \text{ é a data Juliana}$$

(ψ e φ são negativos nas orientações a nascente e positivos a poente)

A altura solar (α) resulta de:

$$\sin \alpha = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta ;$$

ω é o ângulo horário:

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

A hora solar aparente (AST [h], *apparent or true solar time*) define-se como:

$$AST = LST + \frac{LSM - LON}{15} + ET - DST ;$$

LST [h] é a hora local (*local standard time*)

LSM [°] o meridiano local (*local standard meridian*)

LOM [°] a longitude (*local longitude*)

DST [h] o tempo de avanço (*daylight saving time*)

Finalmente a equação do tempo, ET [h] (*equation of time*):

$$ET = \frac{9,87 \sin(4 \pi J') - 7,53 \cos(2 \pi J') - 1,5 \sin(2 \pi J')}{60} ; J' = \frac{J - 81}{364}$$

A radiação solar total incidente em determinada superfície compõe-se pela radiação solar direta (K_{\perp}) e pela difusa (D , também resultante da reflexão pelo solo):

$$I_{surf} = K_{\perp} \cos \theta + F_{c\acute{e}u} D + F_{solo} \rho_{solo} G$$

$F_{c\acute{e}u}$ e F_{solo} são os fatores de forma da superfície relativamente ao céu e ao solo

ρ_{solo} a reflectividade do solo

G é a radiação global incidente no solo:

$$G = D + K_{\perp} \sin \alpha$$

De notar que a base de dados climática usada no ESP-r contém a radiação direta medida na horizontal, pelo que K_{\perp} resulta da divisão desses valores com $\sin \alpha$.

Anexo D - Propriedades óticas dos envidraçados aplicados

A energia solar que atravessa um qualquer envidraçado é uma fração da energia total incidente. O valor dessa fração depende do ângulo de incidência dos raios solares com a normal do vidro e chama-se fator solar, g :

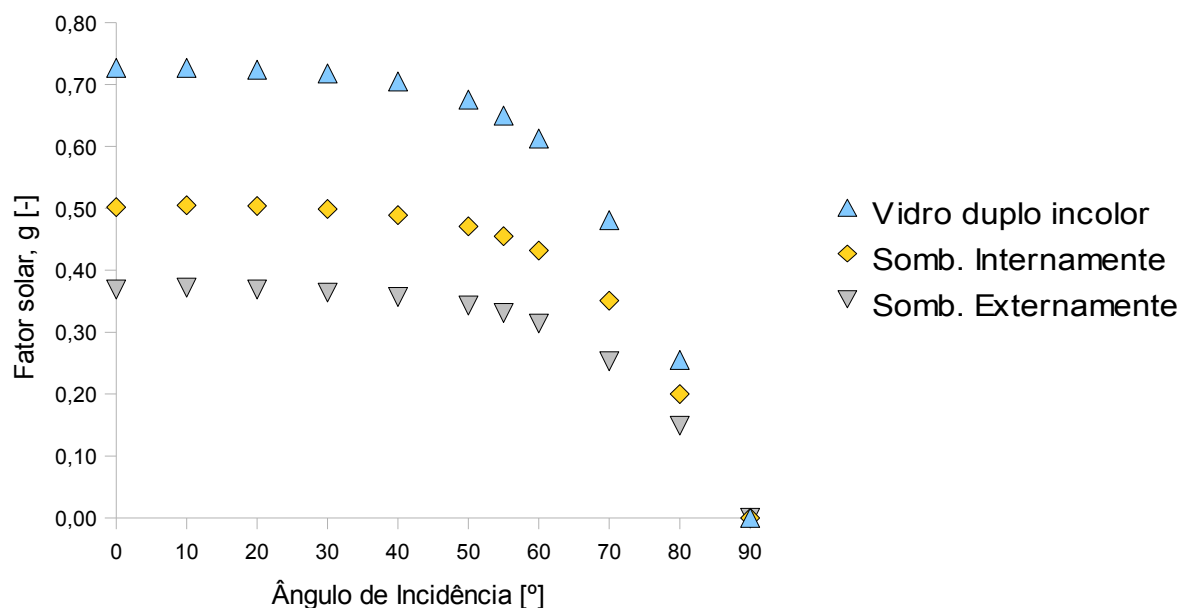


Fig.D.1– Variação do fator solar (g) com o ângulo de incidência dos raios solares com a normal do envidraçado, para os três envidraçados considerados (o valor g_{55° é pedido pelo ESP-r, sendo inferido a partir da interpolação dos valores vizinhos).

Estes valores foram determinados pelo programa *Window 5*. Este programa calcula, de 10 em 10°, o fator solar do envidraçado (g), a transmissividade e a absortividade (de cada uma das camadas do envidraçado), a partir do conhecimento da transmissividade, refletividade e emissividade (nas duas faces) de cada vidro simples. É ainda pedida a condutibilidade de cada vidro do envidraçado, sendo o coeficiente de transmissão térmica do envidraçado, U [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$], também um *output* do programa.

A ampla base de dados do *Window 5* permitiu a escolha de dois vidros simples (o modelo *ip_fl_6.ipe* da INTERPANE GLASS INDUSTRIE AG, nº7199 da base de dados e o vidro ANTELIO BRONZE 6mm.SGG da Saint-Gobain Glass, o nº11103) com transmissividades distintas (0,788 e 0,310 respetivamente) mas com a mesma espessura (6 mm), condutibilidade (1 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) e

emissividade (0,837, igual em ambas as faces). Deste modo, foi possível simular o sombreamento do envidraçado sem alterar o coeficiente de transmissão térmica do mesmo (e logo da envolvente).

O vidro duplo incolor (não «sombreado») é assim formado por dois vidros ip_fl_6.ipe (incolors), separados por uma caixa-de-ar com 12 mm de espessura.

O sombreamento interior consiste no envidraçado constituído pelo vidro ip_fl_6.ipe no lado exterior e o ANTELIO BRONZE (acastanhado) no interior. Por outro lado o sombreamento exterior compõe-se pela formação oposta (ANTELIO BRONZE no exterior e ip_fl_6.ipe no lado interior). Considerou-se a mesma espessura de caixa-de-ar (12 mm), o que garantiu o mesmo coeficiente de transmissão térmica nas três situações (2,8 W/m².°C).

Apresentam-se, para as três soluções óticas estudadas (vidro duplo, sombreamento interior e exterior), os valores de transmissividade, da absorvidade em cada vidro simples (parâmetros pedidos pelo ESP-r), simultaneamente com o respetivo fator solar (aplicado pelo RCCTE e pela ISO 13790).

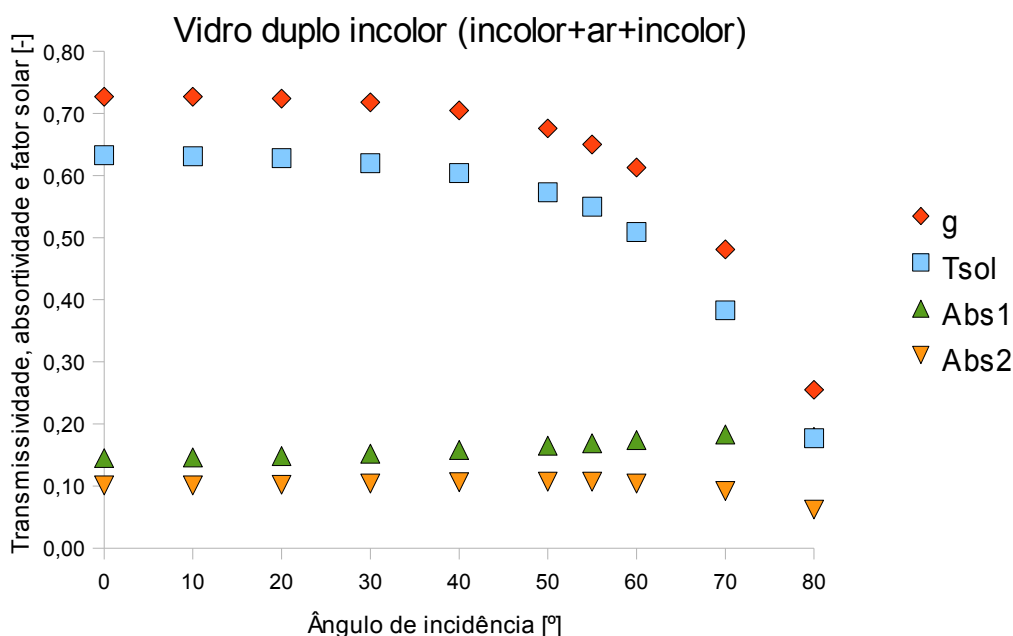


Fig.D.2– Absorvidade de cada vidro simples (Abs1 e Abs2, do vidro exterior e interior respetivamente), transmissividade (Tsol) e fator solar (g) do vidro duplo.

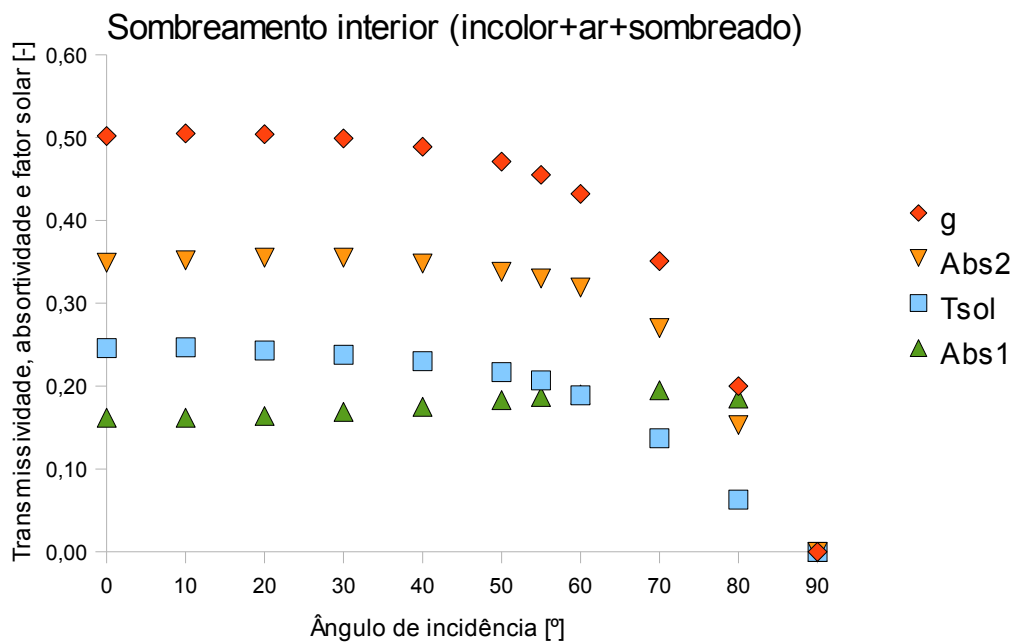


Fig.D.3– Absortividade de cada vidro simples (Abs1 e Abs2, do vidro exterior e interior respetivamente), transmissividade (Tsol) e fator solar (g) do sombreamento interior.

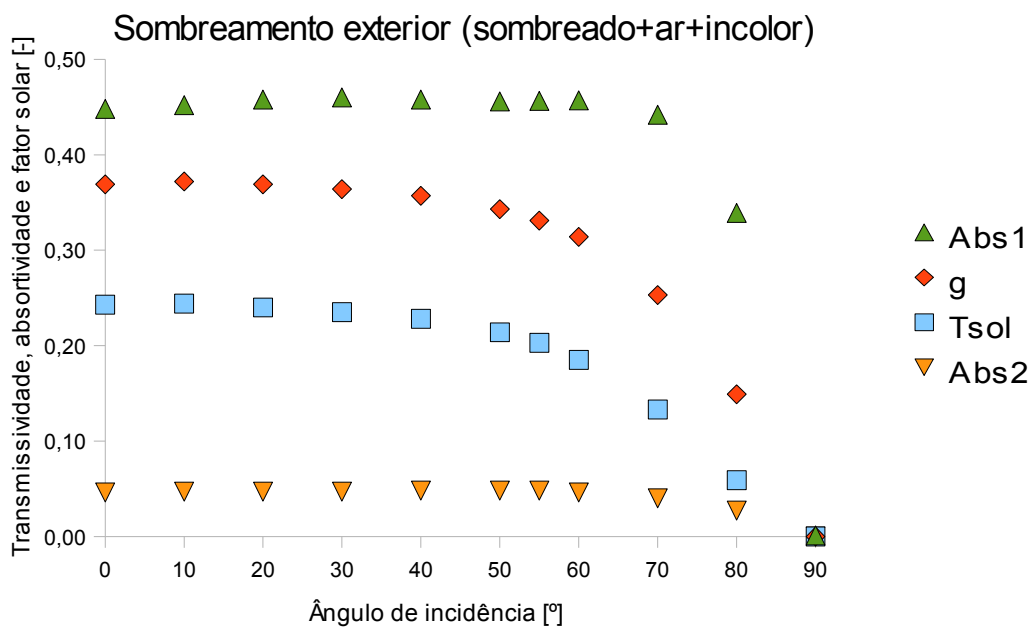


Fig.D.4– Absortividade de cada vidro simples (Abs1 e Abs2, vidro exterior e interior respetivamente), transmissividade (Tsol) e fator solar (g) do sombreamento exterior.

Anexo E - Características dos climas aplicados

Foram aplicados, no ESP-r, os ficheiros climáticos presentes em Energy (2012[a]), referentes aos climas de Bragança (41,80N, 6,73W), Porto (41,23N, 8,68W), Coimbra (40,20N, 8,42W), Lisboa (38,73N, 9,15W), Évora (38,57N, 7,90W) e Faro (37,02N, 7,97W).

O ficheiro climático de Lisboa foi desenvolvido por Ricardo Aguiar (no INETI, instituto nacional de engenharia, tecnologia e inovação), a partir da interpolação de dados climáticos do instituto de meteorologia português (obtidos entre 1951-80) com dados obtidos no INETI (e noutras fontes disponíveis). Os restantes climas foram produzidos pelo IWEC (*International Weather for Energy Calculations*), que constitui o projeto 1015 da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Resultam da conjugação de dados climáticos reais obtidos ao longo de mais de 18 anos, nos Estados Unidos (*U. S. National Climatic Data Center*), com dados de radiação solar estimados a partir da geometria terra-sol e de outros dados climáticos, nomeadamente a nublosidade (Energy 2012[b]).

Cada ficheiro climático compõe-se pelos valores horários da temperatura do ar [°C], radiação direta e difusa medida na horizontal [W/m²], velocidade do vento [m/s] e respetiva direção (ângulo entre o vento e o norte, contabilizado no sentido horário [°]) e humidade relativa [%]. Segue-se a descrição gráfica dos ficheiros climáticos, tendo em conta as médias mensais de todos os parâmetros (a tabela seguinte apresenta os valores que dão origem ao primeiro gráfico, correspondentes às temperaturas exteriores médias mensais).

