

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



Contributo das estratégias passivas de arrefecimento  
no cálculo das necessidades da Norma ISO 13790:  
Método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR)

Ana Isabel Freire Nunes

Dissertação

Mestrado Integrado de Engenharia da Energia e do Ambiente

2012



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



Contributo das estratégias passivas de arrefecimento  
no cálculo das necessidades da Norma ISO 13790:  
*Método Passive Cooling Load Ratio (PCLR)*

Ana Isabel Freire Nunes

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Trabalho realizado sob a supervisão de  
Doutora Marta Oliveira Panão (LNEG)

2012



## Resumo

O método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR) é um método simplificado que pretende caracterizar sistemas passivos de arrefecimento e apresentar um valor estimado das necessidades médias mensais de um edifício, quando se encontra instalado um destes sistemas. O método depende do tipo de sistema passivo de arrefecimento, das suas dimensões e das condições climáticas do local onde se encontra o edifício. O método PCLR apresentado tem por base o método *Solar Load Ratio* (SLR), que permite caracterizar sistemas passivos de aquecimento, e permite demonstrar a possibilidade de aplicar o conceito do método SLR a sistemas passivos de arrefecimento, através dos parâmetros inovadores *PCLR* e *PCF*.

O método PCLR permite estimar as necessidades de arrefecimento sem recorrer a modelos complexos de simulação, quando não são necessários resultados de elevada exatidão. Foram considerados dois tipos de sistemas de arrefecimento passivo, um sistema de tubos enterrados e um sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar. Tendo em consideração que o erro médio apresentado para os sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar se encontra entre os 2 e os 5 %, sendo o erro máximo de 21 %, é possível afirmar que o método calcula o que é desejado com a aproximação que se exige a um método simplificado. Os desvios máximos correspondem a climas com temperaturas médias exteriores superiores a 21 °C, sendo que para valores inferiores o método apresenta resultados com menores erros. Para o caso do sistema de tubos enterrados os resultados são mais favoráveis, o erro médio obtido é de 4 % e o máximo é de 13 %.

Este método simplificado pode acrescentar o contributo de algumas estratégias de arrefecimento passivo no cálculo das necessidades da Norma EN ISO 13790.

**Palavras-chave:** Sistemas Passivos de Arrefecimento, Método PCLR, Modelo 5R1C, Tubos Enterrados, Chaminé Solar.



## Abstract

The *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR) method presented is a simplified method that allows the characterization of passive cooling systems and presents an estimated value for the mean monthly cooling energy needs of a building where a passive system is installed. The method depends on the local climate, the system type and its dimensions. This method is based on *Solar Load Ratio* (SLR) method, that characterizes passive heating systems, and shows the possibility of applying SLR's method concept to passive cooling systems, using the innovative parameters *PCLR* and *PCF*.

The PCLR method can be used to estimate the cooling energy needs without using complex models for simulation when there is no need for exact results. In this work two passive cooling systems were considered, one based on an air to soil heat exchanger and another based on the combination of an air to soil heat exchanger with a solar chimney. The mean error obtained, for the systems combining the air to soil heat exchanger and the solar chimney, was between 2 and 5 % and the maximum error was 21 %. The maximum deviations were found for climates with external mean temperature higher than 21 °C, which means that for a climate with lower temperatures the results are more accurate. For air to soil heat exchanger systems the results were better than for the other systems, the mean error was 4 % and the maximum was 13 %. Considering these results, the method estimates the cooling energy needs with the approximation required to simplified methods.

PCLR method can be used to add the passive cooling strategies to EN ISO 13790.

**Keywords:** Passive Cooling Systems, PCLR method, 5R1C model, Earth to air heat exchanger, Solar Chimney.



# Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	1
1.3	Estrutura .....	2
1.4	Motivação e contribuição original.....	2
2.	Fatores que afetam as necessidades de arrefecimento.....	3
2.1	Conforto térmico .....	3
2.2	Localização do edifício .....	3
2.3	Tipo de utilização do edifício .....	3
2.4	Orientação, morfologia e cor do edifício.....	4
2.5	Massa térmica e isolamento do edifício .....	4
3.	Estratégias de arrefecimento passivo.....	5
3.1	Controlo de ganhos solares.....	5
3.2	Ventilação natural.....	5
3.3	Arrefecimento pelo solo .....	6
3.4	Arrefecimento radiativo .....	7
3.5	Modificação do micro clima e arrefecimento evaporativo.....	7
4.	Modelação de sistemas de arrefecimento passivo .....	8
4.1	Cálculo de radiação incidente num determinado plano.....	8
4.2	Condições climáticas.....	10
4.3	Sistemas modelados .....	11
4.3.1	Modelo numérico de um tubo enterrado .....	11
4.3.2	Modelo numérico de uma chaminé solar.....	14
4.4	Cálculo das necessidades de arrefecimento – Modelo 5R1C .....	19
5.	Métodos simplificados de caracterização de sistemas passivos – Métodos <i>Load Ratio</i> .....	27
5.1	Método <i>Solar Load Ratio</i> (SLR) .....	27
5.2	Método <i>Passive Cooling Load Ratio</i> (PCLR) .....	28

5.2.1	Sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar .....	29
5.2.2	Sistemas de tubos enterrados.....	31
6.	Resultados .....	32
6.1	Exemplo de um sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar .....	32
6.2	Sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar .....	35
6.3	Sistemas de tubos enterrados.....	48
7.	Conclusão .....	52
8.	Referências .....	54
9.	Anexos.....	57

## Índice de Figuras

Fig. 3.1 – Representação esquemática de uma chaminé solar.....	6
Fig. 4.1 – Representação do sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, instalado num gabinete. ....	11
Fig. 4.2 – Representação esquemática do tubo enterrado, secção radial (a) e secção longitudinal (b) (Hollmuller 2003).....	12
Fig. 4.3 – Representação da chaminé solar. ....	14
Fig. 4.4 – Esquema da rede de condutâncias (a) e rede equivalente de acordo com a Norma (b). ....	19
Fig. 6.1 – Temperaturas do ar interior com sistema passivo de arrefecimento, do ar no interior da chaminé solar e do ar de ventilação (a). Temperaturas do ar exterior e do ar interior com e sem sistema instalado e temperatura do ar de ventilação (b).....	32
Fig. 6.2 – Perfil do caudal de renovação do ar resultante do efeito da chaminé solar (a) e da radiação incidente no plano da chaminé solar (b).....	33
Fig. 6.3 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ e respetivos ajustes exponenciais para o clima de Lisboa. ....	36
Fig. 6.4 – Conjunto de todos os pontos $B$ em função da temperatura exterior média mensal e respetivo ajuste exponencial. ....	37
Fig. 6.5 – Resultados de $PCF$ em função de $PCLR$ (a), $PCF$ em função de $PCLR^*$ , e respetivo ajuste exponencial, (b) de todos os meses para todos os climas. ....	37
Fig. 6.6 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.....	38
Fig. 6.7 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método $PCLR$ e representação das retas dos desvios máximos absolutos. ....	39
Fig. 6.8 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Lisboa. ....	40
Fig. 6.9 – Conjunto de todos os pontos $B$ em função da temperatura média mensal e respetivo ajuste exponencial.....	41
Fig. 6.10 – Resultados de $PCF$ em função de $PCLR$ (a), $PCF$ em função de $PCLR^*$ , e respetivo ajuste exponencial, (b) de todos os meses para todos os climas. ....	41
Fig. 6.11 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.....	42
Fig. 6.12 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método $PCLR$ e representação das retas dos desvios máximos absolutos. ....	43
Fig. 6.13 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Lisboa. ....	44

Fig. 6.14 – Conjunto de todos os pontos $B$ em função da temperatura média mensal e respetivo ajuste exponencial.....	45
Fig. 6.15 – Resultados de $PCF$ em função de $PCLR$ (a), $PCF$ em função de $PCLR^*$ , e respetivo ajuste exponencial, (b) de todos os meses para todos os climas.....	45
Fig. 6.16 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.....	46
Fig. 6.17 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método $PCLR$ e representação das retas dos desvios máximos absolutos.....	47
Fig. 6.18 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Lisboa.....	49
Fig. 6.19 – Curva do parâmetro de ajuste $B$ em função da temperatura exterior média mensal.....	49
Fig. 6.20 – $PCF$ em função de $PCLR$ (à esquerda) e $PCF$ em função do $PCLR^*$ (à direita).....	50
Fig. 6.21 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.....	51
Fig. 6.22 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método $PCLR$ e representação das retas dos desvios máximos absolutos.....	51
Fig. 9.1 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.1 e 0.2 m).....	57
Fig. 9.2 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.1 e 0.2 m).....	57
Fig. 9.3 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.1 e 0.2 m).....	58
Fig. 9.4 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.1 e 0.2 m).....	58
Fig. 9.5 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.1 e 0.2 m).....	59
Fig. 9.6 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.2 e 0.3 m).....	60
Fig. 9.7 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.2 e 0.3 m).....	60
Fig. 9.8 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.2 e 0.3 m).....	61
Fig. 9.9 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.2 e 0.3 m).....	61
Fig. 9.10 – Curvas mensais de $PCF$ em função de $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.2 e 0.3 m).....	62

Fig. 9.11 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.3 e 0.4 m) .....	63
Fig. 9.12 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.3 e 0.4 m) .....	63
Fig. 9.13 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.3 e 0.4 m) .....	64
Fig. 9.14 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.3 e 0.4 m).....	64
Fig. 9.15 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro. (Sistemas com $e_{SC}$ entre 0.3 e 0.4 m).....	65
Fig. 9.16 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. ....	66
Fig. 9.17 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. ....	66
Fig. 9.18 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. ....	67
Fig. 9.19 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora.....	67
Fig. 9.20 – Curvas mensais de <i>PCF</i> em função de <i>PCLR</i> , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro.....	68



## Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Características geográficas, radiação média mensal incidente num plano com 50° de inclinação e condições climáticas dos locais.....	10
Tabela 4.2 – Inclinação ótima da chaminé solar em função da latitude do local (Khanal e Chengwang 2010).....	15
Tabela 4.3 – Características dos constituintes da chaminé solar.....	18
Tabela 4.4 – Valores padrão para a área de massa efetiva e capacitância térmica do edifício segundo a sua classe de inércia (EN ISO 13790 2007). ....	21
Tabela 4.5 – Características do edifício de referência.....	26
Tabela 5.1 – Intervalos de validade dos parâmetros característicos do sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar. ....	29
Tabela 5.2 – Coeficientes $a_n$ , $b_n$ e $c$ para o sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar..	30
Tabela 5.3 – Coeficientes $a_n$ , $b_n$ e $c$ para o sistema de tubos enterrados. ....	31
Tabela 5.4 – Intervalos de validade dos parâmetros característicos do sistema de tubos enterrados. ...	31
Tabela 6.1 – Características do sistema de arrefecimento passivo.....	32
Tabela 6.2 – Comparação dos resultados do método PLCR e do modelo de simulação para um sistema passivo de arrefecimento em particular.....	34

## Lista de Acrónimos

EAHE: <i>Earth to Air Heat Exchanger</i> , 6
ILD: <i>Internal-load-dominated</i> , 3
NZEB: <i>Net-Zero Energy Building</i> , 1
PCF: <i>Passive Cooling Fraction</i> , 2
PCLR: <i>Passive Cooling Load Ratio</i> , 1
RPH: <i>Renovações Por Hora</i> , 22
SLD: <i>Skin-load-dominated</i> , 3
SLR: <i>Solar Load Ratio</i> , 5, 7, 1



# Nomenclatura

## Capítulo 4.1

$AST$	Hora solar verdadeira [h]
$D$	Radiação difusa incidente no plano horizontal [ $W.m^{-2}$ ]
$DST$	Hora legal [h]
$ET$	Equação do tempo [h]
$F_{sky}$	Fator visual do céu
$F_{soil}$	Fator visual do solo
$G$	Radiação global incidente no plano horizontal [ $W.m^{-2}$ ]
$I_{dif}$	Componente difusa da radiação incidente numa superfície [ $W.m^{-2}$ ]
$I_{dir}$	Componente direta da radiação incidente numa superfície [ $W.m^{-2}$ ]
$I_{ref}$	Componente refletida da radiação incidente numa superfície [ $W.m^{-2}$ ]
$I_{surf}$	Radiação incidente numa determinada superfície [ $W.m^{-2}$ ]
$J$	Dia juliano
$K_{\perp}$	Radiação direta incidente num plano perpendicular aos raios solares [ $W.m^{-2}$ ]
$LON$	Longitude do local [ $^{\circ}$ ]
$LSM$	Meridiano local [ $^{\circ}$ ]
$LST$	Hora local <i>standard</i> [h]
$\alpha$	Altitude solar [rad]
$\beta$	Inclinação da superfície [rad]
$\gamma$	Ângulo entre o azimute da superfície e do sol [rad]
$\delta$	Declinação solar [rad]
$\theta$	Ângulo entre a radiação direta e o vetor normal à superfície [rad]
$\lambda$	Latitude do local [rad]
$\rho_{soil}$	Refletividade do solo, $\rho_{soil} = 0.25$
$\varphi$	Azimute do sol [rad]
$\psi$	Azimute da superfície [rad]
$\omega$	Ângulo horário [rad]

## Capítulo 4.3.1

$a_s$	Difusidade térmica do solo [ $m^2.s^{-1}$ ]
$cp_a$	Capacidade térmica do ar, $cp_a = 1005 J.kg^{-1}.K^{-1}$ a 298 K.
$cp_s$	Capacidade térmica do solo [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]
$h$	Coefficiente de ajuste da amplitude do sinal de entrada [ $W.K^{-1}.m^{-2}$ ]
$h_a$	Coefficiente de transferência de calor entre o ar e o tubo [ $W.K^{-1}.m^{-2}$ ]
$h_s$	Coefficiente de transferência de calor entre o tubo e o solo [ $W.K^{-1}.m^{-2}$ ]