Quadro E.1- Temperatura do ar exterior média, discriminada mensalmente e por localidade.

| Temp.Ext.[°C] | BRAGANÇA | PORTO | COIMBRA | LISBOA | ÉVORA | FARO |
|---------------|----------|-------|---------|--------|-------|------|
| Janeiro | 4,3 | 9,4 | 9,6 | 10,6 | 8,8 | 11,8 |
| Fevereiro | 6,0 | 10,7 | 11,0 | 11,5 | 10,2 | 12,4 |
| Março | 9,3 | 11,6 | 12,7 | 12,8 | 12,5 | 14,8 |
| Abril | 10,8 | 13,2 | 13,1 | 14,6 | 13,2 | 15,8 |
| Maiο | 12,9 | 14,5 | 15,6 | 17,3 | 17,2 | 18,6 |
| Junho | 17,6 | 17,8 | 19,0 | 20,1 | 19,8 | 21,1 |
| Julho | 21,7 | 19,0 | 20,8 | 22,4 | 22,7 | 23,9 |
| Agosto | 21,0 | 19,4 | 21,1 | 22,6 | 23,0 | 23,7 |
| Setembro | 17,5 | 18,0 | 20,6 | 21,2 | 22,0 | 21,8 |
| Outubro | 13,2 | 15,5 | 16,9 | 17,8 | 17,2 | 20,2 |
| Novembro | 8,4 | 12,2 | 12,2 | 13,6 | 12,1 | 15,5 |
| Dezembro | 5,6 | 10,3 | 11,2 | 11,0 | 10,5 | 13,2 |

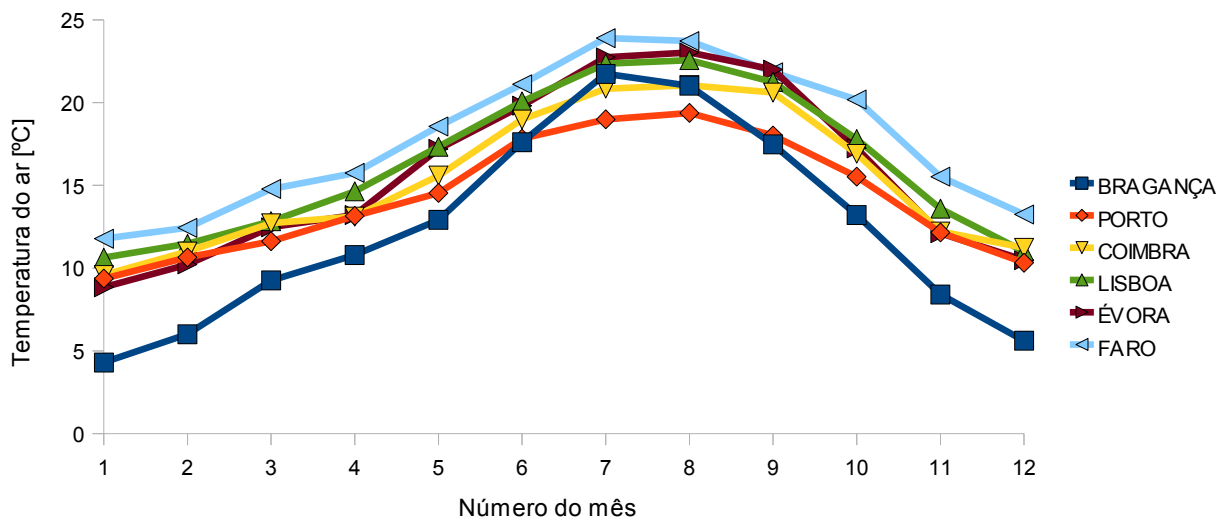


Fig. E.1– Temperatura do ar exterior.

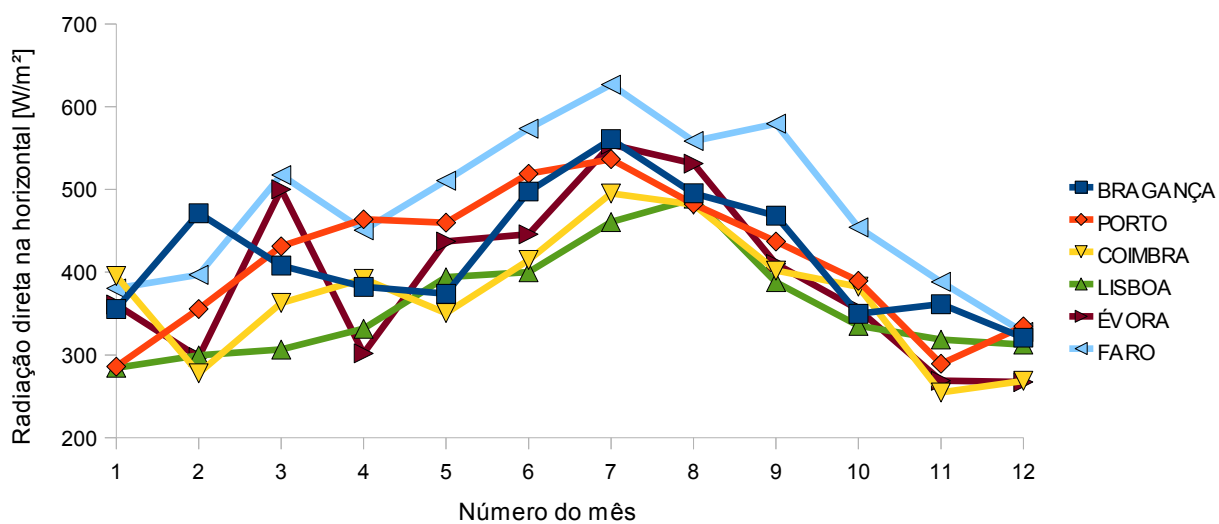


Fig. E.2– Radiação direta medida no plano horizontal (é contabilizado apenas o dia solar).

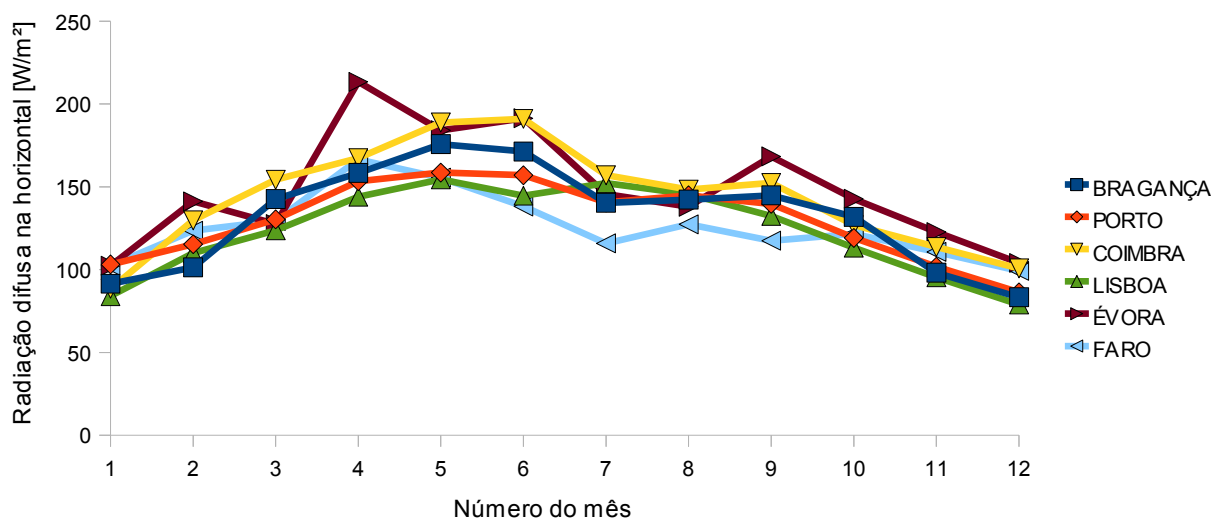


Fig. E.3– Radiação difusa medida no plano horizontal (média durante o dia solar).

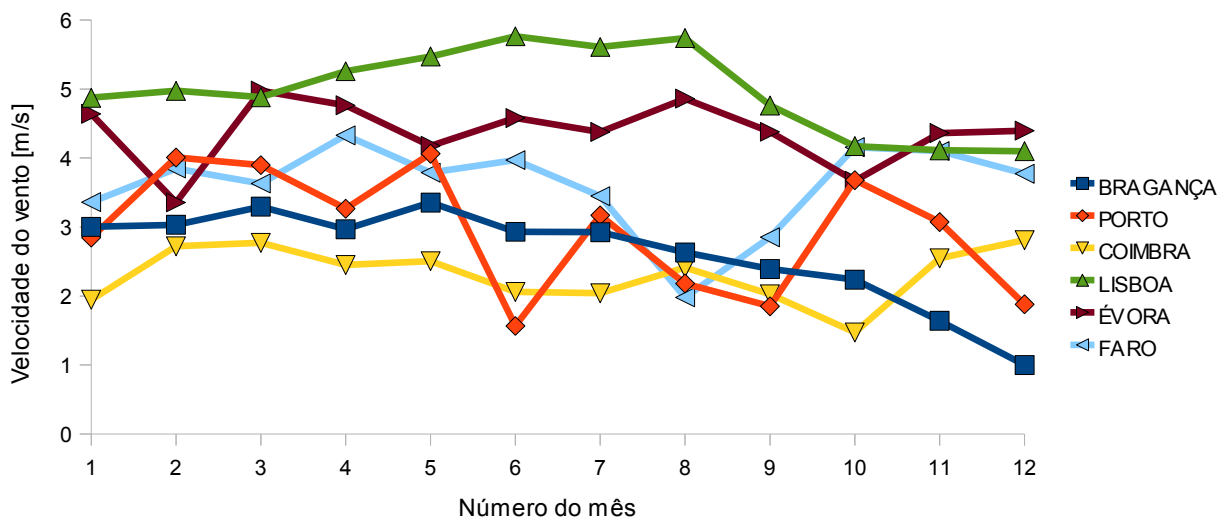


Fig. E.4– Valor absoluto da velocidade do vento.

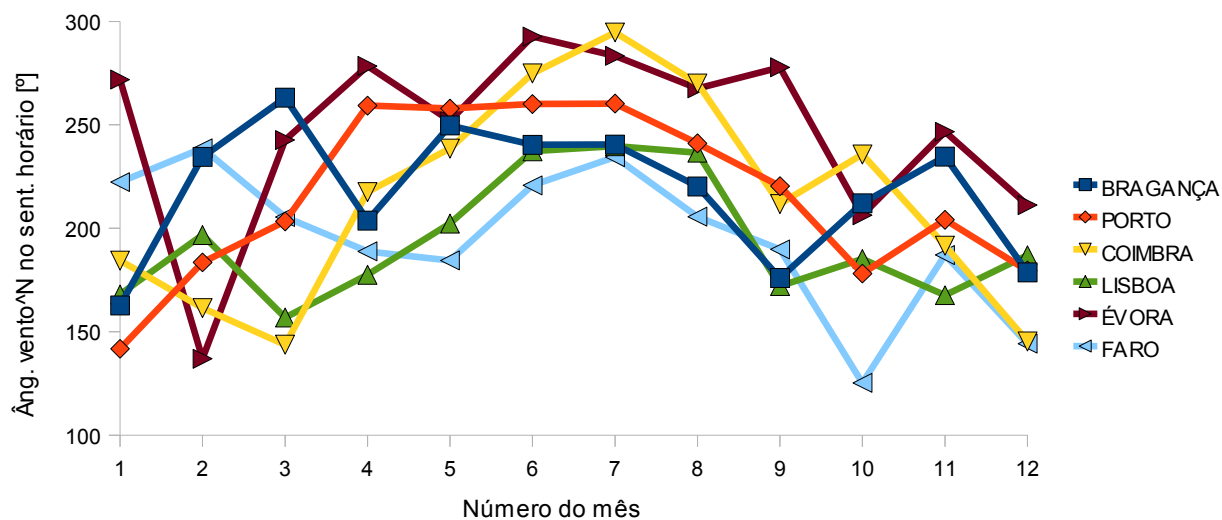


Fig. E.5– Ângulo (ponderado com a velocidade do vento) entre a direção do vento e o norte, contabilizado no sentido horário.

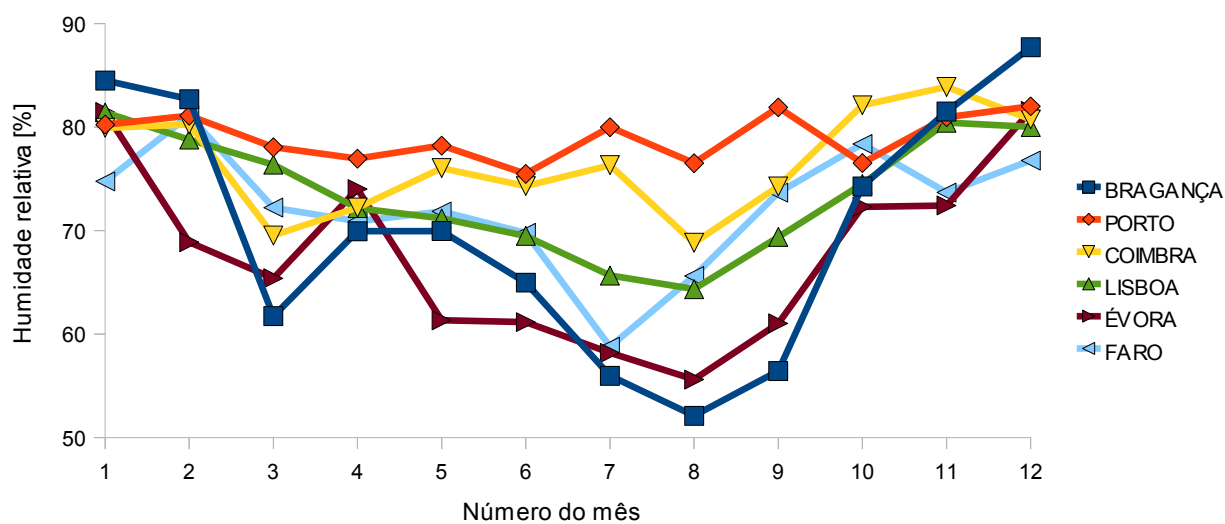


Fig. E.6– Humidade relativa do ar.

Anexo F - Temperaturas interiores médias reais

O controlo de temperatura imposto pelo RCCTE impede que a temperatura interior exceda a de referência (25 °C) no período de verão. Observe-se a média mensal da temperatura interior (apresenta-se o caso de Lisboa, para todas as rotações):

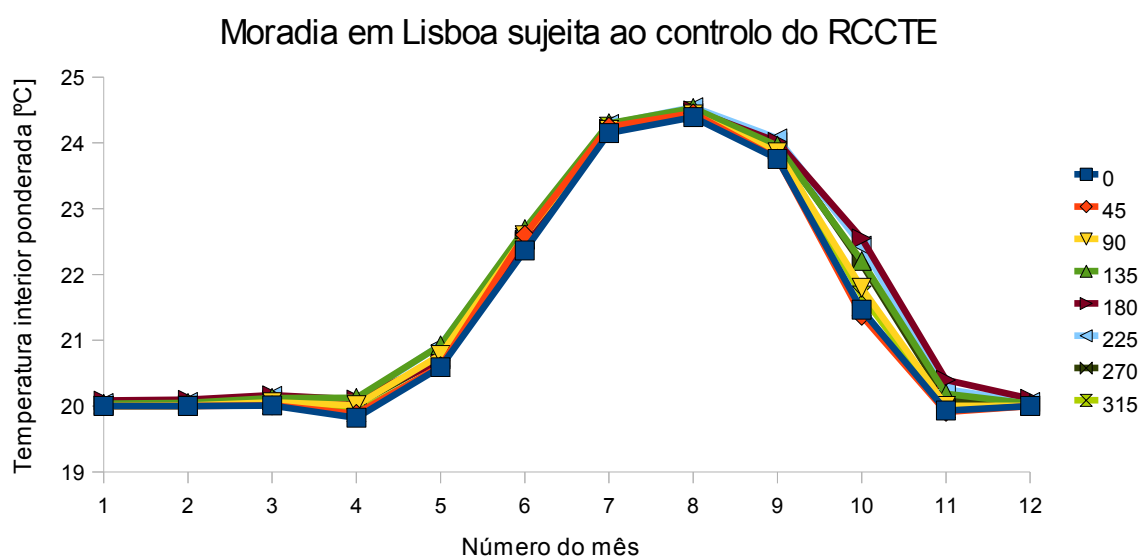


Fig. F.1– Temperatura interior média mensal para todas as rotações da moradia, sujeita ao clima de Lisboa (resulta da média ponderada da temperatura de cada divisão útil). Foi considerado o controlo de temperatura definido pelo RCCTE no verão ($T_i < 25$ °C, de 1/6 a 30/10) e no inverno ($T_i > 20$ °C, de 5/11 a 22/4).

O período da estação de aquecimento foi definido através do ficheiro climático de Lisboa, tendo em conta a definição dada na alínea *bb* do anexo II do RCCTE: «estação convencional de aquecimento é o período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de Outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último decêndio anterior a 31 de Maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15 °C.»

Repare-se ainda na evolução da média mensal da temperatura interior, para o caso de ser aplicado o controlo de verão ($T < 25\text{ °C}$) durante o ano inteiro. Foi considerada a moradia sem rotação, em todos os climas:

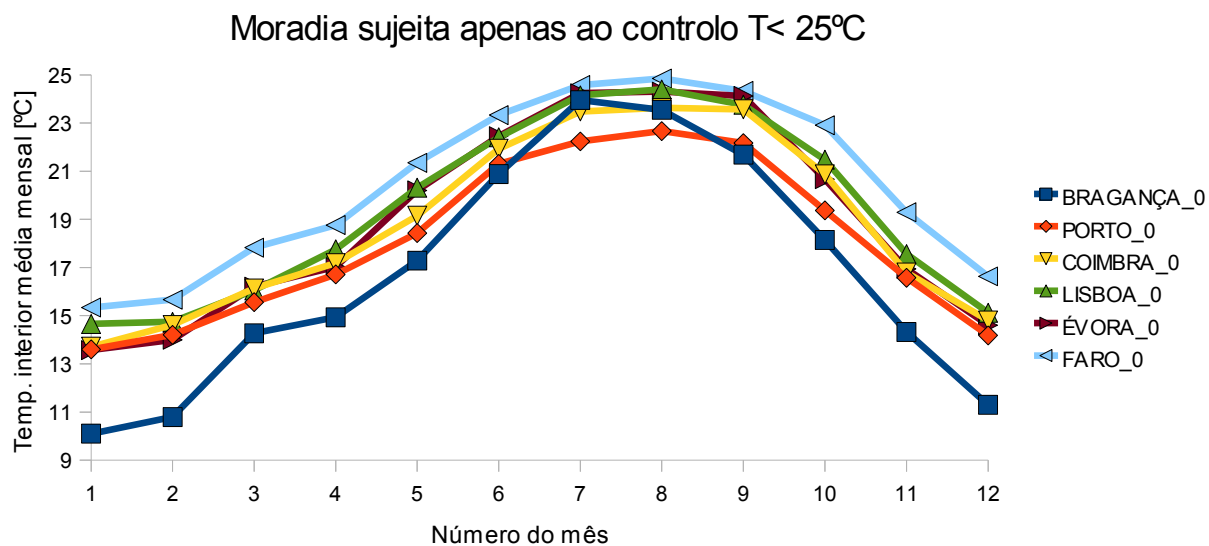


Fig. F.2- Temperatura interior média mensal da área útil da moradia, resultante da aplicação do controlo de verão ($T_i < 25\text{ °C}$) no ano inteiro. Foram considerados todos os climas e a moradia sem rotação.

Anexo G - Método pormenorizado de perdas radiativas para o céu

Da eq. 4.14, $h_r = 4 \varepsilon \sigma (\theta_{\text{sup,céu}} + 273)^3$, deduz-se que a aproximação $h_r = 5 \varepsilon$ (eq. 4.15) assume $\theta_{\text{sup,céu}} = 7,4 \text{ °C}$ (média aritmética entre a temperatura do céu e a temperatura da superfície exterior da envolvente), uma realidade eventualmente diferente da portuguesa na estação de verão.

Foi feita a média ponderada da temperatura superficial exterior da habitação em cada clima (considerando a moradia sem rotação) e em todas as rotações (no clima de Lisboa). Assumindo (o que constitui apenas uma fraca aproximação) que a temperatura do céu é sempre inferior em 11 K à temperatura do ar (aproximação da ISO 13790 para as regiões intermédias) obtém-se, para o coeficiente h_r / ε , 5,6 em vez de 5,0:

Quadro G.1- h_r / ε para temperaturas médias das superfícies externas e $\Delta\theta_{\text{ar,céu}} = 11 \text{ K}$.

| Rotação & clima | $T_{\text{sup,ext}} [^{\circ}\text{C}]$ | $T_{\text{ar,ext}} [^{\circ}\text{C}]$ | $T_{\text{céu}} [^{\circ}\text{C}]$ | $\theta_{\text{sup,céu}} [^{\circ}\text{C}]$ | h_r / ε | |
|-----------------|---|--|-------------------------------------|--|---------------------|----------|
| 0br | 24,1 | 19,5 | 8,5 | 16,3 | 5,49 | |
| 0po | 23,0 | 18,6 | 7,6 | 15,3 | 5,44 | |
| 0co | 25,2 | 20,4 | 9,4 | 17,3 | 5,55 | |
| 0ev | 26,6 | 21,9 | 10,9 | 18,8 | 5,63 | |
| 0fa | 27,7 | 22,6 | 11,6 | 19,6 | 5,68 | |
| 0lx | 25,8 | 21,6 | 10,6 | 18,2 | 5,60 | |
| 45lx | 25,9 | 21,6 | 10,6 | 18,3 | 5,60 | |
| 90lx | 25,8 | 21,6 | 10,6 | 18,2 | 5,60 | |
| 135lx | 26,1 | 21,6 | 10,6 | 18,3 | 5,61 | |
| 180lx | 26,0 | 21,6 | 10,6 | 18,3 | 5,61 | |
| 225lx | 25,9 | 21,6 | 10,6 | 18,3 | 5,60 | |
| 270lx | 25,7 | 21,6 | 10,6 | 18,2 | 5,60 | |
| 315lx | 25,8 | 21,6 | 10,6 | 18,2 | 5,60 | σ |
| | | | | Lisboa | 5,60 | 0,003 |
| | | | Média: | país | 5,57 | 0,09 |

De notar que a temperatura do céu depende da temperatura do ponto de orvalho, que por sua vez depende da temperatura do ar e da humidade relativa (Camelo 1995). Fazê-la depender apenas do valor da temperatura do ar, ainda que em toda a gama sugerida pela norma ISO 13790 ($9\text{K} \leq \Delta\theta_{\text{ar,céu}} \leq 11\text{K}$), provoca variações muito ténues no quociente h_r / ε :

Quadro G.2- Variação de h_r com $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u}$ (9 °C para as regiões subpolares e 13 °C nos trópicos).

| $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u}$ [°C] | hr/ ϵ | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 9 | 9,5 | 10 | 10,5 | 11 | 11,5 | 12 | 12,5 | 13 |
| 0br | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,4 | 5,4 |
| 0po | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,4 | 5,4 | 5,4 | 5,4 | 5,4 |
| 0co | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| 0lx | 5,7 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,5 |
| 0ev | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 |
| 0fa | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,6 | 5,6 |
| hr/ ϵ méd. | 5,7 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,5 |
| σ | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |

Na realidade a norma ISO 13790 sugere a aproximação $h_r = 5 \epsilon$ e $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u} = 11$ K (regiões intermédias) para satisfazer diretamente a eq. 4.13, $\Phi_{c\acute{e}u,k} = R_{se} U_{sup,k} A_{sup,k} h_r \Delta\theta_{ar,c\acute{e}u}$, não referindo se será viável usar a aproximação $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u} = 11$ K também no cálculo de $\theta_{sup,c\acute{e}u}$.

Segue-se a respetiva correção no valor das perdas radiativas para o céu, resultante deste exercício:

Quadro G.3- Perdas radiativas para o céu considerando $h_r / \epsilon = 5,6$ e $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u} = 11$ K.

| Dados | par_ext | vidro | Cobe.ITE50 | [unidades] |
|--|---------|--------|------------|-------------------------|
| R_e | 0,04 | 0,04 | 0,04 | [m ² ·K/W] |
| U | 0,49 | 2,84 | 0,73 | [W/(m ² ·K)] |
| A | 100,2 | 19,6 | 163,3 | [m ²] |
| ϵ | 0,9 | 0,84 | 0,9 | [-] |
| $F_{c\acute{e}u}$ | 0,5 | 0,5 | 1 | [-] |
| (aproximação $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u} = 11$ K e $h_r = 5,6 \epsilon$) | | | | |
| $\Delta\theta_{ar,c\acute{e}u}$ | 11 | 11 | 11 | [K] |
| h_r | 5,0 | 4,7 | 5,0 | [W/(m ² ·K)] |
| Φ_r | 55 | 58 | 264 | [K] |
| $Q_{r,p/c\acute{e}u}$ | 160 | 168 | 774 | [kWh] |
| | | | 1102 | [kWh] |
| | | TOTAL: | 6,8 | [kWh/m ²] |

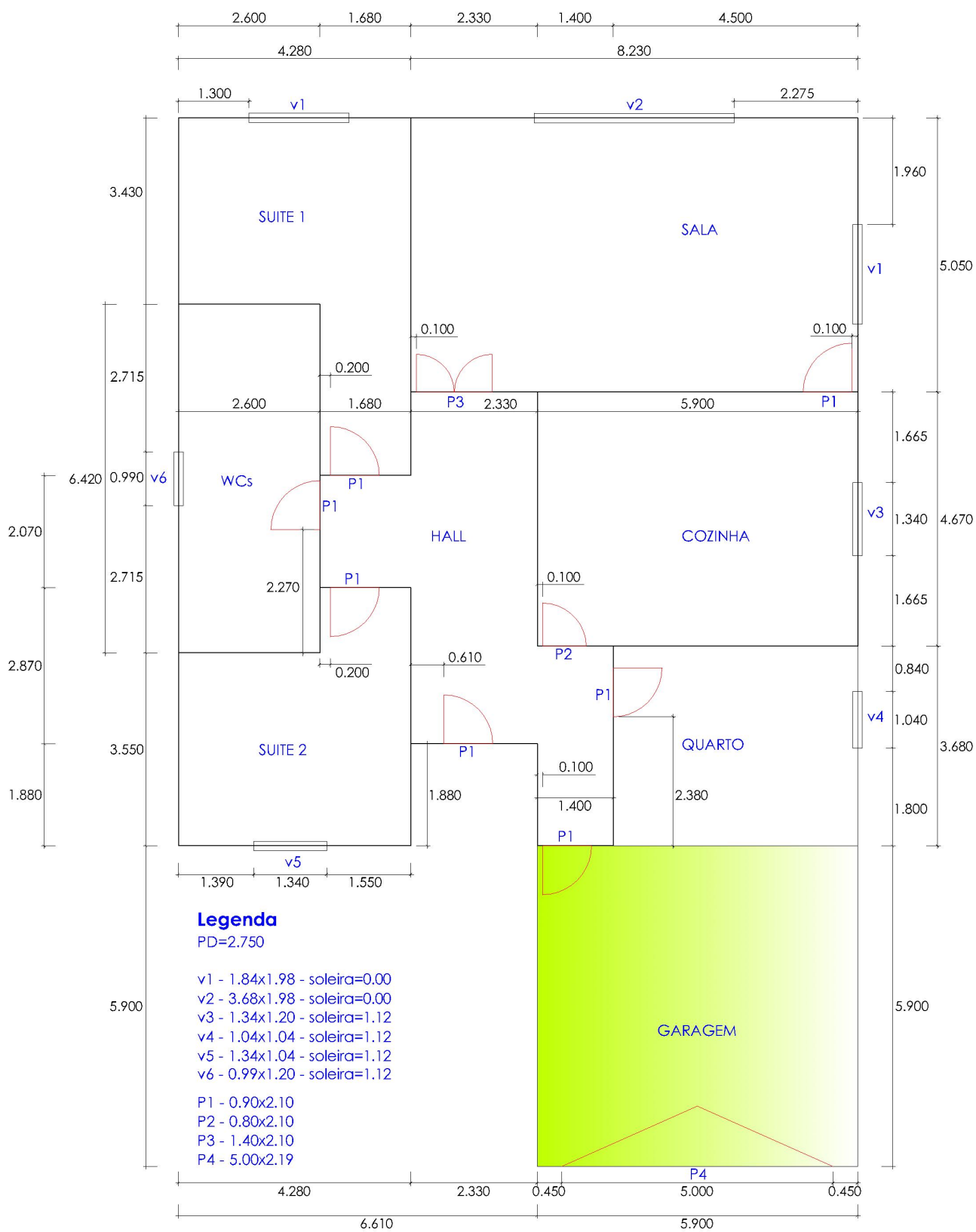
O valor obtido deste modo é 0,8 kWh/m² superior ao anterior (ver quadro 8.1).

Lembre-se, finalmente, que o cálculo do coeficiente externo radiativo (h_r) pelo método pormenorizado implica o conhecimento do fator $\theta_{sup,c\acute{e}u}$. Uma vez que a temperatura do céu (considerada sempre 11 K inferior à do ar) não foi determinada com precisão, o valor aqui sugerido

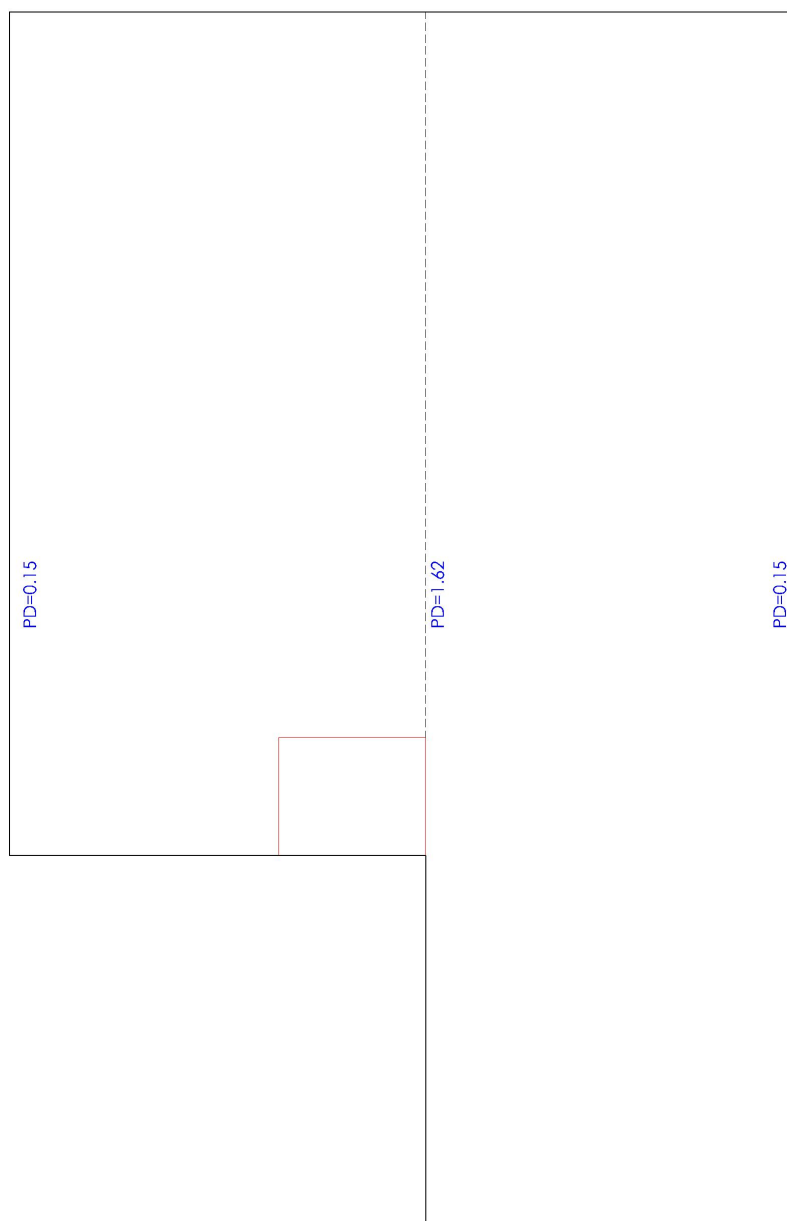
$h_r = 5,6 \epsilon$ W/(m²·K) não será fiável, pelo que se mantém a aproximação original (eq. 4.15),

$h_r = 5 \epsilon$ W/(m²·K).