$h_r^*$	Valor complexo do coeficiente de transferência de calor correspondente ao ajuste da amplitude e da fase do sinal
$k$	Coeficiente de ajuste da frequência do sinal de entrada [ $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ]
$\dot{m}_a$	Caudal mássico de ar [ $\text{kg.s}^{-1}$ ]
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$r$	Distância radial [m]
$r_0$	Raio do tubo [m]
$R_0$	Raio do tubo e do solo [m]
$Re$	Número de Reynolds
$t$	Tempo [s]
$T_a$	Temperatura do ar [K]
$T_a _{x=0}$	Perfil de temperatura do ar à entrada do tubo [K]
$T_s$	Temperatura do solo [K]
$v$	Velocidade do ar no tubo [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
$x$	Comprimento do tubo [m]
$\delta$	Profundidade de penetração do calor no solo [m]
$\Delta R_0$	Espessura de solo [m], $\Delta R_0 = R_0 - r_0$
$\theta_{a0}$	Amplitude da primeira harmónica do sinal de temperatura de entrada [K]
$\lambda_a$	Condutividade térmica do ar, $\lambda_a = 0.025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a 298 K
$\lambda_s$	Condutividade térmica do solo, $\lambda_s = 1.9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a 300 K
$\mu_a$	Viscosidade do ar [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ]
$\rho_a$	Massa volúmica do ar [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
$\rho_s$	Massa volúmica do solo [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
$\omega$	Frequência angular do perfil sinusoidal da temperatura do ar de entrada [ $\text{rad.s}^{-1}$ ]

### Capítulo 4.3.2

$a$	Absortância
$A$	Área [ $\text{m}^2$ ]
$C_D$	Coeficiente de descarga, $C_D = 0.57$
$cp_{air}$	Capacidade térmica do ar, $cp_{air} = 1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a 298 K.
$e_{SC}$	Espessura da chaminé solar [m]
$e_g$	Espessura do vidro [m]
$g$	Aceleração da gravidade, $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$
$h$	Coeficiente de transferência de calor [ $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ]
$I$	Radiação incidente na chaminé solar [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$K$	Coeficiente de extinção do vidro [ $\text{m}^{-1}$ ]
$l_{SC}$	Altura da chaminé solar [m]

$n_1$	Índice de refração do ar, $n_1 = 1$
$n_2$	Índice de refração do vidro
$Pr$	Número de Prandtl
$r_{  }$	Componente paralela da radiação não polarizada
$r_{\perp}$	Componente perpendicular da radiação não polarizada
$s_{SC}$	Inclinação da chaminé [rad]
$Ra$	Número de Rayleigh
$Ra_c$	Número de Rayleigh crítico
$T$	Temperatura [K]
$U$	Coefficiente de transmissão térmica [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$v$	Velocidade do ar na chaminé solar [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$w_{SC}$	Largura da chaminé solar [m]
$\delta$	Declinação solar [rad]
$\varepsilon$	Emissividade da superfície negra absorvora
$\theta$	Ângulo [rad]
$\theta_1$	Ângulo de incidência da radiação [rad]
$\theta_2$	Ângulo de refração da radiação [rad]
$\lambda$	Latitude do local [rad]
$\mu_a$	Viscosidade do ar [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$\rho$	Massa volúmica do ar [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
$\tau$	Transmitância do vidro
$\tau_{abs}$	Razão entre a radiação transmitida pelo vidro e a radiação incidente
$\tau_r$	Média entre a componente paralela e perpendicular da radiação não polarizada
$\omega$	Ângulo horário [rad]

### ***índices***

<i>air</i>	Interior da chaminé solar
<i>bw</i>	Superfície negra absorvora
<i>dir</i>	Direta
<i>dif</i>	Difusa
<i>e</i>	Exterior
<i>g</i>	Vidro
<i>gap</i>	Entrada do ar na chaminé solar
<i>i</i>	Interior do edifício
<i>ref</i>	Refletida

## Capítulo 4.4

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$\alpha_{s,c}$	Coefficiente de absorção solar da superfície opaca
$C_m$	Capacitância térmica do edifício [J.K <sup>-1</sup> ]
$c_p$	Capacidade térmica do ar, $c_p = 1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a 298 K.
$e_{sc}$	Espessura da chaminé solar [m]
$F_f$	Fração de caixilharia/moldura
$F_w$	Fator de correção para um vidro plano
$F_{r,k}$	Fator de forma entre a superfície $k$ e o céu
$F_{sh,gl}$	Fator de redução devido a sombreamentos móveis
$F_{sh,ob}$	Fator de redução devido a sombreamentos exteriores
$F_{sh,with}$	Fração de tempo em que existe sombreamento
$g_{gl}$	Transmitância total de energia solar do elemento transparente
$g_{gl,n}$	Transmitância total de energia solar para a radiação perpendicular ao elemento transparente
$g_{gl,sh}$	Transmitância total de energia solar do elemento transparente quando existe sombreamento
$h$	Coefficiente de transferência de calor [W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> ]
$H$	Condutância [W.K <sup>-1</sup> ]
$H_{ve}$	Condutância equivalente a $H_{inf}$ e $H_{vent}$ [W.K <sup>-1</sup> ]
$I$	Radiação solar incidente [W.m <sup>-2</sup> ]
$N_{ocupantes}$	Número total de ocupantes do espaço
$Q$	Energia [J]
$R_{se}$	Resistência térmica superficial exterior [m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> ]
$T$	Temperatura [K]
$T_{sup}$	Temperatura equivalente do ar de ventilação (renovação de ar interior) [K]
$T_i$	Temperatura do ar interior [K]
$U$	Coefficiente de transmissão térmica [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$v$	Velocidade do ar na chaminé solar [m.s <sup>-1</sup> ]
$w_{sc}$	Largura da chaminé solar [m]
$\Delta T_{er}$	Diferença entre a temperatura do ar exterior e a temperatura aparente do céu [K]
$\Lambda_{at}$	Razão entre a área das superfícies em contacto com o volume interior e a área de pavimento
$\phi$	Fluxo térmico [W]
$\phi_{nd}$	Fluxo térmico necessário para arrefecimento [W]

## **índices**

<i>e</i>	Exterior
<i>em</i>	Entre as temperaturas exterior e de massa
<i>f</i>	Efetiva de pavimento
<i>i</i>	Associado às cargas internas
<i>int</i>	Internos
<i>inf</i>	Infiltração de ar exterior
<i>is</i>	Entre temperaturas interior e “estrela”
<i>s</i>	“Estrela”
<i>m</i>	Massa térmica
<i>ms</i>	Entre as temperaturas de massa e “estrela”
<i>nd</i>	Cargas térmicas de arrefecimento
<i>op</i>	Elementos opacos
<i>r</i>	Radiação
<i>set</i>	<i>Set-point</i>
<i>sol</i>	Solar
<i>t</i>	Total
<i>tr</i>	Transmissão
<i>vent</i>	Ventilação associada aos tubos enterrados
<i>w</i>	Envidraçados

## **Capítulo 5.1**

<i>b,c</i>	Coeficientes de correlação empírica para estufas
<i>Q<sub>abs</sub></i>	Energia solar absorvida pela estufa [J]
<i>Q<sub>ht</sub></i>	Energia transferida pela envolvente [J]
<i>Q<sub>nd</sub></i>	Necessidades de aquecimento [J]
<i>Q<sub>ref</sub></i>	Energia de referência [J]
<i>Q<sub>sol</sub></i>	Ganhos solares [J]
<i>SHF</i>	<i>Solar Heating Fraction</i>
<i>SLR</i>	<i>Solar Load Ratio</i>
<i>SLR*</i>	<i>Solar Load Ratio</i> corrigido
$\zeta$	Parâmetro empírico para estufas

## Capítulo 5.2

$a_n, b_n, c$	Coeficientes de ajuste dependentes do sistema
$A_{SC}$	Área da chaminé solar [m <sup>2</sup> ], $A_{SC}=l_{SC} \times w_{SC}$
$B$	Fator de correção de <i>PCLR</i>
$d_t$	Diâmetro do tubo enterrado [m]
$e_{SC}$	Espessura da chaminé solar [m]
$f$	Fator de geometria da chaminé solar
$\bar{G}$	Radiação média mensal incidente na chaminé solar [W.m <sup>-2</sup> ]
$l_{SC}$	Altura da chaminé solar [m]
<i>PCF</i>	<i>Passive Cooling Fraction</i>
<i>PCLR</i>	<i>Passive Cooling Load Ratio</i>
<i>PCLR</i> *	<i>Passive Cooling Load Ratio</i> corrigido
$Q_{int}$	Cargas internas [GJ]
$Q_{nd}$	Necessidades de arrefecimento [GJ]
$Q_{ref}$	Energia de referência [GJ]
$Q_{sol}$	Ganhos solares [GJ]
$Q_{vent}$	Energia extraída por ventilação [GJ]
$s_{SC}$	Inclinação da chaminé solar [°]
$\bar{T}_e$	Temperatura exterior média mensal [°C]
$w_{SC}$	Largura da chaminé solar [m]
$x_t$	Comprimento do tubo enterrado [m]
$z_t$	Profundidade a que está instalado o tubo enterrado [m]
$\bar{\theta}$	Amplitude térmica média mensal [K]
$\phi_{vent}$	Caudal de renovação de ar [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]

## 1. Introdução

### 1.1 Enquadramento

Atualmente os edifícios são responsáveis por 20 a 40 % do consumo total de energia nos países desenvolvidos (Pérez-Lombard, Ortiz e Pout 2008). Perante os elevados consumos existe a necessidade de criar medidas que permitam reduzir estes valores. Para diminuir o consumo energético é necessário que se considere um novo tipo de edifícios, os *Net-Zero Energy Buildings* (NZEB's), que devem apresentar elevada eficiência energética e baixos consumos; estes consumos devem ser suprimidos por sistemas renováveis de geração de energia (Musall, et al. 2010). Os NZEB's serão uma exigência no futuro, uma vez que a partir de 2020 todos os edifícios da União Europeia deverão ser deste tipo, segundo a diretiva da União Europeia sobre o comportamento energético dos edifícios (Parliament 2010). Nesse sentido, é pertinente estudar-se métodos de climatização passivos que permitam reduzir a fatura energética dos edifícios e manter as condições de conforto para os seus ocupantes.

A Norma EN ISO 13790 (*Energy Performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*) disponibiliza métodos horários e mensais simplificados que permitem estimar as necessidades de aquecimento e arrefecimento de um edifício. Esta Norma internacional apresenta um défice na contabilização de estratégias passivas de arrefecimento. A estratégia de arrefecimento passivo presente na Norma, e contabilizada no método 5R1C, é o controlo dos ganhos solares. Por esta razão pretende-se apresentar um método simplificado que permita estimar o contributo de sistemas passivos na redução das necessidades de carga de arrefecimento.

### 1.2 Objetivos e metodologia

Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão dos contributos de tecnologias passivas de arrefecimento na Norma EN ISO 13790. Algumas das tecnologias já aplicadas em edifícios modernos não são contabilizadas na mesma, o que implica que os resultados teóricos das necessidades de arrefecimento são superiores aos reais. Pretende-se apresentar um método simplificado que permita estimar as necessidades de arrefecimento, em função do tipo de sistema passivo, sem recorrer a metodologias complexas de simulação. O método apresentado tem por base o método *Solar Load Ratio* (SLR) que permite caracterizar sistemas passivos de aquecimento e é objetivo deste trabalho demonstrar a possibilidade de aplicar o conceito do método SLR a sistemas passivos de arrefecimento. O método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR) aqui proposto pretende caracterizar e apresentar um valor estimado para as necessidades de arrefecimento médias mensais, quando instalado um sistema passivo de arrefecimento. A validação dos métodos numéricos dos tubos enterrados e da chaminé solar estão fora do âmbito deste trabalho, podendo ser realizada em trabalho futuro.

Foram considerados dois tipos de sistemas de arrefecimento passivo, um sistema de tubos enterrados e um sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar. No primeiro pretende-se usufruir da capacidade de arrefecimento do ar através do solo, no segundo sistema o propósito é tirar partido do efeito de flutuação do ar da chaminé para ventilar o espaço interior com o ar arrefecido no solo, de forma evitar a utilização de ventilação forçada no tubo, necessária no primeiro sistema.

Foram desenvolvidos dois modelos numéricos de simulação horária (modelos de simulação), um para o sistema de tubos enterrados e outro para o sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar. A base dos dois modelos é semelhante, diferindo apenas na forma como é determinado o caudal de renovação do ar interior.

O modelo de simulação do sistema de tubos enterrados associa o modelo dos mesmos com o modelo 5R1C, de forma a estimar-se as necessidades de arrefecimento deste tipo de sistemas. Neste caso o caudal de renovação do ar é um parâmetro imposto mecanicamente. O modelo de simulação do sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar faz a associação dos efeitos do tubo enterrado e da chaminé solar através do modelo 5R1C. A combinação destes três modelos permite estimar as

necessidades de arrefecimento para este tipo de sistemas. A diferença em relação ao sistema anterior é, principalmente, o caudal de renovação de ar interior ser variável e dependente da chaminé solar.

A partir dos resultados do modelo de simulação são determinados os parâmetros *Passive Cooling Fraction* (PCF) e *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR), sendo os coeficientes do método PCLR obtidos por ajuste a estes, e a outros, pontos resultantes do modelo de simulação.

### 1.3 Estrutura

O presente Capítulo faz um enquadramento do tema da dissertação e apresenta os objetivos e a metodologia do trabalho realizado. Pretende-se igualmente apresentar a estrutura do texto e o seu contributo original.

No Capítulo 2 define-se o conceito de conforto térmico e exploram-se os fatores considerados mais relevantes que influenciam as necessidades de carga de arrefecimento.

No Capítulo 3 apresentam-se algumas das principais estratégias de arrefecimento passivo.

O Capítulo 4 faz uma exposição dos modelos matemáticos e das condições de referência consideradas na realização do modelo numérico de simulação horária, incluindo o método 5R1C da Norma EN ISO 13790.

No Capítulo 5 descreve-se os métodos *Load Ratio*, incluindo uma breve apresentação do método *Solar Load Ratio* (SLR) e a apresentação do método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR). São igualmente apresentados os coeficientes de correlação do método PCLR correspondentes a dois sistemas passivos de arrefecimento.