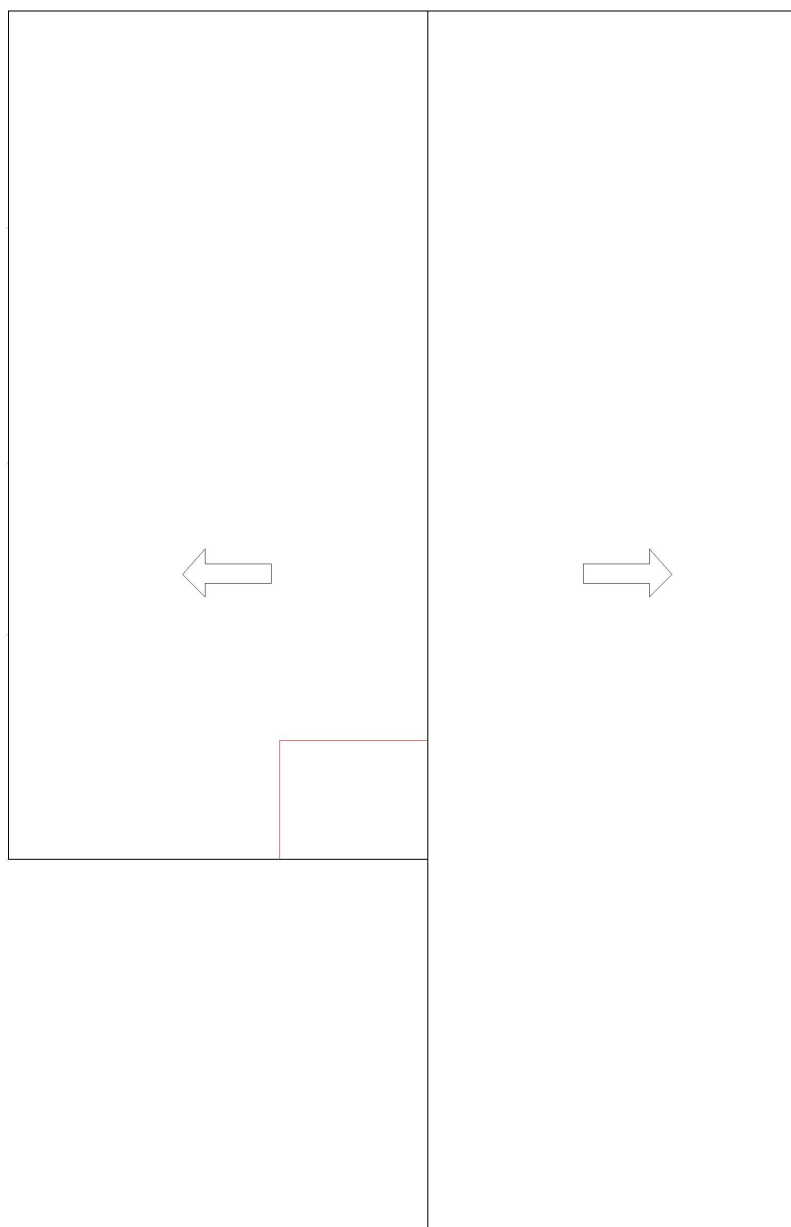
Anexo H - Planta da casa pormenorizada



Rés-do-chão



Desvão da cobertura



Telhado

As imagens deste anexo resultam da introdução de cotas e símbolos no ficheiro geométrico da moradia (exportado pelo ESP-r). O tratamento destas imagens foi feito em AutoCad pelo eng. Rui Cunha Reis. A informação presente neste anexo, juntamente com a do anexo seguinte, permite reproduzir exatamente a moradia estudada nesta dissertação, em qualquer programa de simulação.

Anexo I - Características termofísicas dos elementos construtivos

As camadas são apresentadas do exterior para o interior (da habitação).

d [mm] é a espessura da camada, λ [W/(m·°C)] a condutibilidade térmica, ρ [kg/m³] a massa específica, c [J/(kg·°C)] o calor específico, ε [-] a emissividade, α [-] a absorvidade, V a resistência à passagem de vapor de água [Mns/(g·m)] e R [m²·K/W] a resistência térmica da camada.

O valor do coeficiente de transmissividade, U , assume paredes exteriores com

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

Parede exterior da zona útil:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |
| EPS | 40 | 0,04 | 20 | 1000 | 0,9 | 0,3 | 67 | 1 |
| Tijolo | 220 | 0,423 | 1700 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 12 | 0,52 |
| Ar* | 30 | - | - | - | - | - | - | 0,18 |
| Tijolo | 70 | 0,368 | 1700 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 12 | 0,19 |
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |

$$U=0,480 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

* _ O ESP-r define simplifadamente as camadas de ar («gaps») pelo valor da sua resistência.

Parede exterior da garagem:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |
| Tijolo11 | 110 | 0,407 | 1700 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 12 | 0,27 |
| Lã mineral | 40 | 0,023 | 75 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 30 | 1,74 |
| Tijolo | 110 | 0,407 | 1700 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 12 | 0,27 |
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |

$$U= 0,404 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Paredes interiores, de separação entre a zona útil e a garagem e muro de suporte da cobertura:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |
| Tijolo11 | 110 | 0,407 | 1700 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 12 | 0,27 |
| Ar* | 30 | - | - | - | - | - | - | 0,18 |
| Tijolo | 110 | 0,407 | 1700 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 12 | 0,27 |
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |

$$U=0,996 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Laje interior entre o rés-do-chão e o sótão:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| XPS | 40 | 0,037 | 35 | 1300 | 0,9 | 0,3 | 67 | 1,08 |
| Laje betão | 200 | 2 | 2400 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 13 | 0,1 |
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |

$$U(\text{ascendente;descendente})= 0,750 ; 0,713 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Laje de cobertura sobre o *hall* de entrada (a ordem dos elementos é do exterior- *hall*- para o sótão)

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |
| EPS | 40 | 0,040 | 20 | 1000 | 0,9 | 0,3 | 67 | 1 |
| Laje betao | 200 | 2 | 2400 | 1000 | 0,9 | 0,7 | 13 | 0,1 |
| XPS | 40 | 0,037 | 35 | 1300 | 0,9 | 0,3 | 67 | 1,08 |
| Reboco | 15 | 1,3 | 1800 | 1007 | 0,9 | 0,5 | 44 | 0,01 |

$$U(\text{ascendente;descendente})= 0,427 ; 0,414 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Pavimento:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Terra | 250 | 1,28 | 1460 | 879 | 0,9 | 0,85 | 5 | 0,2 |
| Cascalho | 150 | 0,52 | 2050 | 184 | 0,9 | 0,85 | 2 | 0,29 |
| Argamassa | 150 | 1,4 | 2100 | 653 | 0,9 | 0,65 | 19 | 0,11 |
| Ladrilhos | 10 | 0,6 | 500 | 750 | 0,9 | 0,65 | 52 | 0,02 |

$$U(\text{ascendente;descendente})= 1,338 ; 1,223 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Portas:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Carvalho | 25 | 0,19 | 700 | 2390 | 0,9 | 0,65 | 12 | 0,13 |

$$U_{\text{ext}}= 3,316 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$U_{\text{int}}= 2,554 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Portão da garagem:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Aço | 15 | 50 | 7800 | 502 | 0,12 | 0,2 | 19200 | 0 |

$$U= 5,872 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Telhas:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Telhas | 10 | 0,6 | 1500 | 750 | 0,9 | 0,4 | 52 | 0,02 |

$$U(\text{ascendente;descendente})= 6,383 ; 4,412 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Vidro duplo:

| Elemento construtivo | d [mm] | λ [W/(m·°C)] | ρ [kg/m ³] | c [J/(kg·°C)] | ε [-] | α [-] | V [Mns/(g·m)] | R [m ² ·K/W] |
|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| Vidro | 6 | 1 | 2710 | 837 | 0,84 | 0,05 | 19200 | 0,01 |
| Ar* | 12 | - | - | - | - | - | - | 0,17 |
| Vidro | 6 | 1 | 2710 | 837 | 0,84 | 0,05 | 19200 | 0,01 |

$$U= 2,841 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Propriedades óticas

Vidro duplo incolor:

| Grau de incidência | 0° | 40° | 55° | 70° | 80° |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Transmissibilidade | 0,633 | 0,604 | 0,550 | 0,383 | 0,177 |
| Absortividade do vidro exterior | 0,145 | 0,158 | 0,169 | 0,183 | 0,179 |
| Absortividade do ar | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 |
| Absortividade do vidro interior | 0,101 | 0,106 | 0,107 | 0,092 | 0,062 |
| Fator solar, g | 0,727 | 0,705 | 0,650 | 0,481 | 0,255 |

Vidro duplo sombreado internamente:

| Grau de incidência | 0° | 40° | 55° | 70° | 80° |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Transmissibilidade | 0,246 | 0,230 | 0,207 | 0,137 | 0,063 |
| Absortividade do vidro exterior | 0,162 | 0,175 | 0,187 | 0,195 | 0,185 |
| Absortividade do ar | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 |
| Absortividade do vidro interior | 0,349 | 0,348 | 0,330 | 0,270 | 0,153 |
| Fator solar, g | 0,495 | 0,481 | 0,455 | 0,325 | 0,178 |

Vidro duplo sombreado externamente:

| Grau de incidência | 0° | 40° | 55° | 70° | 80° |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Transmissibilidade | 0,243 | 0,228 | 0,203 | 0,133 | 0,059 |
| Absortividade do vidro exterior | 0,448 | 0,458 | 0,457 | 0,442 | 0,339 |
| Absortividade do ar | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 |
| Absortividade do vidro interior | 0,046 | 0,048 | 0,048 | 0,040 | 0,027 |
| Fator solar, g | 0,339 | 0,324 | 0,331 | 0,214 | 0,120 |

Anexo J - Perdas radiativas segundo a temperatura superficial exterior da envolvente

Nas colunas a vermelho, é analisado o aumento de temperatura superficial da envolvente que advém da anulação das trocas radiativas pelo céu (nas simulações sujeitas à radiação solar). A partir desse aumento é estimado o respetivo aumento de perdas radiativas segundo o processo de cálculo pormenorizado da ISO

13790 (em que $h_r = 4 \varepsilon \sigma (\theta_{sup,c\acute{e}u} + 273)^3$). De notar que este cálculo é apenas experimental, uma vez que não faz parte dos pressupostos da ISO 13790 (que considera a temperatura superficial da envolvente na situação de equilíbrio, que implica trocas radiativas para o céu).

Os valores aqui apresentados surgem da comparação das perdas radiativas referentes às temperaturas superficiais (da envolvente) registadas nas simulações sem sol, com as registadas nas simulações com sol.

Dada a fraca estimativa da temperatura do céu (sempre 11 K inferior à temperatura do ar exterior), torna-se preferível aplicar a aproximação $h_r = 5 \varepsilon$ para efeitos de cálculo das perdas radiativas, servindo a presente análise estimar apenas o aumento dessas mesmas perdas, resultante da radiação solar.

| SIMULAÇÃO & Rotação cidade | Aumento percentual [%] | | | | Perdas radiativas [kWh.m ²] [considerando $h_r = 4\varepsilon\sigma(\theta_{sup,c\acute{e}u} + 273)^3$] relativas à simulação: | | | | Temperaturas médias [°C] | | | | | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----|---|----------------------------------|------------------------|-----|---|---------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Perdas radiativas devido: | | Da Temp. em K, devido ao: | | Da Temp. em °C, devido ao: | | relativas à simulação: | | Sup. Exterior da envolvente na simulação: | | Céu (T _g -11°C) | | Ar | |
| | Sol (s/sol&c/céu) → -c/sol&s/céu | Céu (c/sol&c/céu) → -c/sol&s/céu | Sol | Céu | Sol (s/sol&c/céu) → -c/sol&s/céu | Céu (c/sol&c/céu) → -c/sol&s/céu | Sol | Céu | c/sol & c/céu | s/sol & c/céu | c/sol & s/céu | s/sol & s/céu | c/sol & c/céu | s/sol & s/céu |
| 0br | 3,1 | 1,0 | 2,4 | 0,9 | 40 | 11 | 7,1 | 6,9 | 7,2 | 24,1 | 17,2 | 26,8 | 24,1 | 17,2 |
| 0po | 3,0 | 0,9 | 2,2 | 0,9 | 39 | 11 | 7,1 | 6,9 | 7,1 | 23,0 | 16,5 | 25,6 | 23,0 | 16,5 |
| 0co | 3,1 | 0,8 | 2,3 | 0,8 | 36 | 9 | 7,2 | 7,0 | 7,3 | 25,2 | 18,5 | 27,6 | 25,2 | 18,5 |
| 0ev | 2,7 | 0,7 | 2,0 | 0,6 | 29 | 7 | 7,3 | 7,1 | 7,4 | 26,6 | 20,6 | 28,5 | 26,6 | 20,6 |
| 0fa | 2,9 | 0,8 | 2,2 | 0,8 | 31 | 9 | 7,4 | 7,2 | 7,4 | 27,7 | 21,1 | 30,0 | 27,7 | 21,1 |
| 0lx | 2,2 | 0,6 | 1,7 | 0,5 | 24 | 6 | 7,3 | 7,1 | 7,3 | 25,8 | 20,8 | 27,4 | 25,8 | 20,8 |
| 45lx | 2,2 | | 1,7 | | 25 | | 7,3 | | | 25,9 | | | 25,9 | |
| 90lx | 2,2 | | 1,7 | | 24 | | 7,3 | | | 25,8 | | | 25,8 | |
| 135lx | 2,3 | | 1,8 | | 26 | | 7,3 | | | 26,1 | | | 26,1 | |
| 180lx | 2,3 | | 1,8 | | 25 | | 7,3 | | | 26,0 | | | 26,0 | |
| 225lx | 2,3 | | 1,7 | | 25 | | 7,3 | | | 25,9 | | | 25,9 | |
| 270lx | 2,2 | | 1,7 | | 24 | | 7,3 | | | 25,7 | | | 25,7 | |
| 315lx | 2,2 | | 1,7 | | 24 | | 7,3 | | | 25,8 | | | 25,8 | |

Anexo K - Valores de a_{dir} e θ_{dir} obtidos por outras bases de dados

Este anexo apresenta as frações de energia solar direta (a_{dir}) e o ângulo de incidência (θ_{dir}) para cada localidade e orientação, obtidos a partir da radiação direta e difusa do clima ESP-r (a), da radiação global e difusa dada pelo Solterm (b), da radiação total medida (em simulação, no ESP-r) e da difusa do clima ESP-r (c) e da radiação total medida e da difusa do clima ESP-r, excluindo os valores relativos a pequenos desfasamentos, ao nascer e pôr-do-sol, resultantes da impossibilidade de se verificar radiação solar para alturas solares (calculadas segundo o anexo C) negativas (d):

| BRAGANÇA | | a_{dir} [-] | | | | θ_{dir} [°] | | | |
|-------------|--|------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|--|---|----|
| ATRAVÉS DA: | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | |
| | S | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,51 | 66 | 66 | 65 | 66 |
| SE | 0,62 | 0,67 | 0,60 | 0,55 | 53 | 54 | 54 | 54 | |
| E | 0,62 | 0,70 | 0,57 | 0,52 | 38 | 33 | 42 | 42 | |
| NE | 0,47 | 0,60 | 0,39 | 0,34 | 52 | 43 | 54 | 54 | |
| N | 0,15 | 0,24 | 0,08 | 0,07 | 77 | 70 | 74 | 75 | |
| NW | 0,46 | 0,33 | 0,40 | 0,35 | 53 | 57 | 54 | 55 | |
| W | 0,62 | 0,52 | 0,58 | 0,53 | 38 | 44 | 43 | 43 | |
| SW | 0,62 | 0,56 | 0,60 | 0,55 | 53 | 55 | 54 | 55 | |
| HOR | 0,74 | 0,85 | 0,86 | 0,73 | 44 | 41 | 41 | 41 | |

| PORTO | | a_{dir} [-] | | | | θ_{dir} [°] | | | |
|-------------|--|------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|--|---|----|
| ATRAVÉS DA: | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | |
| | S | 0,54 | 0,46 | 0,48 | 0,49 | 67 | 66 | 66 | 66 |
| SE | 0,56 | 0,56 | 0,50 | 0,51 | 54 | 54 | 56 | 56 | |
| E | 0,54 | 0,57 | 0,46 | 0,47 | 40 | 35 | 44 | 44 | |
| NE | 0,38 | 0,44 | 0,28 | 0,29 | 54 | 48 | 55 | 56 | |
| N | 0,13 | 0,11 | 0,06 | 0,06 | 77 | 72 | 74 | 75 | |
| NW | 0,49 | 0,21 | 0,34 | 0,35 | 53 | 60 | 54 | 54 | |
| W | 0,64 | 0,38 | 0,52 | 0,53 | 38 | 47 | 42 | 42 | |
| SW | 0,63 | 0,44 | 0,54 | 0,55 | 53 | 56 | 54 | 55 | |
| HOR | 0,73 | 0,77 | 0,80 | 0,73 | 42 | 40 | 40 | 40 | |

| COIMBRA | | a_{dir} [-] | | | | θ_{dir} [°] | | | |
|-------------|--|------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|--|---|----|
| ATRAVÉS DA: | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | |
| | S | 0,50 | 0,49 | 0,45 | 0,45 | 67 | 67 | 66 | 66 |
| SE | 0,53 | 0,59 | 0,47 | 0,48 | 55 | 55 | 56 | 56 | |
| E | 0,51 | 0,60 | 0,43 | 0,43 | 41 | 37 | 45 | 45 | |
| NE | 0,35 | 0,46 | 0,25 | 0,26 | 54 | 49 | 56 | 56 | |
| N | 0,11 | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 77 | 74 | 74 | 75 | |
| NW | 0,46 | 0,23 | 0,33 | 0,33 | 52 | 61 | 54 | 54 | |
| W | 0,60 | 0,41 | 0,50 | 0,5 | 37 | 48 | 41 | 42 | |
| SW | 0,60 | 0,47 | 0,52 | 0,52 | 54 | 57 | 55 | 55 | |
| HOR | 0,69 | 0,81 | 0,80 | 0,71 | 42 | 39 | 40 | 40 | |

Análise das necessidades nominais de arrefecimento do RCCTE com base no ESP-r e na ISO 13790

| LISBOA | a_{dir} [-] | | | | θ_{dir} [°] | | | |
|-------------|--|------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|--|---|
| ATRAVÉS DA: | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA |
| S | 0,51 | 0,47 | 0,46 | 0,46 | 68 | 68 | 67 | 67 |
| SE | 0,64 | 0,58 | 0,53 | 0,54 | 54 | 55 | 56 | 56 |
| E | 0,68 | 0,60 | 0,52 | 0,53 | 31 | 36 | 42 | 42 |
| NE | 0,58 | 0,47 | 0,36 | 0,37 | 44 | 48 | 53 | 53 |
| N | 0,38 | 0,12 | 0,09 | 0,09 | 74 | 73 | 74 | 74 |
| NW | 0,78 | 0,24 | 0,36 | 0,37 | 43 | 60 | 51 | 51 |
| W | 0,83 | 0,42 | 0,52 | 0,53 | 15 | 48 | 39 | 40 |
| SW | 0,79 | 0,46 | 0,53 | 0,54 | 51 | 57 | 55 | 55 |
| HOR | 0,74 | 0,80 | 0,81 | 0,73 | 43 | 38 | 40 | 40 |

| ÉVORA | a_{dir} [-] | | | | θ_{dir} [°] | | | |
|-------------|--|------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|--|---|
| ATRAVÉS DA: | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA |
| S | 0,54 | 0,50 | 0,45 | 0,45 | 66 | 66 | 65 | 65 |
| SE | 0,59 | 0,59 | 0,52 | 0,51 | 53 | 54 | 54 | 54 |
| E | 0,58 | 0,59 | 0,50 | 0,50 | 39 | 37 | 43 | 43 |
| NE | 0,43 | 0,45 | 0,34 | 0,33 | 54 | 49 | 56 | 56 |
| N | 0,13 | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 78 | 74 | 75 | 75 |
| NW | 0,46 | 0,22 | 0,35 | 0,35 | 53 | 61 | 55 | 55 |
| W | 0,61 | 0,41 | 0,52 | 0,51 | 38 | 48 | 41 | 42 |
| SW | 0,61 | 0,47 | 0,52 | 0,52 | 53 | 56 | 53 | 54 |
| HOR | 0,72 | 0,80 | 0,81 | 0,72 | 43 | 40 | 41 | 41 |

| FARO | a_{dir} [-] | | | | θ_{dir} [°] | | | |
|-------------|--|------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|--|---|
| ATRAVÉS DA: | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA | a) RAD. DIRETA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | b) RAD. GLOBAL & DIFUSA DO SOLTERM | c) RAD. TOTAL MEDIDA & DIFUSA DO CLIMA ESP-r | d) IGUAL A c) S/ VALORES NEGATIVOS DE RAD. DIRETA |
| S | 0,55 | 0,40 | 0,50 | 0,52 | 69 | 69 | 68 | 68 |
| SE | 0,63 | 0,55 | 0,56 | 0,58 | 55 | 56 | 57 | 57 |
| E | 0,64 | 0,60 | 0,55 | 0,57 | 39 | 33 | 43 | 43 |
| NE | 0,51 | 0,51 | 0,39 | 0,40 | 52 | 41 | 55 | 55 |
| N | 0,20 | 0,19 | 0,09 | 0,10 | 77 | 69 | 76 | 76 |
| NW | 0,56 | 0,23 | 0,41 | 0,43 | 52 | 58 | 54 | 54 |
| W | 0,68 | 0,38 | 0,57 | 0,59 | 37 | 47 | 42 | 42 |
| SW | 0,66 | 0,41 | 0,58 | 0,59 | 54 | 58 | 56 | 56 |
| HOR | 0,80 | 0,76 | 0,83 | 0,77 | 41 | 38 | 38 | 38 |

Anexo L - Valores de ganhos com anulação do sombreamento na orientação a norte

Anular apenas o sombreamento a norte aumenta ligeiramente o erro obtido (ξ_{int} : -0,01 → -0,54 e ξ_{ext} : -0,02 → -0,85):

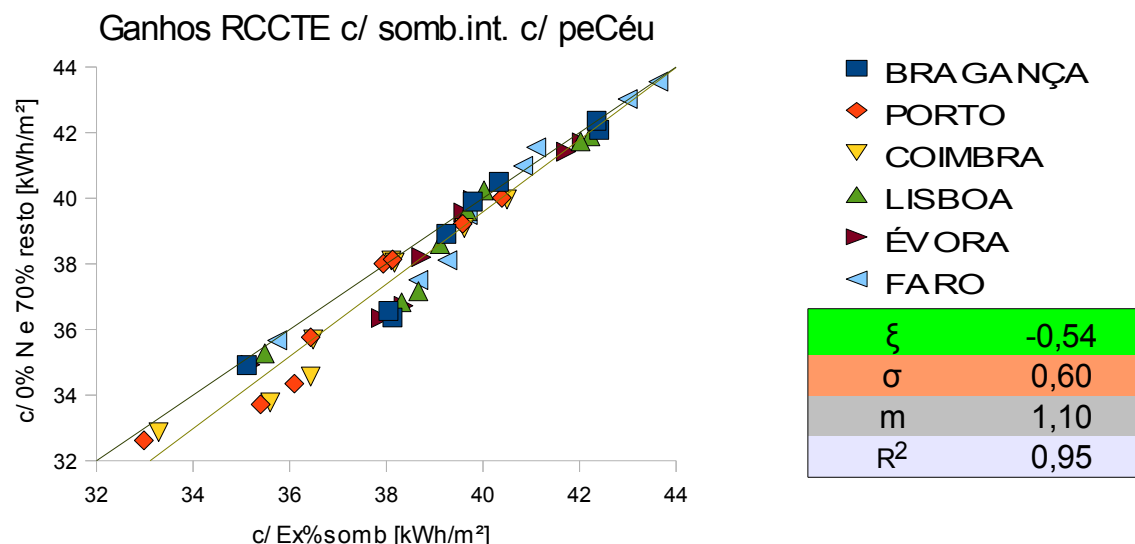


Fig. L.1- Comparação dos ganhos calculados anulando o sombreamento a norte (e mantendo 70% de sombreamento nas restantes orientações) com os ganhos calculados com a percentagem de sombreamento exata (para o caso de sombreamento interior, com perdas radiativas para o céu incluídas).

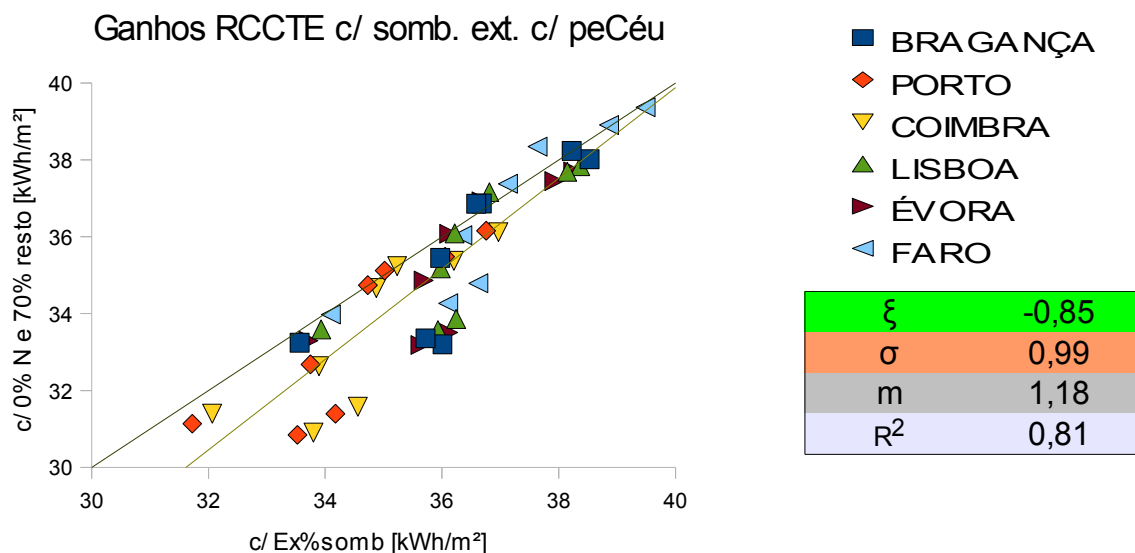


Fig. L.2- Comparação dos ganhos calculados anulando o sombreamento a norte (e mantendo 70% de sombreamento nas restantes orientações) com os ganhos calculados com a percentagem de sombreamento exata (para o caso de sombreamento exterior, com perdas radiativas para o céu incluídas).

Anexo M - Aumento da altura do sótão

Os resultados de N_{vc} , Q_g , Q_p e η_p obtidos através do ESP-r, são aqui apresentados para a moradia original (cujo sótão tem pé direito de 1,62 m) e comparados com os obtidos na moradia análoga, mas com sótão de 6,15 m de pé direito.

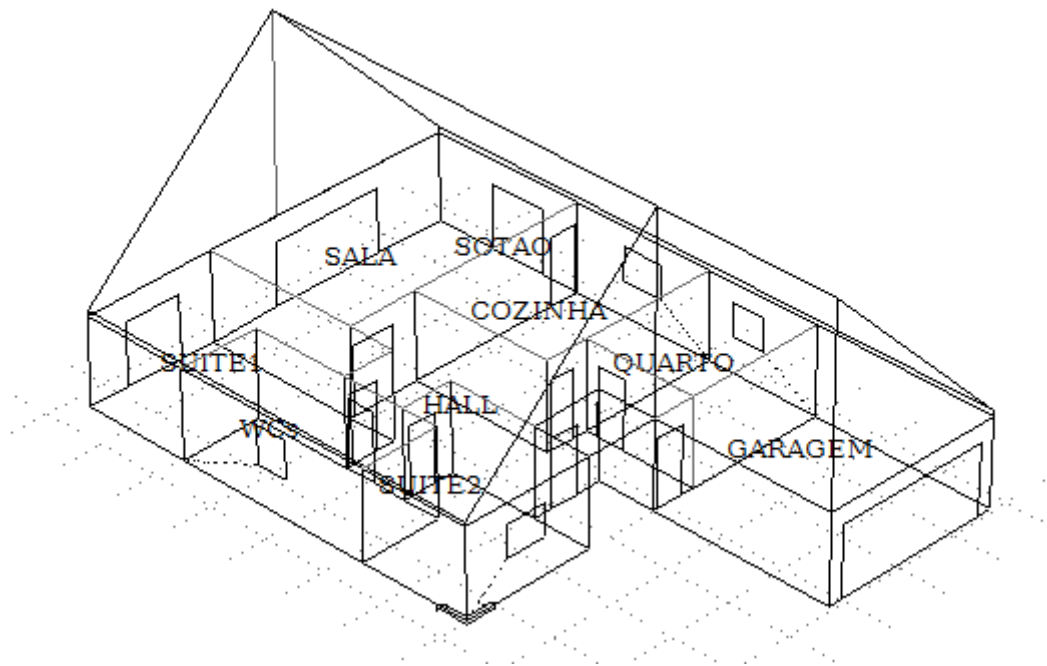


Fig. M1- Moradia com sótão de 6,15 m de pé direito (modelo no ESP-r).