No Capítulo 6 são demonstradas as relações que deram origem ao método PCLR e aos seus coeficientes, para os dois sistemas de arrefecimento passivo. São apresentados os resultados de necessidades de arrefecimento e respetivos desvios. São igualmente mostrados perfis de temperatura e caudal de renovação de ar obtidos através do modelo numérico de simulação horária, que dizem respeito aos modelos da chaminé solar e dos tubos enterrados.

No Capítulo 7 esquematiza-se as conclusões retiradas em relação ao método PCLR apresentado.

### 1.4 Motivação e contribuição original

O método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR) pretende estimar as necessidades de arrefecimento de um edifício, ou espaço interior, a partir das características do sistema passivo de arrefecimento instalado, da carga térmica necessária extrair e das condições climáticas do local. O método foi desenvolvido para simplificar os cálculos das necessidades de arrefecimento, quando se encontra instalado um dos dois sistemas passivos tratados, e para ser uma alternativa a modelos de simulação complexos, quando não são necessários resultados de elevada precisão.

Este método simplificado, que permite estimar as necessidades de arrefecimento quando se utilizam sistemas passivos, pode acrescentar o contributo de algumas estratégias de arrefecimento no cálculo das necessidades da Norma EN ISO 13790.

## 2. Fatores que afetam as necessidades de arrefecimento

### 2.1 Conforto térmico

Atualmente, os edifícios são construídos com a preocupação de proporcionar um ambiente interior agradável aos ocupantes, não só em termos de condições térmicas como visuais, acústicas e de qualidade do ar. Estas condições ideais de ambiente interior permitem aos ocupantes do edifício desempenhar as suas atividades com maior produtividade.

Designa-se por conforto térmico as condições de ambiente interior ideais, no que diz respeito a temperatura, humidade e deslocação do ar, para a maioria das pessoas. O conforto térmico pode ser definido como as condições interiores nas quais uma pessoa não tem necessidade de se aquecer nem de se arrefecer (Asimakopoulos e Santamouris 1996).

Para se atingir o conforto térmico dentro de um edifício pode ser necessário adotar medidas de arrefecimento e/ou de aquecimento em diferentes alturas do ano. Designa-se por necessidades de arrefecimento a quantidade de calor que deve ser retirada do interior do edifício para que este se mantenha em condições térmicas de conforto, e por necessidades de aquecimento a quantidade de calor necessária injetar para o mesmo fim (Asimakopoulos e Santamouris 1996).

Segundo o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) as temperaturas de referência para o conforto térmico são 25 °C na estação de arrefecimento e 20 °C na estação de aquecimento. A taxa de renovação de ar, para garantir a qualidade do ar interior, deve ser de 0.6 RPH, segundo o mesmo regulamento. A humidade relativa do ar interior é igualmente regulamentada pelo RCCTE e tem como referência os 50 %, na estação de arrefecimento. Contudo, não é possível estimar a energia necessária despendida para garantir o conforto térmico quanto à humidade relativa do ar, por ausência de metodologia no regulamento.

### 2.2 Localização do edifício

O local onde se encontra o edifício afeta as necessidades de arrefecimento e aquecimento, uma vez que as condições de clima, microclima e radiação solar variam geograficamente. Os locais com climas temperados, quentes secos ou quentes húmidos têm maiores necessidades de arrefecimento por comparação com climas frios. Em Portugal o clima é considerado temperado, caracterizado por invernos frios e verões quentes, o que pode implicar necessidades de arrefecimento no verão e de aquecimento no inverno (Bradshaw 2006).

Podem existir elementos em torno do edifício que modificam o clima alterando as condições de temperatura e humidade exteriores, por exemplo outros edifícios, vegetação, fontes e topografia do terreno. É necessário avaliar a interação dos edifícios vizinhos e outros obstáculos no que diz respeito à radiação solar e ter em conta a temperatura exterior que pode ser até 2 °C superior à temperatura atmosférica (M. O. Panão 2008).

### 2.3 Tipo de utilização do edifício

O tipo de utilização de um edifício é um fator que permite prever *a priori* o tipo de necessidades de arrefecimento, consoante a época do ano e o clima em que está inserido. Esta especulação é feita com base nas cargas térmicas internas, que se considera serem todas as fontes de calor que se encontram no interior do edifício, como o calor libertado pelos ocupantes, pelos aparelhos elétricos em funcionamento e pela iluminação. Em edifícios que serão ocupados por um número elevado de pessoas e equipamentos (por exemplo, escolas e escritórios) terão uma maior carga térmica interna que edifícios que têm uma ocupação inferior (por exemplo, habitações). O período de funcionamento do edifício permite estabelecer o tempo em que é necessário climatizar e ter conhecimento da variação dos ganhos internos ao longo do tempo (Bradshaw 2006).

Podem distinguir-se dois tipos de edifícios: os edifícios em que as cargas térmicas internas são dominantes (*internal-load-dominated*, ILD) e os que são principalmente influenciados pelo fluxo de calor através da envolvente (*skin-load-dominated*, SLD). O tipo de interação destes edifícios com o

ambiente é diferente, na medida em que um edifício ILD tem necessidades de arrefecimento na maior parte dos meses do ano. Estes edifícios necessitam de ter um controlo de ganhos solares que permita a redução dos mesmos e métodos de dissipar o calor gerado pelas cargas internas. Os SLD estão dependentes da temperatura exterior, podendo ter necessidade de aquecimento e/ou arrefecimento conforme a época do ano. Estes edifícios precisam de sistemas que permitam aumentar os ganhos solares e reduzir as perdas pela envolvente, no inverno, e que permitam reduzir ao máximo os ganhos de calor pela envolvente transparente e opaca, no verão (Bradshaw 2006).

## **2.4 Orientação, morfologia e cor do edifício**

A energia proveniente da radiação solar que penetra no edifício através dos envidraçados e dos elementos opacos depende da orientação do mesmo. Considerando o período de arrefecimento, quanto maior for o valor de ganhos solares, maior será a quantidade de energia necessária extrair do interior do edifício. Assim, a orientação das paredes com envidraçados é um dos fatores a ter em conta na conceção do edifício, pois permite desde logo fazer-se o controlo dos ganhos solares. Em termos anuais, a fachada com orientação a Sul é a que recebe maior nível de radiação solar por comparação às outras orientações, sendo a Norte a que menor nível de radiação solar recebe. Durante o verão são as fachadas de orientação Este e Oeste que mais influenciam as necessidades de arrefecimento. A radiação solar incide nestas fachadas tem um ângulo próximo da perpendicular (o que maximiza a captação de energia) e estas encontram-se expostas à radiação solar durante longos períodos do dia, a fachada de orientação Este no período da manhã e a Oeste no período da tarde. A fachada Oeste tem maior influência nas necessidades de arrefecimento que a Este por receber radiação solar de maior intensidade no período da tarde (Gonçalves e Graça 2004).

A morfologia do edifício influencia na medida da área exposta ao exterior, quanto maior for a área de edifício exposta ao exterior maior será a interação entre os dois ambientes. Durante o período de arrefecimento, num edifício do tipo ILD, é favorável existir maior área de exposição ao exterior uma vez que permite transferir mais energia excedente do interior para o exterior. No entanto, é necessário ter atenção à orientação, pois pode perder-se o efeito de arrefecimento e aumentar-se os ganhos solares (Bradshaw 2006).

A cor tem influência na radiação absorvida pelas paredes, cores mais escuras implicam maior absorção de radiação o que aumenta a temperatura superficial da parede e, conseqüentemente, a temperatura interior. Cores claras permitem absorver menos radiação fazendo com que a parede aqueça menos, comparativamente.

## **2.5 Massa térmica e isolamento do edifício**

A massa térmica de um edifício é a capacidade que a sua estrutura tem para armazenar calor. Um edifício com uma elevada massa térmica tem a capacidade de armazenar maior quantidade de calor por oposição a um com baixa massa térmica. Uma maior capacidade de armazenar calor por parte da envolvente implica uma maior estabilidade da temperatura interior face à temperatura exterior. Uma elevada inércias térmica favorece os edifícios no período do verão. Paredes de elevada inércia a Este e a Oeste e telhados de elevada inércia térmica permitem minimizar os impactos dos ganhos solares no verão (Bradshaw 2006).

O isolamento da envolvente permite controlar o fluxo de calor que atravessa o edifício. Num edifício do tipo ILD, um elevado isolamento pode implicar uma subida das necessidades de arrefecimento quando a temperatura exterior se encontra abaixo da interior. Nestas condições, o fluxo térmico dá-se no sentido de dissipar o calor gerado no interior para o exterior, se o isolamento é elevado o calor não é dissipado para o exterior de forma natural o que aumenta as necessidades de arrefecimento do edifício. Num edifício SLD o isolamento permite evitar o fluxo de calor do exterior para o interior, no caso da temperatura interior ser inferior à exterior, e vice-versa.

### 3. Estratégias de arrefecimento passivo

Existem métodos passivos e ativos que permitem fornecer ou extrair calor de dentro de um edifício. Os métodos ativos utilizam equipamentos mecânicos que permitem transportar o calor no sentido contrário ao natural. Os métodos passivos não utilizam equipamentos mecânicos ou a sua utilização é residual face ao seu desempenho, funcionando a favor do sentido natural de transmissão de calor. Estes não implicam consumo de energia ao contrário dos métodos ativos de climatização, ou quando auxiliados por equipamentos mecânicos apresentem baixos consumos.

São consideradas estratégias de arrefecimento passivo todos os processos que contribuem para a redução das necessidades de carga de arrefecimento de uma forma natural. Estão incluídas estratégias que permitem limitar os ganhos de calor, como técnicas que permitam o seu controlo, e técnicas que retirem o calor de um edifício sem recorrer a mecanismos forçados de extração de calor. O calor pode ser transferido de forma natural através de condução, convecção, radiação ou evaporação (arrefecimento natural) ou pode ser auxiliado por pequenos equipamentos mecânicos (arrefecimento híbrido) que permitem impor ventilação, por exemplo (Asimakopoulos e Santamouris 1996).

#### 3.1 Controlo de ganhos solares

A radiação solar que penetra no interior dos edifícios através dos envidraçados é desfavorável no período de arrefecimento, uma vez que contribui para aumentar as necessidades de arrefecimento.

Existem métodos de sombreamento dos envidraçados que reduzem os ganhos solares, estes podem ser fixos ou móveis, interiores ou exteriores ao edifício. Os sombreamentos fixos são geralmente exteriores e podem ser verticais, horizontais ou uma combinação entre os dois. Um sistema fixo não permite o controlo da percentagem de sombra, sendo variável durante o ano. Estes sistemas são estrategicamente desenhados para impedir, parcial ou totalmente, a entrada de radiação solar direta numa janela durante os meses de verão e permitir a sua entrada durante os meses de Inverno. Os sistemas móveis podem ser interiores ou exteriores e permitem controlar a percentagem de sombra, podendo ser aumentada no verão e diminuída no inverno, consoante as necessidades. Estes sistemas podem ser automáticos ou manuais, os primeiros são sensíveis a níveis de radiação ou luminosidade e ajustam-se automaticamente (Asimakopoulos e Santamouris 1996).

O sombreamento interior permite a passagem da radiação para o interior do edifício constituindo uma barreira no interior, enquanto o sombreamento exterior impede a passagem da radiação para o interior do edifício (Bradshaw 2006). O sombreamento exterior é mais eficiente que o interior, na medida em que em que o último absorve a radiação solar e emite calor no interior do espaço (Kim, et al. 2012).

O controlo dos ganhos solares pode reduzir a energia total anual consumida para arrefecimento em 12 %, mesmo considerando que a diminuição dos ganhos solares provoca um aumento do consumo em iluminação (Tzempelikos e Athienitis 2007).

#### 3.2 Ventilação natural

Ventilação natural é o movimento de massa de ar que entra ou sai do edifício, por portas ou janelas colocadas intencionalmente para o efeito, sem auxílio mecânico (Bradshaw 2006). A ventilação natural, induzida pelo vento, é especialmente importante no verão, pois permite arrefecer o edifício durante a noite (ventilação noturna), período em que a temperatura exterior é inferior à interior. A instalação de janelas cuja abertura seja possível permite o controlo da ventilação natural por parte dos ocupantes, permitindo a gestão da ventilação do espaço quer no período noturno, quer no período diurno no caso dos edifícios ILD.

As chaminés solares são uma técnica de ventilação natural que tira partido do efeito de flutuação do ar por diferença de densidade. O efeito de flutuação ocorre devido à diferença de temperatura entre duas zonas adjacentes, a zona da chaminé solar e a do espaço interior (Asimakopoulos e Santamouris 1996), mais detalhadamente, consiste no fluxo ascendente de ar provocado pela diminuição da sua densidade, que é resultante do aquecimento pela radiação solar. O ar que sobe na chaminé solar provoca o efeito de sucção do ar interior, dando-se o efeito de ventilação natural.

As chaminés solares mais simples têm uma geometria de caixa sem base nem topo, para permitir a passagem do ar no seu interior, como exemplo apresenta-se um esquema de uma chaminé solar na Fig. 3.1. A chaminé solar representada tem um vidro na superfície anterior e uma parede negra absorvora na parte posterior, que absorve a radiação e emite calor. O aquecimento do ar no interior da chaminé dá-se pelo contacto com a parede negra e pelo efeito de estufa promovido pelo vidro. O isolamento colocado na parte posterior permite reter a energia absorvida pela parede negra e aumentar a sua temperatura. A chaminé solar pode ser vertical ou ter uma determinada inclinação que permite otimizar a incidência de radiação solar.

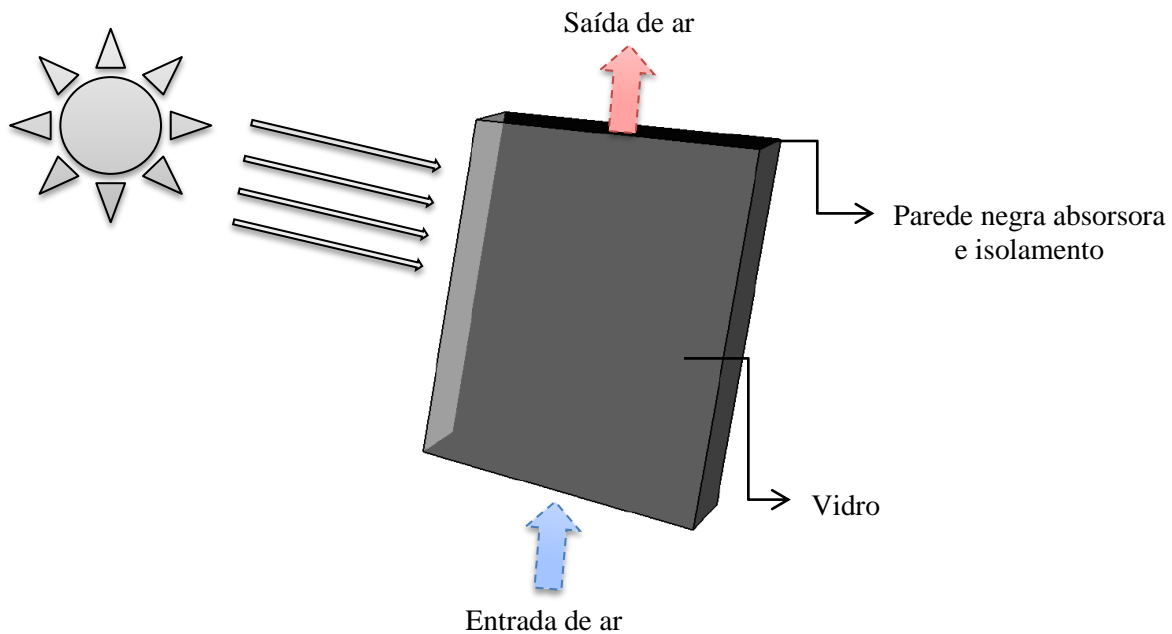


Fig. 3.1 – Representação esquemática de uma chaminé solar.

### 3.3 Arrefecimento pelo solo

No período do verão o solo encontra-se a uma temperatura inferior à temperatura do ar exterior, podendo ser utilizado como uma fonte fria. O solo pode ser utilizado como dissipador de calor através da instalação de tubos enterrados pelos quais se faz passar o ar exterior, por exemplo. A este tipo de sistema chama-se *Earth to Air Heat Exchanger* (EAHE) ou tubos enterrados. O ar exterior entra no tubo, é arrefecido no percurso subterrâneo dissipando calor para o solo e entra no edifício renovando o ar interior e diminuindo a sua temperatura.

A eficiência destes sistemas depende das características do tubo e da sua instalação, assim como das características solo (humidade, condutividade e temperatura). A profundidade, o tipo de conduta de que é feito o sistema e as suas propriedades térmicas, a dimensão do tubo e a velocidade de passagem do ar influenciam o fluxo de calor entre o ar e o solo (Gonçalves e Graça 2004). A velocidade do ar que atravessa o tubo pode ser imposta por um sistema mecânico ou pode resultar de forma natural, através da combinação com uma chaminé solar, por exemplo.

O sistema de tubos enterrados pode ser utilizado como sistema de arrefecimento passivo ou pode ser utilizado para pré-arrefecer ou pré-aquecer o ar antes de este entrar numa unidade de tratamento de ar. Este pré-condicionamento do ar permite poupar energia nos sistemas de climatização.

### **3.4 Arrefecimento radiativo**

O arrefecimento radiativo baseia-se na emissão de radiação de elevado comprimento de onda de um corpo para outro com menor temperatura, que constitui a fonte fria. Nos edifícios, a emissão de radiação da cobertura para o céu pode funcionar como um dissipador de calor. No verão, em noites de céu limpo, a temperatura fictícia do céu pode chegar a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que representa uma diferença de temperatura de 10 a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre o céu e o ambiente exterior. Tendo em conta que a taxa de energia emitida é uma função da temperatura à quarta potência (Lei de Stefan-Boltzmann), esta tecnologia permite elevadas perdas por radiação pela cobertura do edifício, quando devidamente concebida (Cavelius, et al. 2003).

### **3.5 Modificação do micro clima e arrefecimento evaporativo**

O ambiente urbano apresenta características de microclima diferentes dos espaços não urbanos. O efeito de ilha de calor, que se resume como sendo a temperatura exterior mais elevada nas zonas urbanas comparativamente com a periferia, tem importância na medida em que afeta as necessidades de arrefecimento nos edifícios das cidades. O efeito de ilha de calor deve-se à elevada absorção de radiação solar nas cidades, a radiação absorvida é fundamentalmente emitida na forma de radiação de elevado comprimento de onda e é mantida sobre a cidade devido ao efeito estufa provocado pela poluição atmosférica. A escassa evapotranspiração das cidades, o calor gerado pelas pessoas e equipamentos e os fracos ventos são outros fatores que contribuem para o efeito de ilha de calor. (Gómez, Gil e Jabaloyes 2004).

Uma das medidas de alteração do microclima é a plantação de árvores e jardins. As árvores permitem sombrear os edifícios e o solo diminuindo a radiação absorvida pelas superfícies e reduzem os níveis de poluição mitigando o efeito de estufa na cidade (Gómez, Gil e Jabaloyes 2004) (Shashua-Bar e E. Hoffman 2004). A vegetação permite aumentar a evapotranspiração contribuindo para diminuir a temperatura exterior (Bradshaw 2006). O efeito de arrefecimento evaporativo provocado pela vegetação está dependente da densidade das árvores no espaço urbano e da geometria do próprio espaço (Shashua-Bar e E. Hoffman 2004).

O aumento do albedo pode ser igualmente conseguido através da alteração das cores das fachadas e dos pavimentos para cores claras, de forma a haver maior reflexão da radiação e menor absorção (Shashua-Bar e E. Hoffman 2004).

A presença de piscinas ou fontes de água junto aos edifícios aumenta a evaporação e diminui a temperatura do ar adjacente aos mesmos. Esta alteração pode reduzir as necessidades de arrefecimento, pois reduz a temperatura do ar que entra no edifício por infiltração ou ventilação natural (Safarzadeh e Bahadori 2005). Existem outras técnicas de arrefecimento evaporativo que aumentam a humidade do ar interior baixando a sua temperatura, mas a sua eficácia está condicionada pelas condições de humidade relativa do ar exterior.

Apesar de todos os efeitos benéficos dos espaços verdes em ambientes urbanos foi demonstrado por Safarzadeh et al. (2005) que o seu contributo na redução das necessidades de arrefecimento dos edifícios é semelhante ao da utilização de vidros duplos, sombreamento exterior e isolamento das paredes e telhados. Foi também demonstrado que as medidas de alteração do microclima que reduzem as temperaturas no verão podem ter como consequência um aumento das necessidades de aquecimento no inverno (Safarzadeh e Bahadori 2005).

A altura dos edifícios no ambiente urbano influencia a temperatura exterior. Foram realizados estudos que revelaram que edifícios mais altos têm o efeito de diminuir a temperatura no espaço urbano no período diurno, através do efeito de sombreamento que exercem sobre o mesmo (Shashua-Bar e E. Hoffman 2004). Contudo esta medida tem o efeito contrário no período noturno, não permitindo que as ruas arrefeçam durante a noite.

## 4. Modelação de sistemas de arrefecimento passivo

### 4.1 Cálculo de radiação incidente num determinado plano

Para se estimar as necessidades de arrefecimento é necessário determinar a radiação incidente na envolvente do edifício e na chaminé solar. A radiação total incidente num plano com determinada orientação e inclinação ( $I_{surf}$  em  $W.m^{-2}$ ) pode ser calculada a partir de dados climáticos de radiação difusa e global num plano horizontal<sup>1</sup>, através das seguintes equações (Rodrigues, Piedade e Braga 2009):

$$I_{surf} = K_{\perp} \times \cos(\theta) + F_{sky} \times D + F_{soil} \times \rho_{soil} \times G \quad (4.1)$$

onde  $K_{\perp}$  é a radiação direta incidente num plano perpendicular aos raios solares ( $W.m^{-2}$ ),  $\theta$  é o ângulo entre a radiação direta e o vetor normal à superfície (rad),  $F_{sky}$  e  $F_{soil}$  são os fatores visuais do céu e do solo, respetivamente,  $D$  e  $G$  são a radiação difusa e global incidentes no plano horizontal ( $W.m^{-2}$ ), respetivamente, e  $\rho_{soil}$  é a refletividade do solo (0.25). As componentes da radiação incidente numa superfície ( $I_{surf}$ ), a radiação direta, a difusa e a refletida, podem ser consideradas separadamente, da seguinte forma:

$$I_{dir} = K_{\perp} \times \cos(\theta) \quad (4.2)$$

$$I_{dif} = F_{sky} \times D \quad (4.3)$$

$$I_{ref} = F_{soil} \times \rho_{soil} \times G \quad (4.4)$$

Os fatores visuais do céu e do solo e o ângulo  $\theta$  podem ser determinados por:

$$F_{sky} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (4.5)$$

$$F_{soil} = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (4.6)$$

$$\theta = \arccos(\cos \alpha \times \cos \gamma \times \sin \beta + \sin \alpha \times \cos \beta) \quad (4.7)$$

onde  $\alpha$  é a altitude solar (rad),  $\beta$  é o ângulo de inclinação da superfície (rad) e  $\gamma$  é ângulo entre os azimutes da superfície e do sol (rad). O valor da radiação direta incidente num plano perpendicular aos raios solares ( $K_{\perp}$ ), é obtido através dos dados da radiação difusa e global ( $G$  e  $D$ ), da seguinte forma (Roriz, et al. 2010):

$$K_{\perp} = \frac{G - D}{\sin(\alpha)} \quad (4.8)$$

---

<sup>1</sup> Todos os dados climáticos utilizados foram obtidos através do *software Energy Plus*.

A altitude solar e o ângulo definido entre o azimute da superfície e o azimute do sol, podem ser calculados da seguinte forma:

$$\alpha = \arcsin(\cos \lambda \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \lambda \times \sin \delta) \quad (4.9)$$

$$\gamma = |\varphi - \psi| \quad (4.10)$$

onde  $\lambda$  é a latitude do local onde se encontra o edifício (rad),  $\delta$  é a declinação solar (rad),  $\omega$  é o ângulo horário (rad) e  $\varphi$  e  $\psi$  são os azimutes do sol e da superfície (rad), respetivamente. Os azimutes são medidos a partir de Sul e são positivos na direção a Oeste e negativos na direção a Este. O azimute do sol pode ser determinado pela fórmula seguinte:

$$\varphi = \arccos \left( \frac{\sin \alpha \times \sin \lambda - \sin \delta}{\cos \alpha \times \cos \lambda} \right) \quad (4.11)$$

A declinação solar e o ângulo horário são definidos por:

$$\delta = 0.13 \pi \times \sin \left[ \frac{2\pi \times (284 + J)}{365} \right] \quad (4.12)$$

$$\omega = \frac{\pi}{12} (AST - 12) \quad (4.13)$$

onde  $J$  representa o dia juliano para o qual se pretende determinar a declinação solar e  $AST$  é a hora solar verdadeira (h), dada por:

$$AST = LST + \frac{LSM - LON}{15} + ET - DST \quad (4.14)$$

onde  $LST$  é a hora local *standard* (h),  $LSM$  é o meridiano local ( $^{\circ}$ ),  $LON$  é a longitude do local ( $^{\circ}$ ),  $ET$  é a equação do tempo (h) e  $DST$  é a hora legal (h), que em Portugal toma o valor de um no verão e zero no inverno. A equação do tempo é expressa da seguinte forma:

$$ET = \frac{9.87 \times \sin(4\pi \times J') - 7.53 \times \cos(2\pi \times J') - 1.5 \times \sin(2\pi \times J')}{60} \quad (4.15)$$

$$J' = \frac{J - 81}{364} \quad (4.16)$$

## 4.2 Condições climáticas

Os parâmetros *PCF* e *PCLR* foram calculados com os dados do modelo de simulação em seis locais diferentes, durante as respetivas estações de arrefecimento. Os climas considerados foram Bragança, Porto, Coimbra, Lisboa, Évora e Faro. Considerou-se o mesmo edifício de referência em todos os climas. As características geográficas e climáticas dos diferentes locais são apresentadas na Tabela 4.1. Nesta tabela conta o valor médio mensal da radiação global incidente num plano com 50° de inclinação, a inclinação ótima para os locais apresentados (ver Tabela 4.2).

Nos climas de Bragança e Porto não se contabilizou o mês de Maio como mês de arrefecimento, uma vez que a sua temperatura exterior média se encontrava abaixo dos 15 °C.

Tabela 4.1 – Características geográficas, radiação média mensal incidente num plano com 50° de inclinação e condições climáticas dos locais.

Local	Latitude (°)	Mês	$\bar{G}$ (W.m <sup>-2</sup> )	$\bar{T}_e$ (°C)	$\bar{\theta}$ (°C)
Bragança	41.8	Junho	430	17.9	11.2
		Julho	458	21.8	13.4
		Agosto	470	20.9	13.9
		Setembro	510	17.4	12.5
Porto	41.2	Junho	412	17.8	8.4
		Julho	416	19.1	8.7
		Agosto	455	19.4	8.9
		Setembro	453	18.0	7.3
Coimbra	40.2	Maio	375	15.6	10.6
		Junho	381	18.9	10.2
		Julho	422	20.9	11.2
		Agosto	473	21.1	12.7
		Setembro	458	20.7	10.7
Lisboa	38.7	Maio	410	17.4	11.4
		Junho	388	20.2	12.2
		Julho	453	22.5	13.6
		Agosto	479	22.4	13.8
		Setembro	467	21.2	12.5
Évora	38.6	Maio	441	17.2	10.2
		Junho	407	19.9	12.4
		Julho	454	22.7	13.1
		Agosto	495	23.1	13.2
		Setembro	472	22.0	10.3
Faro	37.0	Maio	451	18.8	7.5
		Junho	452	21.0	7.1
		Julho	478	24.2	11.0
		Agosto	494	23.6	7.0
		Setembro	555	21.8	8.4

### 4.3 Sistemas modelados

Um dos sistemas de arrefecimento passivo modelados é composto por duas partes, um sistema de um tubo enterrado associado a uma chaminé solar, como representado na Fig. 4.1. Os modelos numéricos dos tubos enterrados e da chaminé solar foram integrados com o método 5R1C da Norma EN ISO 13790, este modelo numérico de simulação horária integrando os dois modelos e o método 5R1C será designado por modelo de simulação.