Não foram permitidas trocas de calor pelo solo (considerado adiabático em todas as simulações) e não foi aplicado sombreamento:

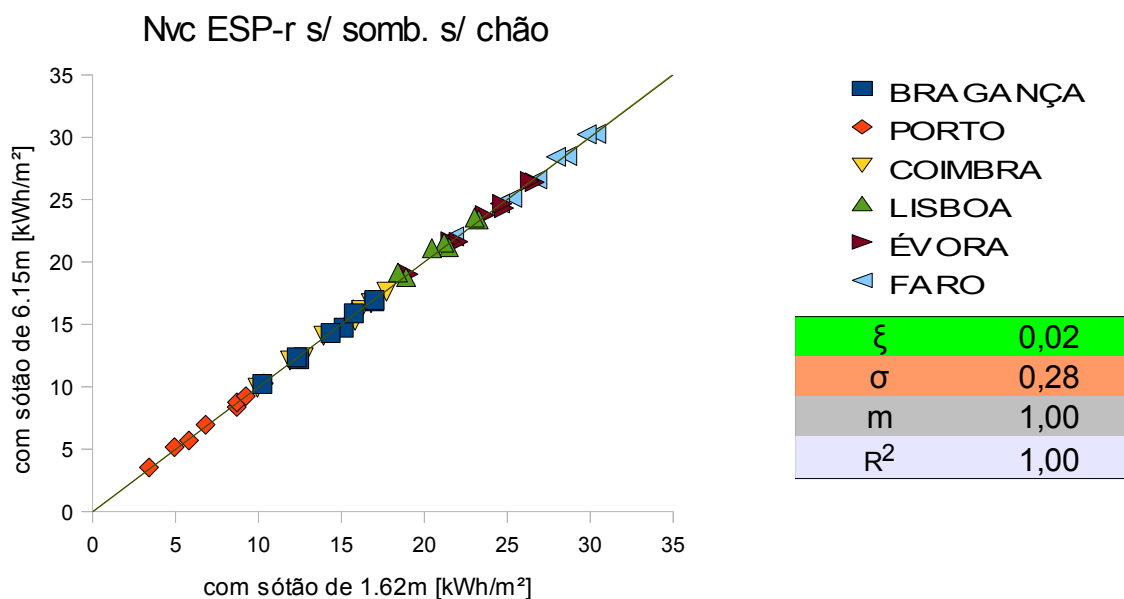


Fig. M2- O aumento do pé direito do sótão tem um efeito desprezável ($\xi = 0,02 \text{ kWh/m}^2$) nos valores de Nvc obtidos pelo ESP-r.

Repare-se que a ligeira diminuição nos ganhos é compensada pela diminuição nas perdas.

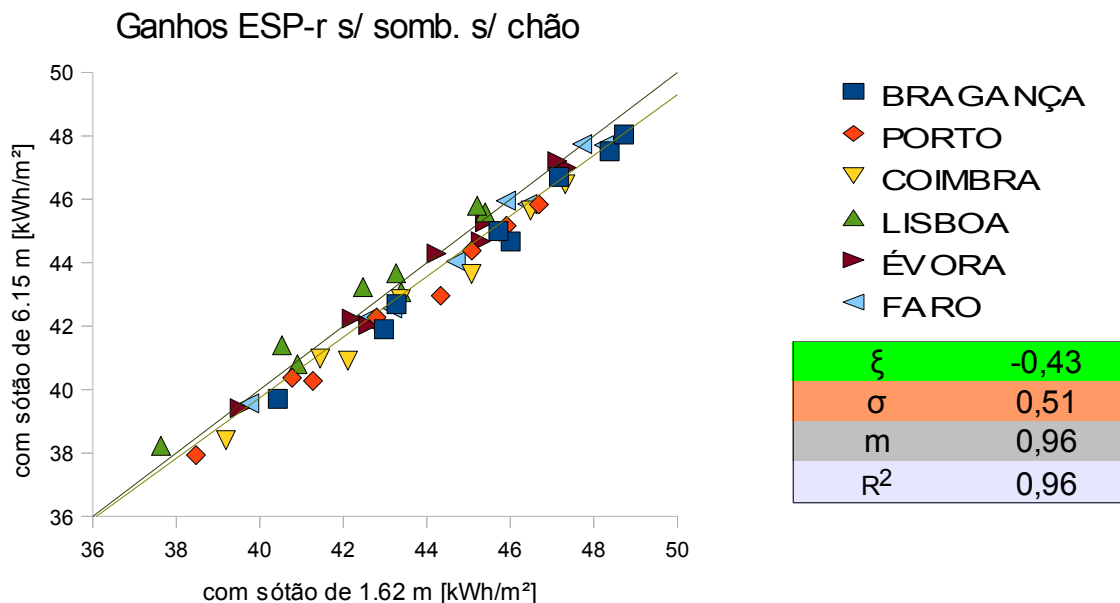


Fig. M3- O aumento do pé direito do sótão provoca uma pequena diminuição ($\xi = -0,43 \text{ kWh/m}^2$) nos ganhos obtidos através do ESP-r.

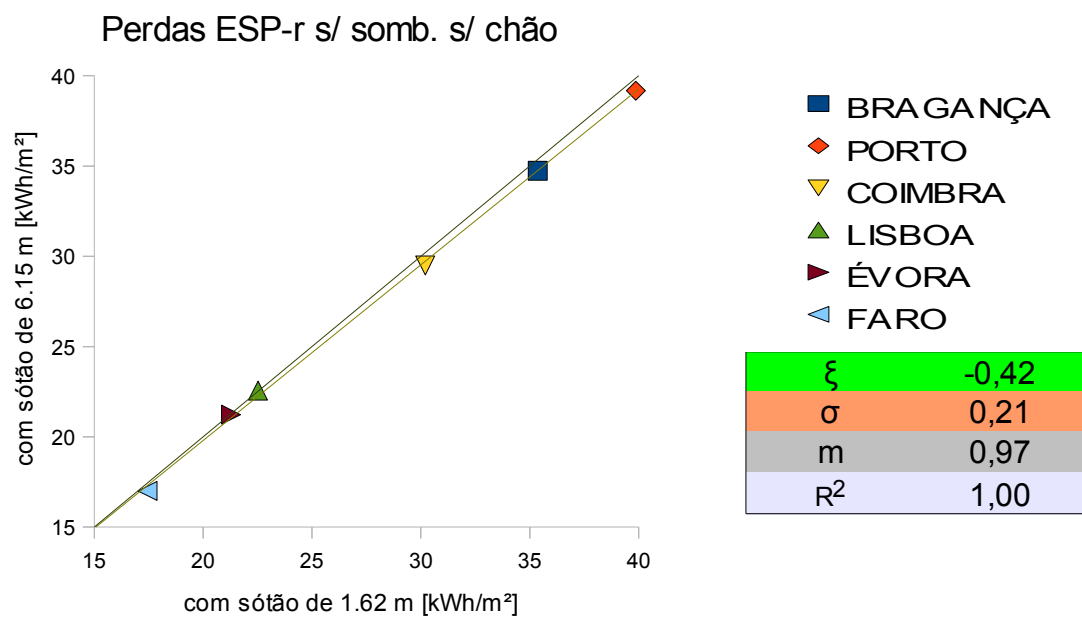


Fig. M4- O aumento do pé direito do sótão provoca uma pequena diminuição ($\xi = -0,42$ kWh/m²) nas perdas (obtidas através do ESP-r).

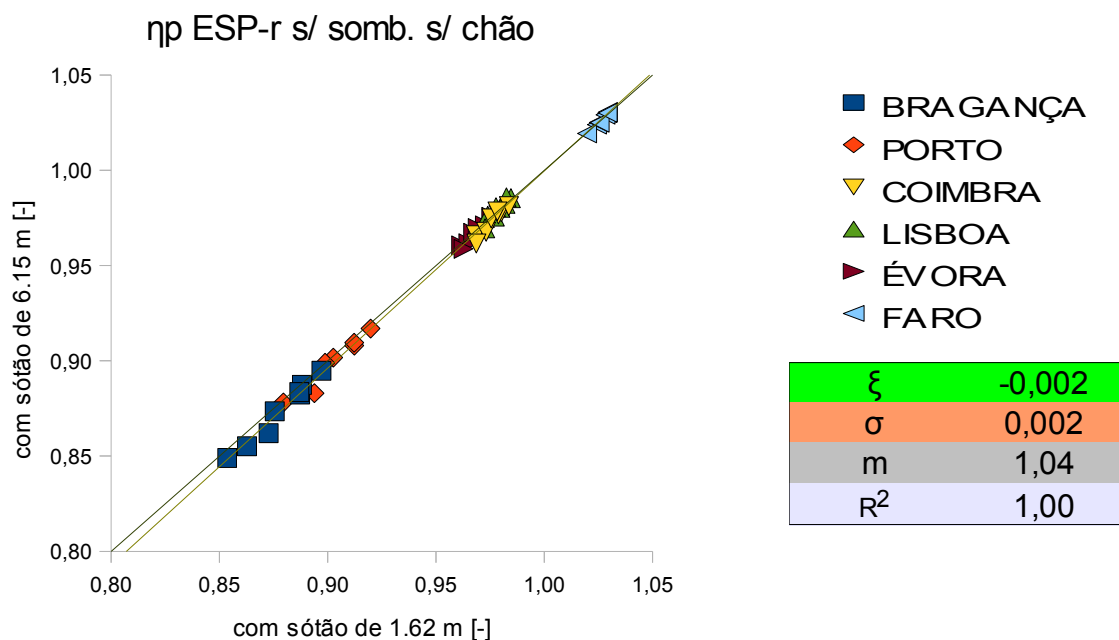


Fig. M5- O aumento do pé direito do sótão tem efeitos desprezáveis ($\xi = -0,002$) no fator de utilização das perdas obtido através do ESP-r.

Anexo N - Temperaturas virtuais do solo (anexo D da ISO 13770)

Esta tabela contém as temperaturas virtuais do solo, calculadas segundo a eq. 9.3 (anexo D da ISO 13370), para todos os climas considerados e meses do ano.

| θ_v [°C] | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maió | Junho | Julho | Agosto | Setembro | Outubro | Novembro | Dezembro |
|-----------------|---------|-----------|-------|-------|------|-------|-------|--------|----------|---------|----------|----------|
| BRAGANÇA | 7,7 | 8,7 | 10,6 | 11,5 | 12,7 | 15,4 | 17,7 | 17,3 | 15,3 | 12,8 | 10,1 | 8,5 |
| PORTO | 11,5 | 12,2 | 12,8 | 13,7 | 14,4 | 16,3 | 17,0 | 17,2 | 16,4 | 15,0 | 13,1 | 12,0 |
| COIMBRA | 12,0 | 12,8 | 13,8 | 14,0 | 15,5 | 17,4 | 18,5 | 18,6 | 18,3 | 16,2 | 13,5 | 13,0 |
| LISBOA | 13,0 | 13,5 | 14,3 | 15,3 | 16,9 | 18,5 | 19,8 | 19,9 | 19,1 | 17,2 | 14,8 | 13,3 |
| ÉVORA | 11,8 | 12,6 | 13,9 | 14,3 | 16,6 | 18,1 | 19,7 | 19,9 | 19,3 | 16,6 | 13,7 | 12,8 |
| FARO | 14,3 | 14,7 | 16,1 | 16,6 | 18,2 | 19,7 | 21,3 | 21,1 | 20,1 | 19,1 | 16,5 | 15,1 |

Anexo O - Gráficos referentes aos dados estatísticos do quadro 10.2

Este anexo apresenta os gráficos que deram origem aos dados estatísticos da parte inferior do quadro 10.2. Referem-se à comparação dos valores calculados de η_p com os obtidos através do ESP-r, resultantes da consideração do anexo D da ISO13370 na modelação do chão (capítulo 9.7.1).

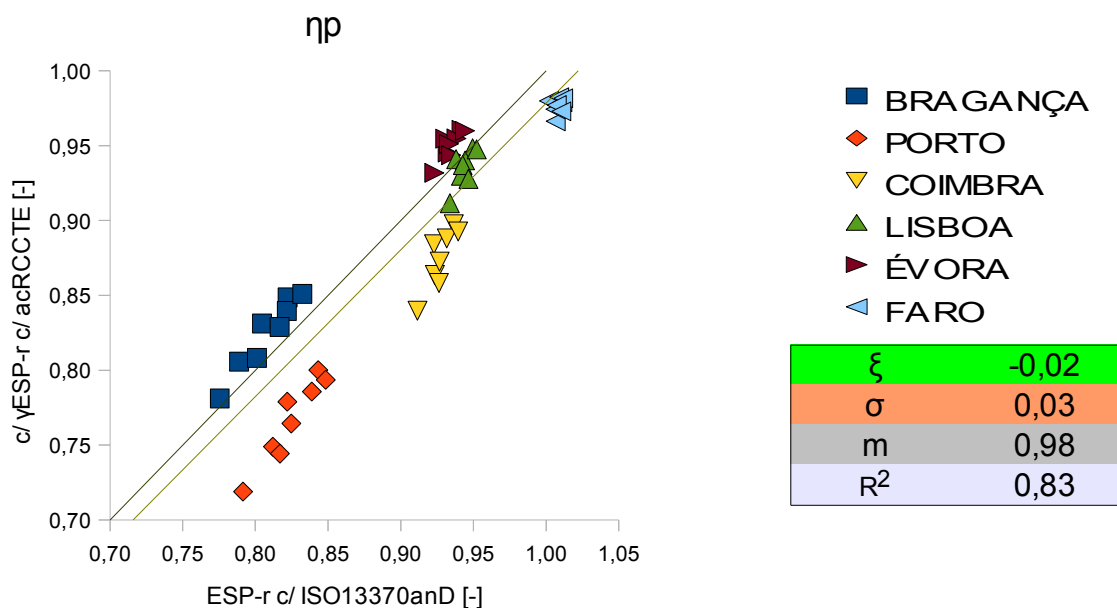


Fig. O.1- Comparação de η_p , calculado com a_c do RCCTE ($a_c = 4,2$) e γ do ESP-r, com η_p obtido através do ESP-r (considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370).