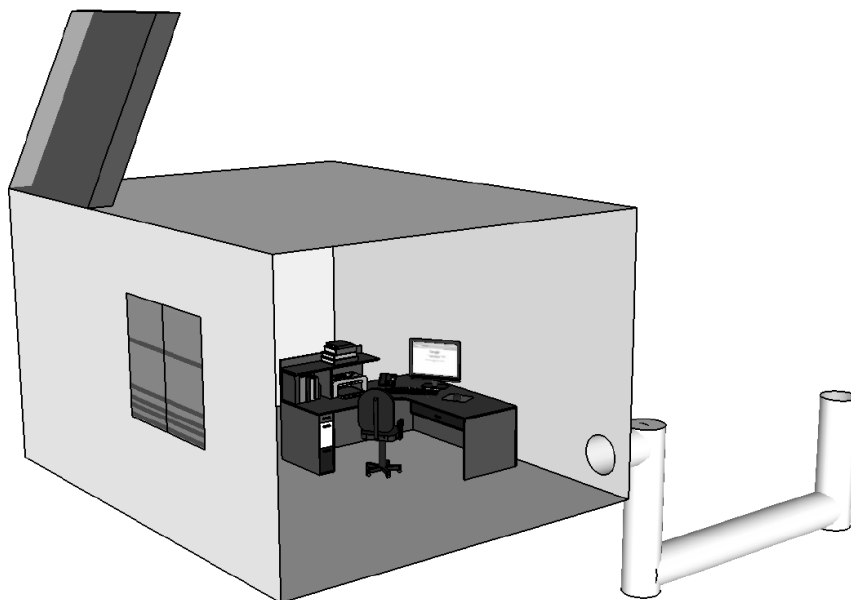


Fig. 4.1 – Representação do sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, instalado num gabinete.

O segundo sistema de arrefecimento passivo modelo é composto apenas por um tubo enterrado. O caudal de ventilação de ar é um parâmetro do sistema imposto mecanicamente. O modelo numérico dos tubos enterrados foi integrado com o método 5R1C da Norma EN ISO 13790 e é igualmente designado por modelo de simulação.

#### 4.3.1 Modelo numérico de um tubo enterrado

O sistema de tubos enterrados foi modelado de acordo com a solução analítica completa proposta por P. Hollmuller (Hollmuller 2003). Para o caso do perfil de temperatura de entrada no tubo ser sinusoidal, o modelo aplica uma atenuação na amplitude e um desfasamento no tempo a esse mesmo perfil. As alterações ao sinal de entrada são feitas no domínio da frequência do sinal, através da sua transformada de Fourier, e depois é convertido novamente para o domínio do tempo através da inversa da transformada de Fourier. A solução analítica para a transferência de calor no caso harmónico apresenta duas soluções possíveis para condições de fronteira, em regime adiabático ou isotérmico. A solução utilizada no presente estudo é em regime isotérmico. O modelo de P. Hollmuller não permite traçar um perfil de temperatura à saída dos tubos para velocidade do ar variável ao longo do tempo, assim, para cada variação deste parâmetro foi calculado um perfil de temperaturas de ar à saída do tubo, de forma a ultrapassar esta limitação. A representação esquemática do sistema de tubos enterrados é apresentada na Fig. 4.2. Neste trabalho seguiu-se o modelo de P. Hollmuller e não se considerou a condutância ou a inércia térmica do tubo.

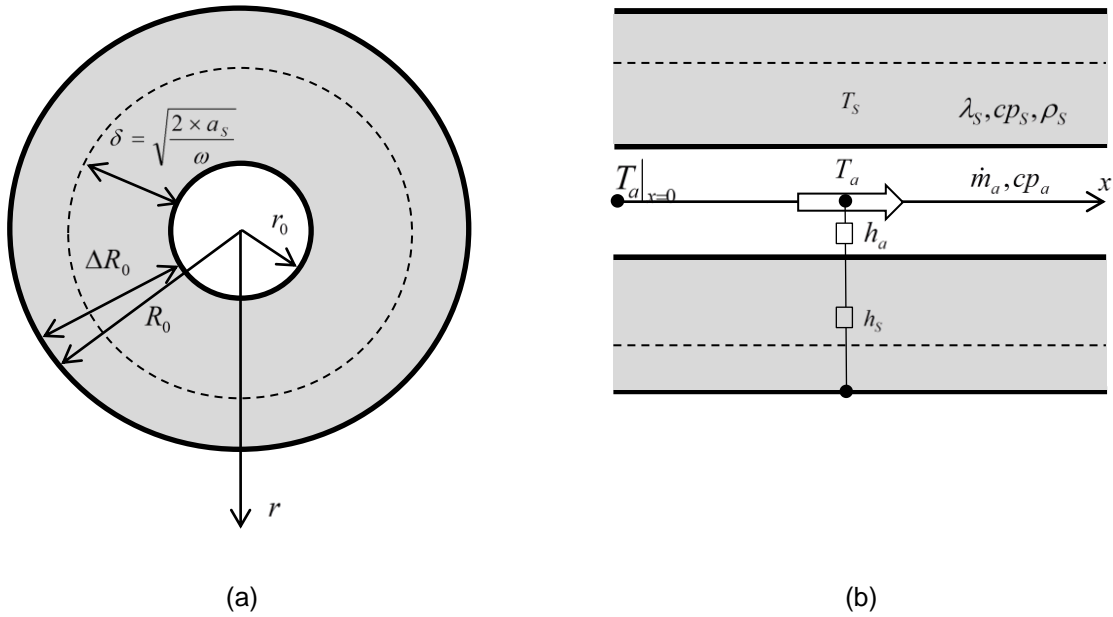


Fig. 4.2 – Representação esquemática do tubo enterrado, secção radial (a) e secção longitudinal (b) (Hollmuller 2003).

Na Fig. 4.2, o parâmetro  $\delta$  é a profundidade de penetração do calor no solo (m),  $r_0$  é o raio do tubo (m),  $R_0$  é o raio do tubo e do solo (m),  $\Delta R_0$  é a espessura de solo (m),  $a_s$  é a difusidade térmica do solo ( $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\omega$  é a frequência angular do perfil sinusoidal da temperatura do ar de entrada ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T_a|_{x=0}$  é o perfil harmónico da temperatura do ar à entrada do tubo (K),  $T_s$  é a temperatura do solo (K),  $T_a$  é a temperatura do ar no tubo (K),  $h_a$  é o coeficiente de transferência de calor entre o ar e o tubo ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $h_s$  é o coeficiente de transferência de calor entre o tubo e o solo ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $\dot{m}_a$  é o caudal mássico de ar no tubo ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $cp_a$  é a capacidade térmica do ar ( $1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a 298 K),  $\rho_s$  é a massa volúmica do solo ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $cp_s$  é a capacidade térmica do solo ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) e  $\lambda_s$  é a condutividade térmica do solo ( $1.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  para solo a 300 K).

A temperatura do ar de entrada com perfil harmónico é definida pelas seguintes condições iniciais e de fronteira:

$$T_a|_{x=0} = \theta_{a0} \times \cos(\omega \times t) \quad (4.17)$$

$$T_s|_{r=R_0} = 0 \quad (4.18)$$

onde  $\theta_{a0}$  é a amplitude da primeira harmónica do sinal de temperatura de entrada, obtida através da transformada de Fourier da temperatura exterior (K) e  $t$  é o tempo (s).

A solução completa que dá o perfil de temperatura do ar à saída do tubo é:

$$T_a(x, t) = \theta_{a0} \times \exp\left(-\frac{2 \times \pi \times r_0}{cp_a \times \dot{m}_a} h \times x\right) \times \cos\left[\omega \times \left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{2 \times \pi \times r_0}{cp_a \times \dot{m}_a} k \times x\right] \quad (4.19)$$

onde  $h$  é o coeficiente de ajuste da amplitude do sinal de entrada ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $x$  é o comprimento do tubo (m),  $v$  a velocidade do ar ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e  $k$  o coeficiente de ajuste da frequência do sinal de entrada ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

Os coeficiente de ajuste da amplitude e da frequência do sinal de entrada,  $h$  e  $k$ , podem ser obtidos através de:

$$h + ik = \frac{h_a \times h_r^*}{h_a + h_r^*} \quad (4.20)$$

onde  $h_r^*$  é o valor complexo do coeficiente de transferência de calor correspondente ao ajuste da amplitude e da fase do sinal, que pode ser obtido a partir de:

$$h_r^* = \frac{\lambda_s}{\delta} \times (1+i) \times (-1) \times \frac{I_1\left((1+i)\frac{r_0}{\delta}\right) \times K_0\left((1+i)\frac{R_0}{\delta}\right) + K_1\left((1+i)\frac{r_0}{\delta}\right) \times I_0\left((1+i)\frac{R_0}{\delta}\right)}{I_0\left((1+i)\frac{r_0}{\delta}\right) \times K_0\left((1+i)\frac{R_0}{\delta}\right) - K_0\left((1+i)\frac{r_0}{\delta}\right) \times I_0\left((1+i)\frac{R_0}{\delta}\right)} \quad (4.21)$$

onde  $I_n$  e  $K_n$  são as funções modificadas de Bessel.

O coeficiente de transferência de calor entre o ar e o tubo ( $h_a$ ) pode ser calculado através da seguinte equação:

$$h_a = \frac{\lambda_a}{2 \times r_0} Nu \quad (4.22)$$

O número de Nusselt é dado pela seguinte função:

$$Nu = \begin{cases} 4.36 & (Re < 2300) \\ 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33} & (Re > 2300) \end{cases} \quad (4.23)$$

onde  $\lambda_a$  é a condutividade térmica do ar ( $0.025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  $Re$  é o número de Reynolds e  $Pr$  o número de Prandtl. Estes são calculados através de:

$$Re = \frac{\rho_a \times v}{\mu_a} \times 2 \times r_0 \quad (4.24)$$

$$Pr = \frac{cp_a \times \mu_a}{\lambda_a} \cong 0.71 \quad (4.25)$$

onde  $\rho_a$  e  $\mu_a$  são a massa volúmica ( $1.177 \text{ kg.m}^{-3}$ ) e a viscosidade do ar ( $1.846 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ), respetivamente.

A profundidade de penetração do calor ( $\delta$ ) é dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \times a_s}{\omega}} \quad (4.26)$$

### 4.3.2 Modelo numérico de uma chaminé solar

A chaminé solar ou coletor solar foi modelada com base no estudo desenvolvido por E. P. Sakonidou et al. (Sakonidou, Karapantsios e Baloukts 2008). Para aplicação do modelo apresentado a chaminé solar deve ser orientada a Sul. Na Fig. 4.3 apresenta-se um esquema da chaminé solar.

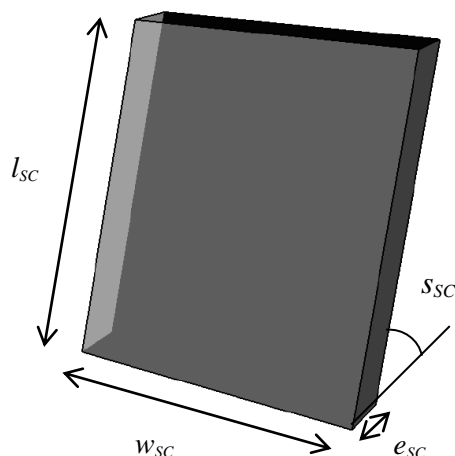


Fig. 4.3 – Representação da chaminé solar.

O modelo de E. P. Sakonidou et al. apresenta duas expressões para calcular a velocidade do ar que passa na chaminé solar, em função da sua inclinação. A expressão<sup>2</sup> usada neste estudo é a seguinte:

$$v = C_D \frac{\rho(T_{air})}{\rho(T_i)} \left[ \frac{l_{sc} \times g \times \sin(s_{sc}) \times (T_{air} - T_i)}{T_i} \right]^{1/2} \quad (4.27)$$

onde  $C_D$  representa o coeficiente de descarga,  $\rho$  é a massa volúmica do ar ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $T_{air}$  a temperatura no interior da chaminé (K),  $T_i$  a temperatura do ar no interior do edifício (K),  $l_{sc}$  a altura da chaminé (m),  $g$  a aceleração da gravidade ( $9.81 \text{ m.s}^{-2}$ ) e  $s_{sc}$  a inclinação da chaminé (rad). Os parâmetros  $w_{sc}$  e  $e_{sc}$  são a largura (m) e a espessura (m) da chaminé solar, respetivamente.

A massa volúmica do ar ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) em função da temperatura (K) pode ser estimada através de:

$$\rho(T) = 10^{-5} \times T^2 - 0.0105 \times T + 3.3619 \quad (4.28)$$

A inclinação da chaminé não pode ser inferior a  $22^\circ$ , pois é a inclinação mínima que permite o efeito de chaminé ou de flutuação, este valor foi obtido através de testes ao modelo. Assim, o sistema foi estudado para inclinações de  $40^\circ$  a  $90^\circ$ .

A inclinação ótima para a chaminé solar depende da latitude do local, este estudo foi feito por Khanal et al. (Khanal e Chengwang 2010) e os resultados podem ser consultados na Tabela 4.2.

<sup>2</sup> A expressão (4.27) foi alvo de correção por parte do autor.

Tabela 4.2 – Inclinação ótima da chaminé solar em função da latitude do local (Khanal e Chengwang 2010).

Latitude (°)	Inclinação Ótima (°)
0	55
5	50
10	50
15	50
20	45
25	45
30	45
35	50
40	50
45	55
50	55
55	60
60	60
65	60

O modelo de chaminé solar utilizado apresenta algumas alterações em relação ao modelo de E. P. Sakonidou et al.. Este modelo permite determinar a radiação horária difusa e direta a partir da radiação global numa superfície horizontal, tal não foi utilizado, uma vez que foram usados dados climáticos reais.