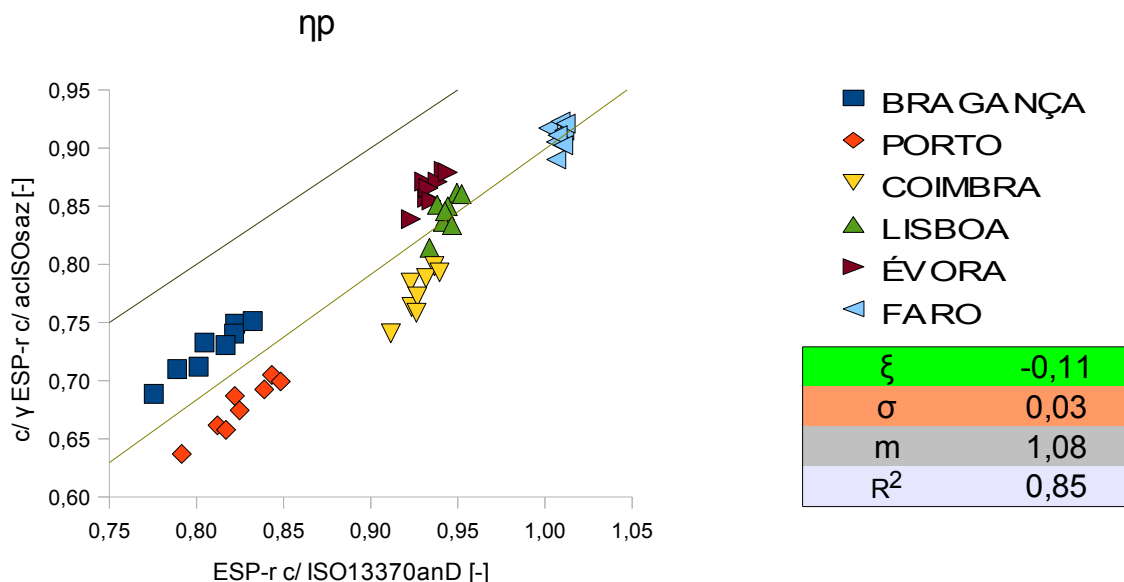


Fig. O.2- Comparação de η_p , calculado com o valor de a_c dado pela aproximação sazonal da ISO 13790 ($a_c = 2,47$) e γ do ESP-r, com η_p obtido pelo ESP-r (considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370).

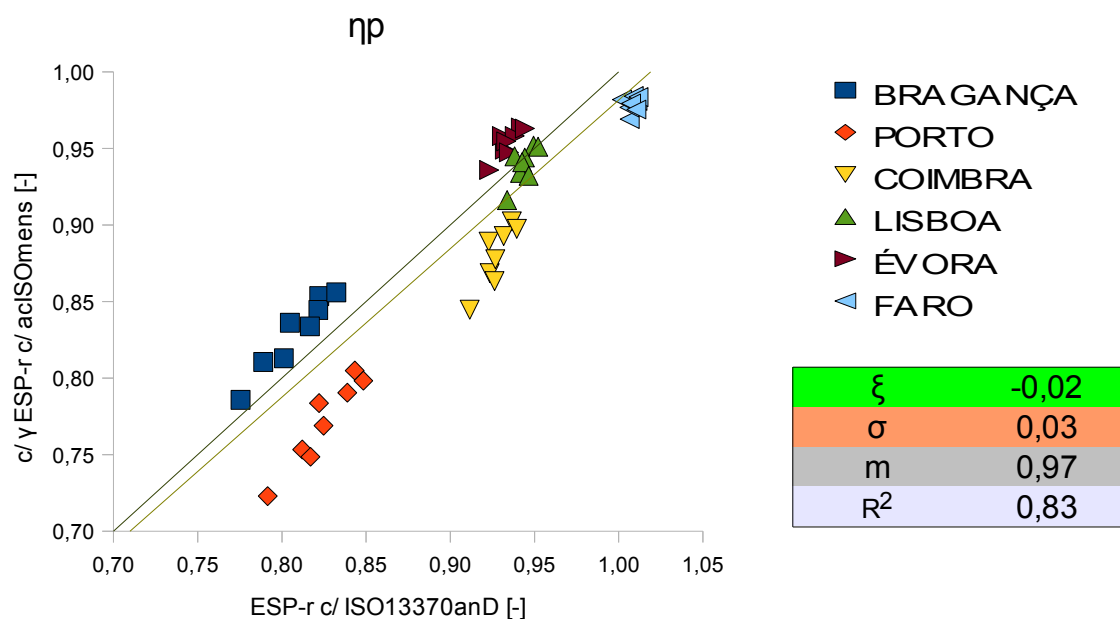


Fig. O.3- Comparação de η_p , calculado com a_c dado pela aproximação mensal da ISO 13790 ($a_c = 4,34$) e γ do ESP-r, com η_p obtido pelo ESP-r (considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370).

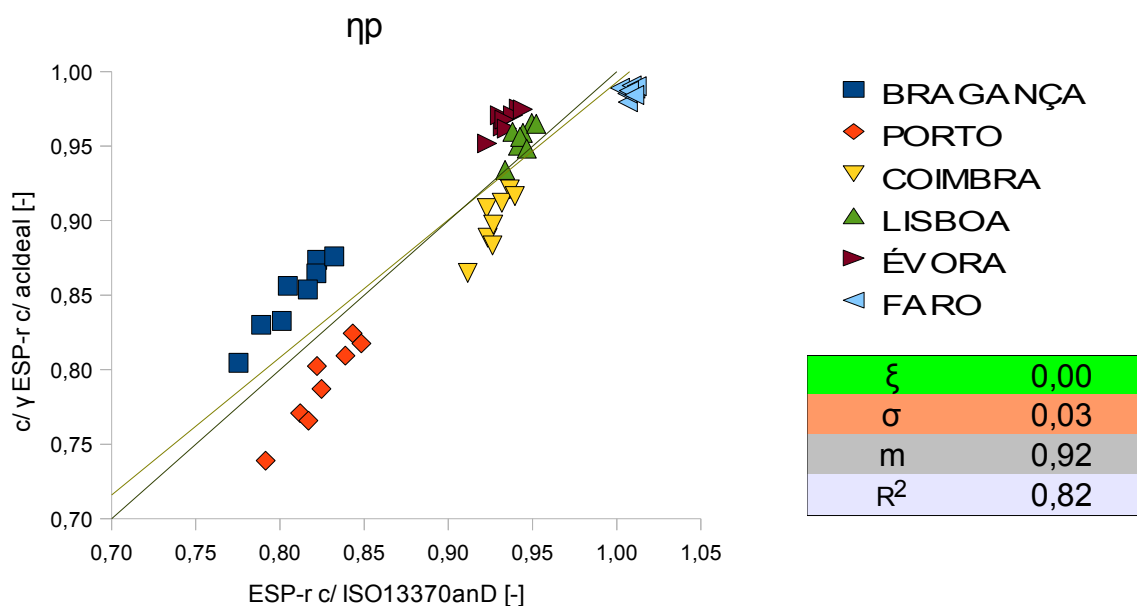


Fig. O.4- Comparação de η_p , calculado com γ do ESP-r e a_c correspondente à situação de desfazamento médio nulo (entre η_p calculado e η_p obtido pelo ESP-r, que neste caso acontece se $a_c = 4,96$), com η_p obtido pelo ESP-r (considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370).

Anexo P - Gráficos referentes aos dados estatísticos do quadro 11.1

Este anexo contém os gráficos relativos aos dados estatísticos da metade direita do quadro 11.1.

Nvc calculado com perdas radiativas para o céu (sombreamento interior):

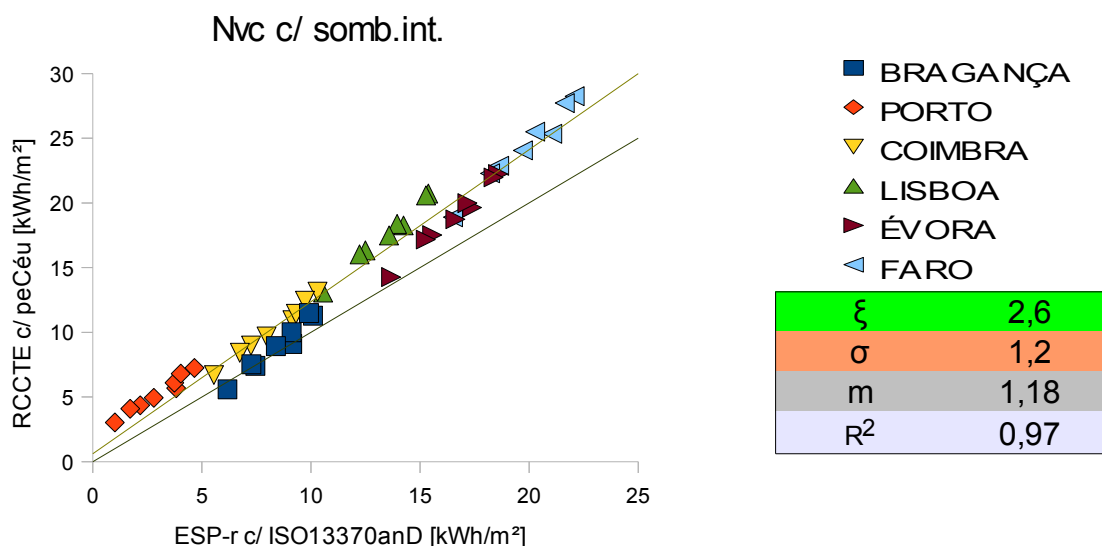


Fig. P1- Nvc sujeito a sombreamento interior, calculado com perdas radiativas para o céu, vs Nvc obtido pelo ESP-r (com chão modelado segundo o anexo D da ISO 13370).

Nvc calculado com perdas pelo solo (sombreamento interior):

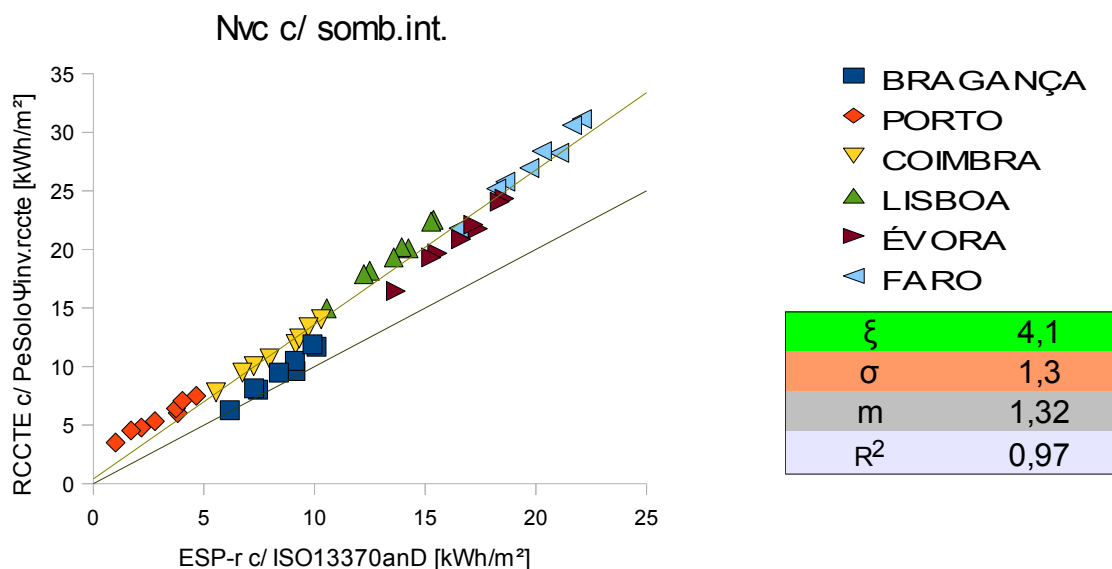


Fig. P2- Nvc sujeito a sombreamento interior, calculado com perdas pelo solo segundo o método do RCCTE para o inverno, vs Nvc obtido pelo ESP-r (considerando os pressupostos do anexo D da ISO 13370 na modelação do chão).

Anexo Q - Gráficos relativos à inclusão separada de cada fator corretivo analisado.

Este anexo estima a influência de cada fator corretivo no resultado calculado de N_{vc} , tendo em conta os dois tipos de sombreamento considerados. Tem-se assim, para as perdas radiativas para o céu, no caso do sombreamento ser interior:

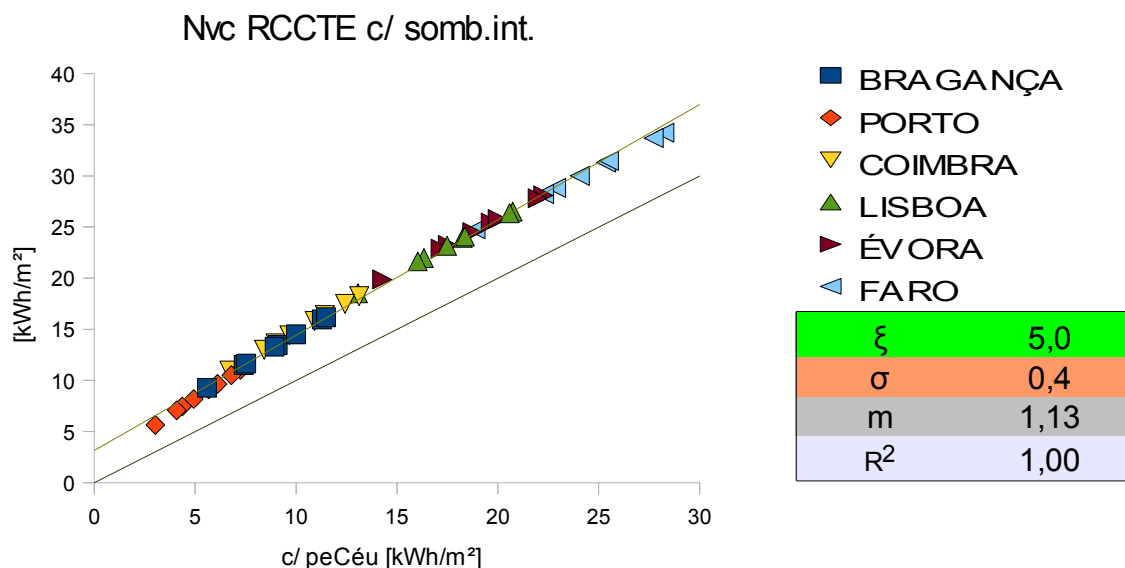


Fig. Q.1- N_{vc} original (com sombreamento interior) vs N_{vc} corrigido com perdas radiativas para o céu.

E no sombreamento exterior:

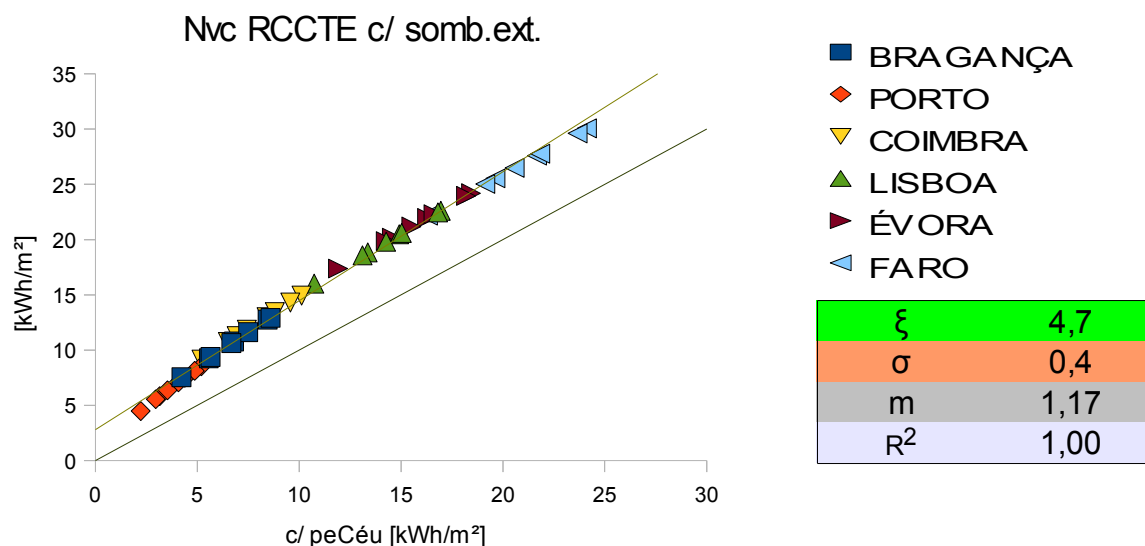


Fig. Q.2- N_{vc} original (com sombreamento exterior) vs N_{vc} corrigido com perdas radiativas para o céu.