A determinação das componentes da radiação incidente na chaminé solar é feita a partir das equações (4.2), (4.3) e (4.4). A energia absorvida pelo vidro é dada pela equação (4.29) e a transmitida é calculada a partir da equação (4.30).

$$(\tau \cdot I) = \tau_{dir} \times I_{dir} + \tau_{dif} \times I_{dif} + \tau_{ref} \times I_{ref} \quad (4.29)$$

$$(a_g \cdot I) = a_{g,dir} \times I_{dir} + a_{g,dif} \times I_{dif} + a_{g,ref} \times I_{ref} \quad (4.30)$$

onde  $a_{g,dir}$ ,  $a_{g,dif}$  e  $a_{g,ref}$  são os valores da absorptância do vidro para a radiação direta, difusa e refletida, respetivamente,  $\tau_{dir}$ ,  $\tau_{dif}$  e  $\tau_{ref}$  são os valores da transmitância do vidro em relação à radiação direta, difusa e refletida, respetivamente. Os valores de absorptância são obtidos a partir de:

$$a_{g,dir} \cong 1 - \tau_{abs,dir} \quad (4.31)$$

$$a_{g,dif} \cong 1 - \tau_{abs,dif} \quad (4.32)$$

$$a_{g,ref} \cong 1 - \tau_{abs,ref} \quad (4.33)$$

onde  $\tau_{abs,dir}$  é a razão entre a radiação direta transmitida pelo vidro e a radiação incidente, e  $\tau_{abs,dif}$  e  $\tau_{abs,ref}$  representam a mesma relação para a radiação difusa e refletida.

Os valores de  $\tau_{dir}$ ,  $\tau_{dif}$  e  $\tau_{ref}$  são calculados a partir das seguintes equações:

$$\tau_{dir} \cong \tau_{abs,dir} \times \tau_{r,dir} \quad (4.34)$$

$$\tau_{dif} \cong \tau_{abs,dif} \times \tau_{r,dif} \quad (4.35)$$

$$\tau_{ref} \cong \tau_{abs,ref} \times \tau_{r,ref} \quad (4.36)$$

onde  $\tau_{r,dir}$ ,  $\tau_{r,dif}$  e  $\tau_{r,ref}$  são médias entre a componente paralela e perpendicular da radiação não polarizada. A equação (4.44) permite calcular estes parâmetros.

Os valores de  $\tau_{abs,dir}$ ,  $\tau_{abs,dif}$  e  $\tau_{abs,ref}$  são dados por:

$$\tau_{abs,dir} = \tau_{abs,dif} = \tau_{abs,ref} = \exp\left(-\frac{K \times e_g}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (4.37)$$

onde  $K$  é coeficiente de extinção<sup>3</sup> do vidro e  $e_g$  representa a espessura do vidro.

O valor de  $\theta_2$  varia em função da radiação direta, difusa ou refletida através do parâmetro  $\theta_1$ , conforme se mostra de seguida:

$$\theta_2 = \arcsin\left[\frac{n_1 \times \sin(\theta_1)}{n_2}\right] \quad (4.38)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do ar e do vidro, respetivamente, e  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de incidência e de refração, respetivamente. O ângulo  $\theta_1$  é diferente para a radiação direta, difusa e refletida e é dado pelas equações (4.39), (4.40) e (4.41), respetivamente.

$$\theta_1 = \arccos\left[\sin(\lambda - s_{SC}) \times \sin(\delta) + \cos(\lambda - s_{SC}) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega)\right] \quad (4.39)$$

$$\theta_1 = \arccos\left[\sin(\lambda - \theta_{dif}) \times \sin(\delta) + \cos(\lambda - \theta_{dif}) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega)\right] \quad (4.40)$$

$$\theta_1 = \arccos\left[\sin(\lambda - \theta_{ref}) \times \sin(\delta) + \cos(\lambda - \theta_{ref}) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega)\right] \quad (4.41)$$

onde  $\lambda$  é a latitude do local onde se encontra o edifício (rad),  $\delta$  é a declinação solar (rad),  $\omega$  é o ângulo horário (rad). Os ângulos  $\theta_{dif}$  e  $\theta_{ref}$  são dados por:

$$\theta_{dif} = \left[59.7 - 0.1388 \times s_{SC} \times \frac{180}{\pi} + 0.001497 \times \left(s_{SC} \times \frac{180}{\pi}\right)^2\right] \times \frac{\pi}{180} \quad (4.42)$$

$$\theta_{ref} = \left[90 - 0.5788 \times s_{SC} \times \frac{180}{\pi} + 0.002693 \times \left(s_{SC} \times \frac{180}{\pi}\right)^2\right] \times \frac{\pi}{180} \quad (4.43)$$

---

<sup>3</sup> Taxa de absorção de radiação solar pelo vidro.

Os valores de  $\tau_{r,dir}$ ,  $\tau_{r,dif}$  e  $\tau_{r,ref}$  são calculados a partir de:

$$\tau_{r,dir} = \tau_{r,dif} = \tau_{r,ref} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right) \quad (4.44)$$

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.45)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.46)$$

Os parâmetros  $r_{\parallel}$  e  $r_{\perp}$  representam as componentes perpendicular e paralela da radiação não polarizada, respetivamente.

As três equações que resultam do balanço de energia da chaminé solar são:

$$a_{bw} \times (\tau \cdot I) \times A_g = U_{bw} \times A_{bw} \times (T_{bw} - T_e) + h_{bw} \times A_{bw} \times (T_{bw} - T_{air}) + \varepsilon \times \sigma \times A_g \times (T_{bw}^4 - T_g^4) \quad (4.47)$$

$$(a_g \cdot I) \times A_g + \varepsilon \times \sigma \times A_g \times (T_{bw}^4 - T_g^4) = h_g \times A_g \times (T_g - T_{air}) + U_g \times A_g \times (T_g - T_e) \quad (4.48)$$

$$h_{bw} \times A_{bw} \times (T_{bw} - T_{air}) + h_g \times A_g \times (T_g - T_{air}) = 2 \times cp_{air} \times \rho_{air} \times A_{gap} \times v \times (T_{air} - T_i) \quad (4.49)$$

onde  $a_{bw}$  é a absorptância da superfície negra absorvedora da chaminé solar,  $A_g$ ,  $A_{bw}$  e  $A_{gap}$  são as áreas ( $m^2$ ) do vidro, da superfície absorvedora e da entrada de ar na chaminé ( $A_{gap} = w_{SC} \times e_{SC}$ ), respetivamente,  $U_{bw}$  e  $U_g$  são os coeficientes de transmissão térmica ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) da superfície absorvedora e do vidro. Os parâmetros  $h_{bw}$  e  $h_g$  são os coeficientes de transferência de calor ( $W \cdot K^{-1} \cdot m^2$ ) da superfície absorvedora e do vidro e  $T_{air}$ ,  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $T_{bw}$  e  $T_g$  são as temperaturas (K) do ar no interior da chaminé, do ar no interior do edifício, do ar exterior, da superfície negra e do vidro, respetivamente. O parâmetro  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície absorvedora,  $\sigma$  é constante de Stefan-Boltzmann,  $cp_{air}$  e  $\rho_{air}$  são a capacidade térmica ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) e massa volúmica ( $kg \cdot m^{-3}$ ) do ar no interior da chaminé solar.

A solução do sistema implica a determinação da velocidade do ar na chaminé (equação (4.73)). De forma a linearizar o sistema de equações acima utilizou-se a seguinte aproximação (Rodrigues, Piedade e Braga 2009):

$$(T_{bw}^4 - T_g^4) \cong (T_{bw} - T_g) \times (T_{bw}^3 + T_g^3) \quad (4.50)$$

A soma dos cubos das temperaturas é considerada como constante e todo o sistema é solucionado iterativamente.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor são calculados a partir de:

$$h_g = \left| \frac{\lambda_g}{l_{SC}} \times 0.56 \times [Ra_g \times \sin(s_{SC})]^{1/4} \right| \quad (10^5 < Ra_g \times \sin(s_{SC}) < 10^{11}) \quad (4.51)$$

$$h_{bw} = \left| \frac{\lambda_g}{l_{SC}} \times 0.56 \times [Ra_c \times \sin(s_{SC})]^{1/4} + 0.13 \left[ Ra_{bw}^{1/3} - Ra_c^{1/3} \right] \right| \quad (10^5 < Ra_c \times \sin(s_{SC}) < 10^{11}) \quad (4.52)$$

$$\log(Ra_c) = 8.9 - 0.00178 \times \left( 90 - \frac{s_{SC} \times 180}{\pi} \right)^{1.82} \quad (4.53)$$

onde  $Ra_g$  e  $Ra_{bw}$  são os números de Rayleigh para o vidro e a superfície negra, respetivamente.  $Ra_c$  é o número de Rayleigh crítico, que é válido de  $10^5$  a  $10^9$  (VDI-Verlag GmbH 1993). Optou-se por usar os valores absolutos dos coeficientes de transferências de calor para evitar as situações em que os valores seriam negativos. O número de Rayleigh, para o vidro e para a superfície negra, é dado por:

$$Ra_{g/bw} = \frac{g \times \frac{1}{T_{air}} \times |T_{g/bw} - T_{air}| \times \rho_{air}^2 \times l_{SC}^3}{\mu_{air}^2} \times Pr \quad (4.54)$$

onde  $Pr$  é o número de Prandtl ( $\approx 0.71$ ) e  $\mu_{air}$  é a massa a viscosidade do ar na chaminé solar, dada em função da temperatura por:

$$\mu(T) = 10^{-10} \times T^2 + 2 \times 10^{-8} \times T - 8 \times 10^{-7} \quad (4.55)$$

Os parâmetros característicos dos materiais que compõem a chaminé solar utilizados neste modelo, como por exemplo as características do vidro e da superfície absorvedora, são iguais aos apresentados no caso de estudo de E. P. Sakonidou et al. (Tabela 4.3). Considerou-se que o fluxo de ar que atravessa a chaminé solar tem um único sentido, ascendente, nunca podendo circular no sentido descendente, sendo o fluxo de ar nulo sempre que as condições sejam favoráveis a esta circulação. O sistema de chaminé não tem constrangimentos de horários, logo funciona sempre que estejam reunidas condições para que o fluxo de ar seja ascendente, ou seja, sempre que a temperatura do ar no interior da chaminé solar seja superior à temperatura do ar no interior do espaço.

Tabela 4.3 – Características dos constituintes da chaminé solar.

Parâmetro		
Índice de refração do vidro	$n_2$	1.526
Coefficiente de extinção do vidro [ $m^{-1}$ ]	$K$	10
Espessura do vidro [m]	$e_g$	0.004
Absortância da parede negra absorvedora	$a_{bw}$	0.9
Emissividade da parede negra absorvedora	$\varepsilon$	0.95
Coefficiente global de transferência do isolamento [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]	$U_{bw}$	0.9
Coefficiente de transferência de calor do vidro [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]	$U_g$	9
Coefficiente de descarga	$C_D$	0.57

#### 4.4 Cálculo das necessidades de arrefecimento – Modelo 5R1C

Os cálculos de necessidade de arrefecimento foram feitos com recurso ao modelo 5R1C apresentado na norma EN ISO 13790, um método horário simplificado que permite determinar a temperatura de uma zona térmica e, de forma indireta, as suas necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento.

Este modelo baseia-se num sistema equivalente a um circuito elétrico R-C, ou seja, numa rede de temperaturas e cinco condutâncias (que estão relacionadas com resistências) e ainda uma capacitância térmica de massa do edifício. Para a aplicação deste modelo, assume-se o edifício como uma única zona térmica, pois considera-se que os ganhos solares estão uniformemente distribuídos e a temperatura interior é aproximadamente uniforme.

Este método foi utilizado para calcular as necessidades de arrefecimento com e sem sistema de arrefecimento passivo. Para o caso da existência de um sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, o modelo 5R1C foi integrado com os modelos de simulação dos tubos enterrados e da chaminé solar, de forma a poder-se determinar a temperatura de ventilação (que depende dos tubos) e o caudal de renovação do ar (que depende do efeito de flutuação da chaminé solar). Para o caso do sistema de tubos enterrados a temperatura de ventilação é determinada de forma semelhante, sendo o caudal de renovação do ar imposto artificialmente (de forma mecânica).

Para se estimar a temperatura interior e as necessidades de arrefecimento foi necessário criar um programa iterativo que fizesse cálculos horários. Este programa é composto por quatro passos. Numa primeira fase são calculados parâmetros característicos do edifício e, posteriormente, seguem-se as três etapas que permitem a determinação das necessidades de arrefecimento, contabilizando a inércia térmica do edifício e as cargas térmicas.

A Fig. 4.4 (a) apresenta o esquema utilizado neste trabalho, que apresenta uma alteração em relação ao modelo 5R1C.