Seguem-se as perdas pelo solo,

Para o sombreamento interior:

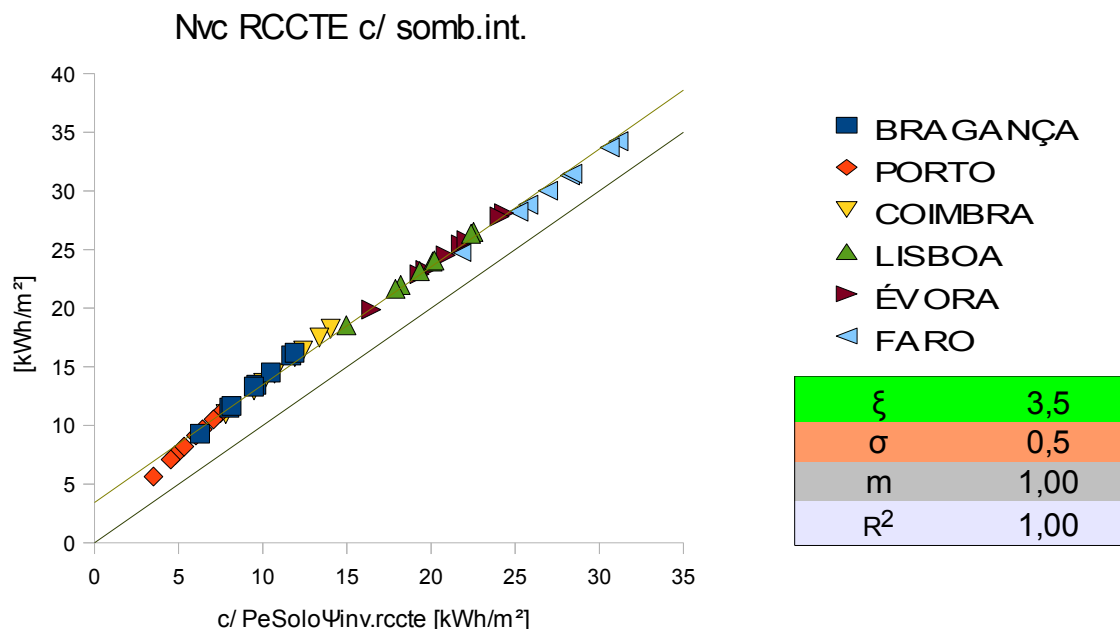


Fig. Q.3- Nvc original (com sombreamento interior) vs Nvc corrigido com perdas pelo solo (segundo o método usado pelo RCCTE no inverno).

Para o sombreamento exterior:

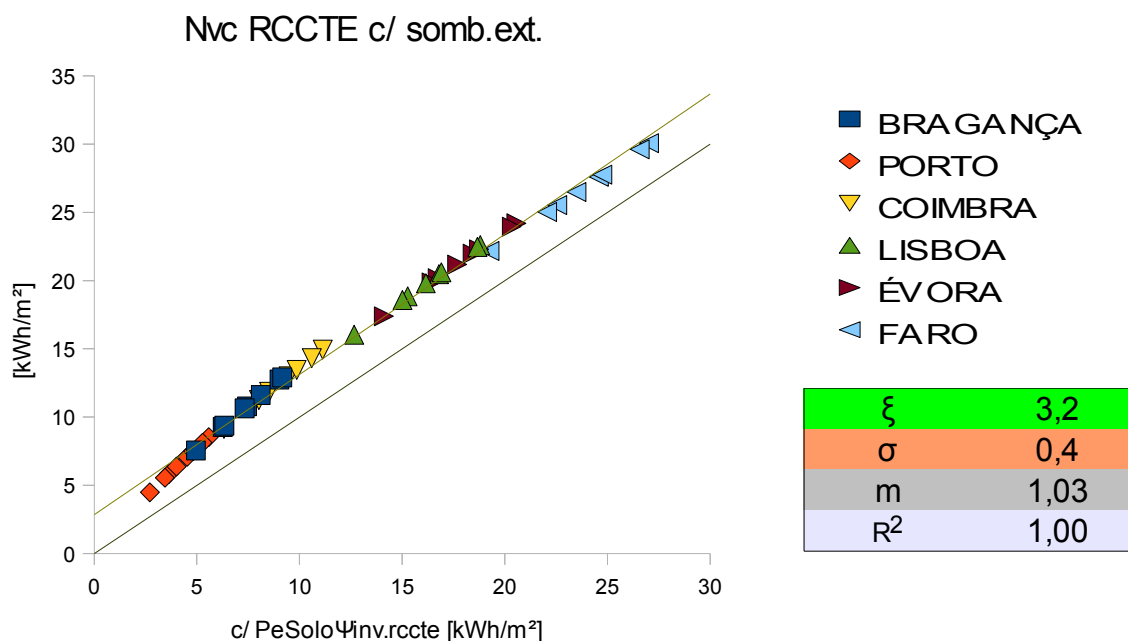


Fig. Q.4- Nvc original (com sombreamento exterior) vs Nvc corrigido com perdas pelo solo (segundo o método usado pelo RCCTE no inverno).

Apresentam-se agora as perdas pela garagem, no caso do sombreamento ser interior:

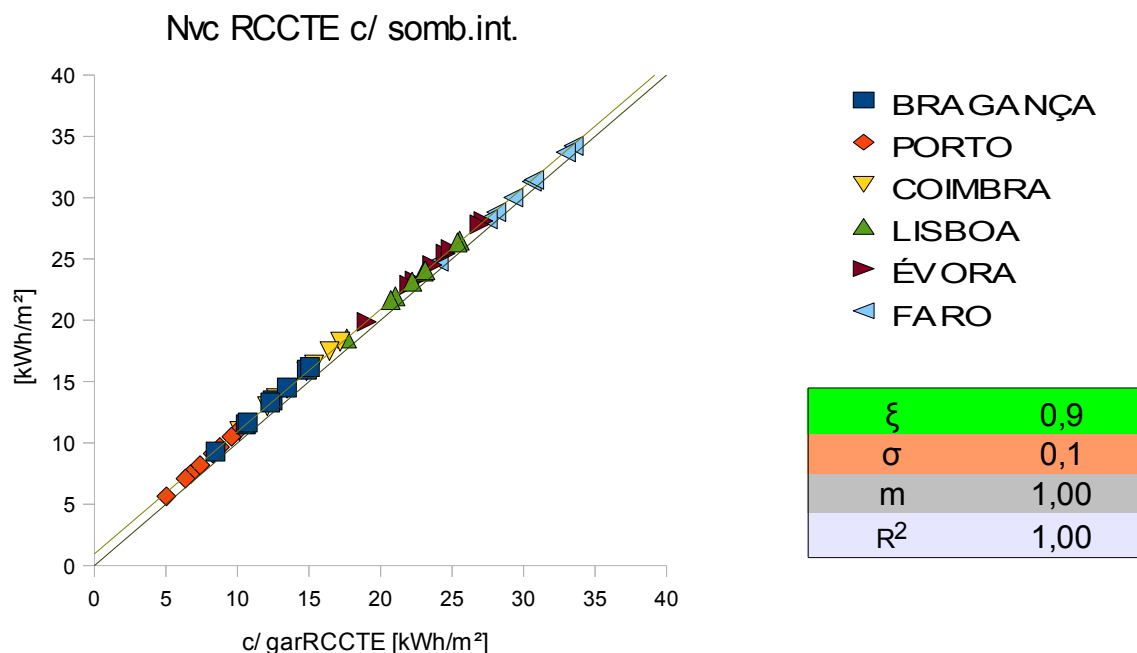


Fig. Q.5- Nvc original (com sombreamento interior) vs Nvc corrigido com perdas pela garagem (segundo o valor de τ aplicado pelo RCCTE no inverno, $\tau = 0,8$).

E para o sombreamento exterior:

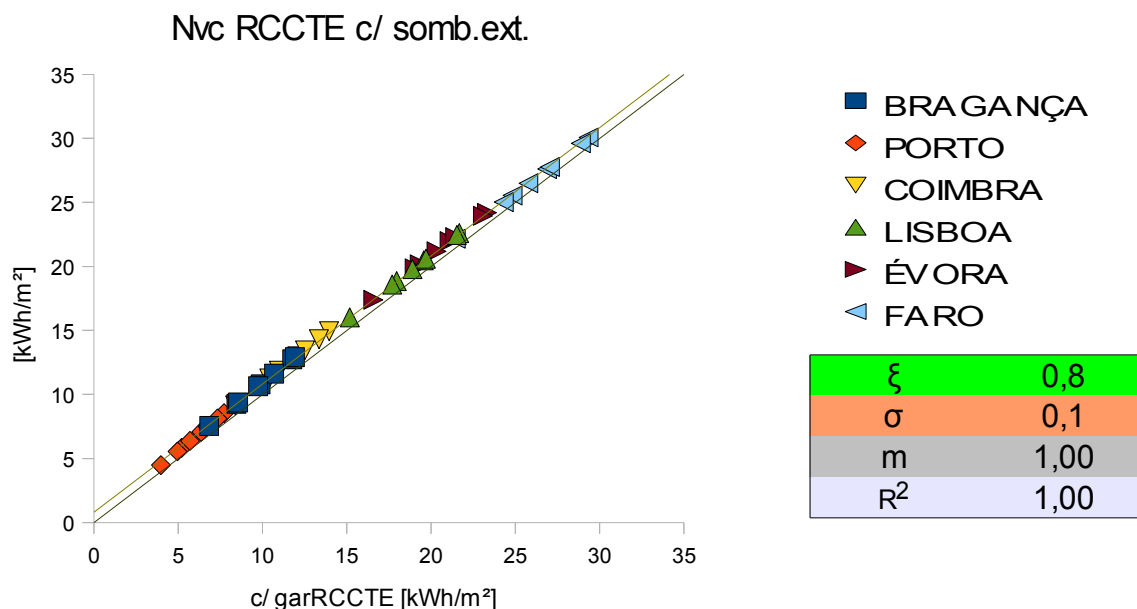


Fig. Q.6- Nvc original (com sombreamento exterior) vs Nvc corrigido com perdas pela garagem (segundo o valor de τ aplicado pelo RCCTE no inverno, $\tau = 0,8$).

Segue-se, finalmente, o cálculo pormenorizado da energia solar pelos envidraçados (com fator solar pormenorizado e percentagem de sombreamento exata, ver capítulo 8.7), para o sombreamento interior:

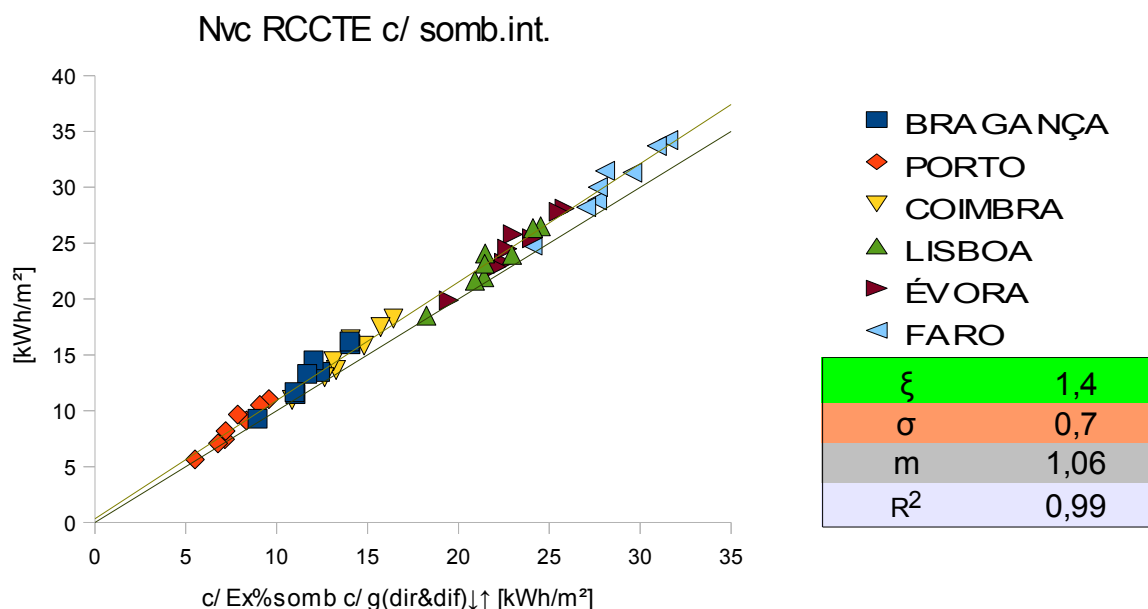


Fig. Q.7- Nvc original (com sombreamento interior) vs Nvc calculado com fator solar pormenorizado e percentagens de sombreamento exatas.

E para o caso de sombreamento exterior:

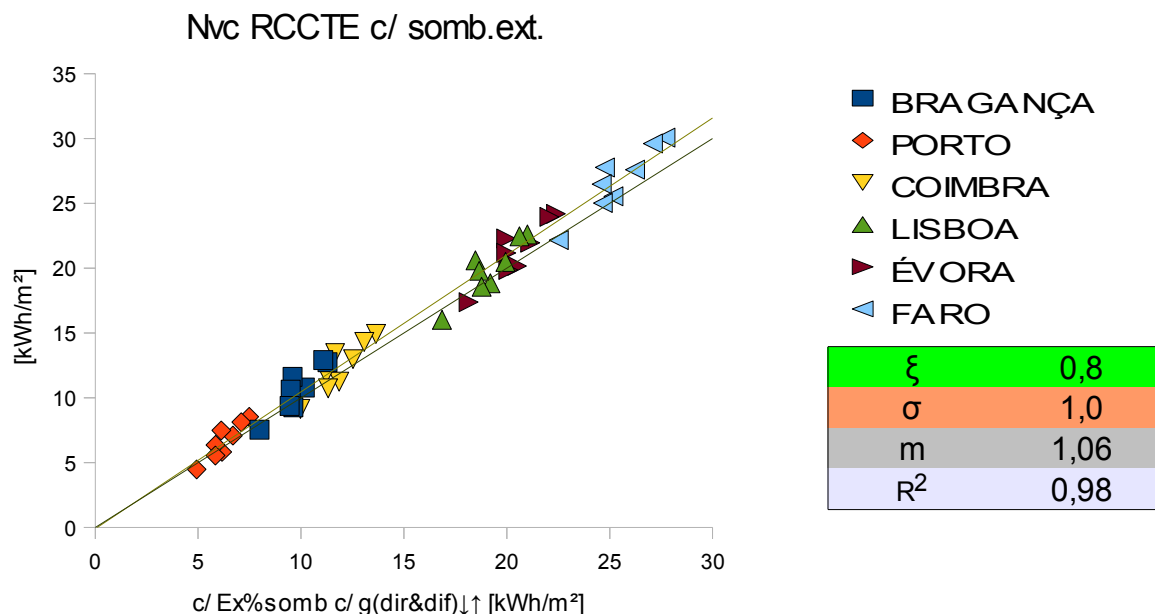


Fig. Q.8- Nvc original (com sombreamento exterior) vs Nvc calculado com fator solar pormenorizado e percentagens de sombreamento exatas.