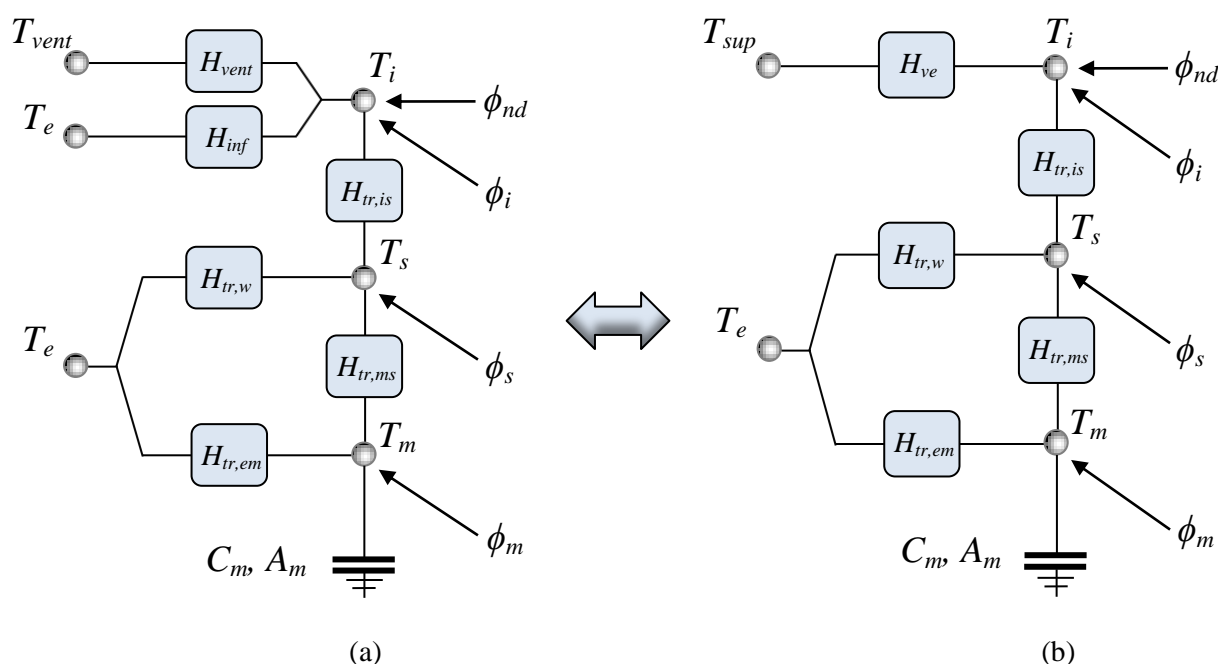


Fig. 4.4 – Esquema da rede de condutâncias (a) e rede equivalente de acordo com a Norma (b).

Legenda da Fig. 4.4:

- $T_i$  – Temperatura do espaço interior (K)
- $T_s$  – Temperatura auxiliar de “estrela” (K)
- $T_m$  – Temperatura auxiliar de massa térmica (K)
- $T_e$  – Temperatura exterior (K)

- $T_{vent}$  – Temperatura do ar de ventilação proveniente dos tubos enterrados (K)
- $T_{sup}$  – Temperatura equivalente do ar de ventilação (renovação do ar interior) (K)
- $\phi_{nd}$  – Carga térmica necessária para arrefecimento (W)
- $\phi_i$  – Fluxo de calor associado aos ganhos internos (W)
- $\phi_s$  – Fluxo de calor associado aos ganhos solares (W)
- $\phi_m$  – Fluxo de calor associado à massa térmica do edifício (W)
- $H_{vent}$  – Condutância de ventilação associada ao ar dos tubos enterrados (W.K<sup>-1</sup>)
- $H_{inf}$  – Condutância de infiltração (W.K<sup>-1</sup>)
- $H_{ve}$  – Condutância equivalente a  $H_{inf}$  e  $H_{vent}$  (W.K<sup>-1</sup>)
- $H_{tr,w}$  – Condutância dos envidraçados (W.K<sup>-1</sup>)
- $H_{tr,is}$  – Condutância auxiliar entre as temperaturas interior e “estrela” (W.K<sup>-1</sup>)
- $H_{tr,ms}$  – Condutância auxiliar entre as temperaturas de massa e “estrela” (W.K<sup>-1</sup>)
- $H_{tr,em}$  – Condutância auxiliar entre as temperaturas exterior e de massa (W.K<sup>-1</sup>)
- $C_m$  – Capacitância térmica (J.K<sup>-1</sup>)
- $A_m$  – Área de massa efetiva (m<sup>2</sup>)

Fez-se uma simplificação o esquema da Fig. 4.4 (a), entre o nó de  $T_i$  e os nós de  $T_{vent}$  e de  $T_e$  foi adotada uma condutância equivalente  $H_{ve}$ , calculada a partir da equação (4.56), e uma temperatura equivalente do ar de ventilação  $T_{sup}$ , segundo a equação (4.57), como demonstra o esquema da Fig. 4.4 (b). Este esquema está de acordo com o apresentado no modelo da norma.

$$H_{ve} = H_{inf} + H_{vent} \quad (4.56)$$

$$T_{sup} = \frac{H_{inf}}{H_{inf} + H_{vent}} \times T_e + \frac{H_{vent}}{H_{inf} + H_{vent}} \times T_{vent} \quad (4.57)$$

Num edifício é natural existir infiltração de ar proveniente do exterior, para contabilizar este parâmetro tem-se a condutância de infiltração de ar exterior ( $H_{inf}$ ), este também pode ser usado para se considerar a abertura de uma janela, por exemplo. O ar de ventilação do espaço, provém dos tubos enterrados, e é considerado na condutância de ventilação ( $H_{vent}$ ). Estas condutâncias podem ser determinadas por:

$$H_{inf} = \rho(T_e) \times c_p \times \phi_{inf} \quad (4.58)$$

$$H_{vent} = \rho(T_{vent}) \times c_p \times \phi_{vent} \quad (4.59)$$

onde  $\phi_{inf}$  é o valor do fluxo de ar associado à infiltração e  $c_p$  é a capacidade térmica do ar (1005 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a 298 K). O fluxo ar corresponde à ventilação do espaço é determinado através da velocidade do ar na chaminé solar ( $v$  em m.s<sup>-1</sup>) e pode ser obtido da seguinte forma:

$$\phi_{vent} = v \times e_{SC} \times w_{SC} \quad (4.60)$$

onde  $e_{SC}$  e  $w_{SC}$  é a espessura (m) e a largura da chaminé solar (m), respetivamente (ver Fig. 4.3). A massa volúmica do ar pode ser calculada através da equação (4.28).

As variáveis de *input* do sistema são:

- $T_{sup}$  – Temperatura equivalente do ar de ventilação (K)
- $T_e$  – Temperatura exterior (K)
- $\phi_{int}$  – Fluxo de calor associado às cargas internas (W)
- $\phi_{sol}$  – Fluxo de calor associado aos ganhos solares (W)
- $H_{ve}$  – Condutância de ventilação ( $W.K^{-1}$ )
- $H_{tr,w}$  – Condutância dos envidraçados ( $W.K^{-1}$ )
- $H_{tr,op}$  – Condutância dos elementos opacos ( $W.K^{-1}$ )

- Determinação dos parâmetros característicos do edifício

A área de massa efetiva ( $A_m$ ) e a capacitância térmica ( $C_m$ ) podem ser determinadas a partir da Tabela 4.4 em função da classe de inércia do edifício e da área efetiva de pavimento ( $A_f$ ), no caso de não estarem disponíveis valores exatos.

Tabela 4.4 – Valores padrão para a área de massa efetiva e capacitância térmica do edifício segundo a sua classe de inércia (EN ISO 13790 2007).

Classe de Inércia	$A_m$ (m <sup>2</sup> )	$C_m$ (J.K <sup>-1</sup> )
Muito baixa	$2.5 \times A_f$	$80\,000 \times A_f$
Baixa	$2.5 \times A_f$	$110\,000 \times A_f$
Média	$2.5 \times A_f$	$165\,000 \times A_f$
Elevada	$3.0 \times A_f$	$260\,000 \times A_f$
Muito Elevada	$3.5 \times A_f$	$370\,000 \times A_f$

As condutâncias entre as temperaturas interior e “estrela” ( $H_{tr,is}$ ), entre as temperaturas de massa e “estrela” ( $H_{tr,ms}$ ) e entre as temperaturas exterior e de massa ( $H_{tr,em}$ ) são parâmetros numéricos que fazem parte do modelo e podem ser calculados a partir de:

$$H_{tr,is} = h_{is} \times A_t \quad (4.61)$$

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \times A_m \quad (4.62)$$

$$H_{tr,em} = \left[ \frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}} \right]^{-1} \quad (4.63)$$

onde  $h_{ms}$  é o coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas de massa e “estrela” (tem o valor fixo de  $9.1 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) e  $h_{is}$  é o coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e “estrela” (tem o valor fixo de  $3.45 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) (EN ISO 13790 2007).

O parâmetro  $A_t$  é a área total das superfícies em contacto com o volume interior ( $m^2$ ) e pode ser aproximada por:

$$A_t = \Lambda_{at} \times A_f \quad (4.64)$$

onde  $\Lambda_{at}$  é a razão entre a área das superfícies em contacto com o volume interior e a área de pavimento, pode ser assumido como 4.5 (EN ISO 13790 2007).

De seguida apresenta-se as equações das condutâncias numéricas que fazem parte do modelo 5R1C:

$$H_{tr,1} = \left[ \frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{tr,is}} \right]^{-1} \quad (4.65)$$

$$H_{tr,2} = H_{tr,1} + H_{tr,w} \quad (4.66)$$

$$H_{tr,3} = \left[ \frac{1}{H_{tr,2}} + \frac{1}{H_{tr,ms}} \right]^{-1} \quad (4.67)$$

O valor das cargas internas ( $\phi_{int}$  em W) é determinado através da equação (4.68), considerando  $120 \text{ W.ocupante}^{-1}$  correspondente à energia libertada por pessoa,  $200 \text{ W.ocupante}^{-1}$  correspondente a equipamentos elétricos (computador pessoal e monitor) e iluminação utilizados por cada ocupante.

$$\phi_{int} = 120 \times N_{ocupantes} + 200 \times N_{ocupantes} \quad (4.68)$$

onde  $N_{ocupantes}$  o número total de ocupantes do espaço.

O fluxo  $\phi_i$  (W), proporcional às cargas internas é dado por:

$$\phi_i = 0.5 \times \phi_{int} \quad (4.69)$$

O valor do fluxo associado aos ganhos solares ( $\phi_{sol}$  em W) pode ser obtido da seguinte forma:

$$\phi_{sol} = \sum_k F_{sh,ob,k} \times A_{sol,k} \times I_{sol,k} - F_{r,k} \times \phi_{r,k} \quad (4.70)$$

onde  $F_{sh,ob,k}$  é o fator de redução devido a sombreamentos exteriores ao edifício na superfície  $k$ ,  $A_{sol,k}$  é a área solar efetiva da superfície  $k$  ( $m^2$ ),  $I_{sol,k}$  é a irradiância solar incidente nessa superfície ( $\text{W.m}^{-2}$ ) (equação (4.1)),  $F_{r,k}$  é o fator de forma entre a superfície  $k$  e o céu (um telhado horizontal sem sombreamento toma o valor de 1, uma parede vertical sem sombreamento toma o valor 0.5) e  $\phi_{r,k}$  é o fluxo de radiação entre essa superfície e o céu (W).

A área solar efetiva (m<sup>2</sup>) de uma superfície opaca e de uma superfície transparente são dadas pelas equações (4.71) e (4.72), respetivamente:

$$A_{sol} = \alpha_{s,c} \times R_{se} \times U_c \times A_c \quad (4.71)$$

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \times g_{gl} (1 - F_f) \times A_{w,p} \quad (4.72)$$

onde  $\alpha_{s,c}$  é o coeficiente de absorção solar da superfície opaca,  $R_{se}$  é a resistência térmica superficial exterior (m<sup>2</sup>.K.W<sup>-1</sup>),  $U_c$  é o coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca (W.m<sup>-2</sup>.K),  $A_c$  é a área do elemento (m<sup>2</sup>),  $F_{sh,gl}$  é o fator de redução devido a sombreamentos móveis,  $g_{gl}$  é a transmitância total de energia solar do elemento transparente,  $F_f$  fração de caixilharia/moldura,  $A_{w,p}$  área projetada do elemento envidraçado (m<sup>2</sup>).

O fluxo radiativo entre a superfície e o céu é obtido por:

$$\phi_{r,k} = R_{se} \times U_c \times A_c \times h_r \times \Delta T_{er} \quad (4.73)$$

onde,  $h_r$  é o coeficiente de transmissão de calor por radiação (W.m<sup>-2</sup>.K) e  $\Delta T_{er}$  é a diferença entre a temperatura do ar exterior e a temperatura aparente do céu (K).

A transmitância total de energia solar do elemento transparente pode ser calculada da seguinte forma:

$$g_{gl} = F_w \times g_{gl,n} \quad (4.74)$$

onde  $F_w$  é o fator de correção para um vidro plano e  $g_{gl,n}$  é a transmitância total de energia solar para a radiação perpendicular ao elemento transparente.

O fator de redução devido a sombreamentos móveis é obtido através de:

$$F_{sh,gl} = \frac{F_{sh,with} \times g_{gl,sh} + (1 - F_{sh,with}) \times g_{gl}}{g_{gl}} \quad (4.75)$$

onde  $F_{sh,with}$  é a fração de tempo em que existe sombreamento e  $g_{gl,sh}$  é a transmitância total de energia solar do elemento transparente quando existe sombreamento.

O fluxo  $\phi_s$  (W) que está associado aos ganhos solares, às cargas internas e à inércia do edifício, pode ser obtido por:

$$\phi_s = \left( 1 - \frac{A_m}{A_t} - \frac{H_{tr,w}}{9.1 \times A_t} \right) \times (\phi_i + \phi_{sol}) \quad (4.76)$$

O fluxo  $\phi_m$  (W) também está associado aos ganhos solares, às cargas internas e à inércia do edifício e pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$\phi_m = \frac{A_m}{A_t} (\phi_i + \phi_{sol}) \quad (4.77)$$

- Cálculo da temperatura interior sem sistemas de regulação da mesma (Etapa 1)

De início calcula-se a temperatura interior do espaço considerando que não existe controlo da mesma, considerando que  $\phi_{nd}$  é nulo.

O fluxo  $\phi_{mtot}$  (W) é dado por:

$$\phi_{mtot} = \phi_m + H_{tr,em} \times T_e + H_{tr,3} \frac{\phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_{tr,1} \left[ \frac{\phi_i}{H_{ve}} + T_{sup} \right]}{H_{tr,2}} \quad (4.78)$$

As temperaturas auxiliares que permitem determinar a temperatura interior,  $T_{m,t}$ ,  $T_m$  e  $T_s$  são obtidas através de:

$$T_{m,t} = \frac{T_{m,t-1} \left[ \frac{C_m}{3600} - 0.5 \times (H_{tr,3} + H_{tr,em}) \right] + \phi_{mtot}}{\frac{C_m}{3600} + 0.5 \times (H_{tr,3} + H_{tr,em})} \quad (4.79)$$

$$T_m = \frac{T_{m,t} + T_{m,t-1}}{2} \quad (4.80)$$

$$T_s = \frac{H_{tr,ms} \times T_m + \phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_{tr,1} \left( T_{sup} + \frac{\phi_i}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (4.81)$$

A temperatura interior é dada por:

$$T_i = \frac{H_{tr,is} \times T_s + H_{ve} \times T_{sup} + \phi_i}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (4.82)$$

- Cálculo das necessidades de arrefecimento (Etapa 2)

Considera-se um valor arbitrário para as necessidades de arrefecimento ( $\phi_{nd_{10}}$ ), que poder ser, por exemplo, igual a  $10A_f$ . Este valor permitirá fazer uma extrapolação e estimar as necessidades de arrefecimento no final. Nesta fase é calculada a temperatura interior  $T_{i_{10}}$  que resulta de uma carga térmica extraída de valor  $\phi_{nd_{10}}$ .

As temperaturas auxiliares  $T_{m,t}$  e  $T_m$  são calculadas de acordo com as equações (4.79) e (4.80), respetivamente. O fluxo  $\phi_{mtot}$  e a temperaturas  $T_s$  são dados por:

$$\phi_{mtot} = \phi_m + H_{tr,em} \times T_e + H_{tr,3} \frac{\phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_{tr,1} \left[ \frac{\phi_i + \phi_{nd_{10}}}{H_{ve}} + T_{sup} \right]}{H_{tr,2}} \quad (4.83)$$

$$T_s = \frac{H_{tr,ms} \times T_m + \phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_{tr,1} \left( T_{sup} + \frac{\phi_i + \phi_{nd_{10}}}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (4.84)$$

A temperatura interior resultante da climatização de valor  $\phi_{nd_{10}}$  é dada por:

$$T_{i_{10}} = \frac{H_{tr,is} \times T_s + H_{ve} \times T_{sup} + \phi_i + \phi_{nd_{10}}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (4.85)$$

As necessidades de arrefecimento são estimadas a partir do valor da temperatura interior sem sistemas de regulação da temperatura ( $T_i$ , equação (4.82)) e da temperatura obtida com o sistema arbitrado ( $T_{i_{10}}$ , equação (4.85)). É necessário definir a temperatura de *set-point*, que representa a temperatura que se pretende atingir com a climatização ( $T_{set}$ ), neste trabalho considerou-se como 25 °C. É de salientar que não foram contabilizadas as necessidades de aquecimento, logo não se definiu temperatura de *set-point* para aquecimento.

O valor das necessidades de arrefecimento (W) para se atingir a temperatura de *set-point* pode ser estimado através de:

$$\phi_{nd} = \phi_{nd_{10}} \frac{(T_{set} + 273.15) - T_i}{T_{i_{10}} - T_i} \quad (4.86)$$

- Cálculo da temperatura interior com sistema de regulação da mesma (Etapa 3)

Finalmente é necessário recalcular a temperatura interior com a carga térmica extraída ( $\phi_{nd}$ ) obtida na equação (4.86).

De novo, as temperaturas auxiliares  $T_{m,t}$  e  $T_m$  são calculadas de acordo com as equações (4.79) e (4.80), respetivamente, sendo o fluxo  $\phi_{mtot}$  e a temperaturas  $T_s$  dados por:

$$\phi_{mtot} = \phi_m + H_{tr,em} \times T_e + H_{tr,3} \frac{\phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_{tr,1} \left[ \frac{\phi_i + \phi_{nd}}{H_{ve}} + T_{sup} \right]}{H_{tr,2}} \quad (4.87)$$

$$T_s = \frac{H_{tr,ms} \times T_m + \phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_{tr,1} \left( T_{sup} + \frac{\phi_i + \phi_{nd}}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (4.88)$$

Finalmente, a temperatura interior resultante da climatização de valor  $\phi_{nd}$  é dada por:

$$T_i = \frac{H_{tr,is} \times T_s + H_{ve} \times T_{sup} + \phi_i + \phi_{nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (4.89)$$

Determinados os parâmetros do modelo 5R1C é possível estimar o valor total mensal da energia extraída por ventilação ( $Q_{vent}$  em J) através da condutância  $H_{ve}$  e da diferença entre a temperatura interior e a temperatura equivalente do ar de ventilação, como se demonstra na equação (4.90). Para se estimar a energia total mensal necessária de arrefecimento ( $Q_{nd}$  em J) usou-se o fluxo de necessidades de arrefecimento obtido da equação (4.86), como se mostra na equação (4.91).

$$Q_{vent} = \sum_{\text{horário}} H_{ve} \times (T_{sup} - T_i) \times 3600 \quad (4.90)$$

$$Q_{nd} = \sum_{\text{horário}} \phi_{nd,C} \times 3600 \quad (4.91)$$

- Valores de referência considerados

Utilizou-se como referência um dos gabinetes do edifício solar XXI para o cálculo das necessidades de arrefecimento, com e sem sistema de passivo. As características do edifício de referência não influenciam os resultados obtidos no método PCLR. Uma vez que o gabinete se encontra no interior de um edifício, considerou-se que as transferências de calor se realizam unicamente pela parede exterior, não havendo qualquer troca entre paredes interiores ao edifício. Este gabinete tem uma janela e sombreamento móvel exterior. Não foi considerado os tubos enterrados existentes para qualquer cálculo nem o painel solar fotovoltaico colocado na parede exterior. As características do edifício de referência são apresentadas na Tabela 4.5.

Considerou-se um sombreamento de 80 % da área do vão envidraçado, correspondendo a um fator de redução ( $F_{sh,gl}$ ) de 20 %, durante o período de arrefecimento. As cargas internas são contabilizadas diariamente, desde as 8 h da manhã até às 17 h, inclusive. Não foram considerados os dias de fim de semana nem períodos de férias em todos os cálculos efetuados, consequentemente todos os dias apresentam cargas internas.

Tabela 4.5 – Características do edifício de referência.

Parâmetro		
Área efetiva solar opaca [m <sup>2</sup> ]	$A_{sol}$	6.07
Área efetiva solar dos envidraçados [m <sup>2</sup> ]	$A_w$	4.43
Área efetiva de pavimento [m <sup>2</sup> ]	$A_f$	16.70
Volume interior do espaço [m <sup>3</sup> ]	$V$	50.10
Coeficiente de transferência de calor dos envidraçados [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$h_{tr_w}$	4.5
Coeficiente de transferência de calor dos elementos opacos [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$h_{tr_{op}}$	0.45
Cargas internas [W]	$\phi_{int}$	640
Infiltração [RPH]	-	0.3
Número de ocupantes	$N_{ocupantes}$	2

## 5. Métodos simplificados de caracterização de sistemas passivos – Métodos *Load Ratio*

### 5.1 Método *Solar Load Ratio* (SLR)

O método SLR foi criado nos anos 80 e permitiu o cálculo das necessidades de aquecimento de casas solares passivas de forma rápida e simples (Balcomb 1980). É um método mensal simplificado baseado na energia solar absorvida pelo edifício, mais precisamente, este método baseia-se na razão entre a energia solar absorvida pelo edifício e a energia necessária para aquecimento na ausência de ganhos solares. Assim, define-se o parâmetro *Solar Load Ratio* (SLR) como:

$$SLR = \frac{Q_{sol}}{Q_{ref}} \quad (5.1)$$

onde  $Q_{sol}$  são os ganhos solares (J) e  $Q_{ref}$  é a energia de referência, que corresponde à carga de aquecimento necessária no caso de não haver ganhos solares (J).

Num edifício nem toda a energia solar absorvida é útil, pois a capacidade térmica do edifício é limitada (Panão, Camelo e Gonçalves 2012). A parte dos ganhos solares que são úteis para reduzir as necessidades de aquecimento é definida por *Solar Heating Fraction* (SHF). As necessidades de aquecimento ( $Q_{nd}$  em J) são estimadas em função de SHF através de:

$$Q_{nd} = (1 - SHF) \times Q_{ref} \quad (5.2)$$

$$SHF = 1 - \frac{Q_{nd}}{Q_{ref}} \quad (5.3)$$

Cada sistema de aquecimento passivo apresenta uma relação específica entre o SHF e o SLR, uma vez que o parâmetro SHF é uma função de SLR. Para o caso específico das estufas SHF é uma função de  $SLR^*$ , valor corrigido de SLR para estes casos, e pode ser traduzida por:

$$SHF = 1 - b \times e^{-c \times SLR^*} \quad (5.4)$$

O parâmetro  $SLR^*$  é definido por:

$$SLR^* = \frac{Q_{abs} - \xi \times Q_{ht}}{Q_{ref}} \quad (5.5)$$

onde  $Q_{abs}$  é a energia solar absorvida pela estufa (J) e  $Q_{ht}$  é a energia transferida pela envolvente da estufa (J). O parâmetro empírico  $\xi$  é obtido através de correlações para cada tipo estufa (é dependente da sua geometria), assim como os coeficientes  $b$  e  $c$ .

Estas relações permitem estimar de forma simples as necessidades de aquecimento de um edifício tendo em conta o contributo do sistema passivo de aquecimento. Este tipo de correlação tem desvios padrão da ordem dos 8 % (Balcomb 1980).

## 5.2 Método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR)

Com base no método *Solar Load Ratio* (SLR) existente para os sistemas de aquecimento passivo, desenvolveu-se o método *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR) para caracterizar os sistemas passivos de arrefecimento. Este método simplificado permite fazer uma estimativa das necessidades de energia mensais para arrefecimento de um edifício sem recorrer a modelos de simulação detalhados. O modelo tem por base a razão entre a capacidade de arrefecimento do sistema passivo e a carga térmica necessária extrair. Assim se define o parâmetro adimensional *Passive Cooling Load Ratio* (PCLR):

$$PCLR = \frac{Q_{vent}}{Q_{ref}} \quad (5.6)$$

onde  $Q_{vent}$  é a energia de ventilação extraída pelo sistema passivo de arrefecimento (J) e  $Q_{ref}$  é a energia de referência representada pelas cargas térmicas a extrair (J).

As necessidades de arrefecimento ( $Q_{nd}$  em J) podem ser estimadas através da seguinte equação:

$$Q_{nd} = (1 - PCF) \times Q_{ref} \quad (5.7)$$

$$PCF = 1 - \frac{Q_{nd}}{Q_{ref}} \quad (5.8)$$

onde *PCF* (*Passive Cooling Fraction*) é contributo do sistema passivo para a redução das necessidades de arrefecimento. Este parâmetro pode ser considerado como a eficiência do sistema passivo de arrefecimento. O *PCF* é uma função de *PCLR* e esta relação está dependente do tipo de sistema passivo de arrefecimento.

Para se estimar os valores de *PCLR* e *PCF*, e por sua vez se estimar a carga térmica necessária para o arrefecimento do edifício, é necessário estimar o valor de  $Q_{ref}$ . A energia de referência, corresponde à energia necessária extrair ao compartimento quando não está instalado qualquer sistema de controlo da temperatura é dada por:

$$Q_{ref} = Q_{sol} + Q_{int} \quad (5.9)$$

$Q_{sol}$  é a energia correspondente aos ganhos solares (J) e  $Q_{int}$  às cargas internas (J). As cargas internas incluem somente o calor sensível e devem ser contabilizadas caso a caso, dependendo do número de ocupantes do espaço, dos equipamentos elétricos e da iluminação. Os ganhos solares devem ser contabilizados também caso a caso, pode ser utilizada a equação (4.70) para a sua determinação, tendo em conta o carácter mensal do método.

### 5.2.1 Sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar

Para o sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar a relação entre  $PCF$  e  $PCLR^*$ , que por sua vez resulta de uma correção a  $PCLR$ , é uma curva dada por:

$$PCF = 1 - e^{-c \times PCLR^*} \quad (5.10)$$

O  $PCF$  depende do coeficiente  $c$  e de  $PCLR^*$ . Para determinar o  $PCLR^*$  é necessário determinar  $B$ , um fator de ajuste que depende da temperatura média mensal que permite corrigir o  $PCLR$  de forma a juntar as curvas dependentes do clima a uma única curva. Este fator de correção ( $B$ ) é obtido a partir da relação entre  $PCF$  e  $PCLR$ , para cada curva mensal.

O parâmetro  $PCLR^*$  é dado por:

$$PCLR^* = B(\bar{T}_e) \times PCLR \quad (5.11)$$

O fator de correção do  $PCLR$  ( $B$ ) pode ser estimado através de:

$$B(\bar{T}_e) = b_1 \times e^{b_2 \times (\bar{T}_e + 273.15)} \quad (5.12)$$

Para se aplicar o método PCLR é necessário estimar a energia transferida por ventilação através do sistema passivo ( $Q_{vent}$ ). Neste trabalho foi desenvolvido um ajuste que pretende fazer uma estimativa deste parâmetro de uma forma rápida e simples. O ajuste foi feito a partir dos resultados obtidos no modelo de simulação do sistema passivo. Assim, o valor de  $Q_{vent}$  (GJ) pode ser aproximado através de:

$$Q_{vent} = a_1 \times l_{SC} + a_2 \times w_{SC} + a_3 \times e_{SC} + a_4 \times d_t + a_5 \times z_t + a_6 \times x_t + a_7 \times s_{SC} + a_8 \times \bar{G} + a_9 \times (\bar{T}_e + 273.15) + a_{10} \times \bar{\theta} + a_{11} \quad (5.13)$$

onde  $a_n$  representa os coeficientes do ajuste,  $l_{SC}$ ,  $w_{SC}$  e  $e_{SC}$  são a altura, a largura e a espessura da chaminé solar (m),  $s_{SC}$  é a inclinação da chaminé solar ( $^\circ$ ),  $d_t$ ,  $z_t$  e  $x_t$  são o diâmetro, a profundidade e o comprimento do tubo enterrado (m),  $\bar{G}$  é a radiação média mensal incidente na chaminé solar ( $W \cdot m^{-2}$ ) (pode ser obtido através da equação (4.1) e determinado um valor médio),  $\bar{T}_e$  é a temperatura exterior média mensal ( $^\circ C$ ) e  $\bar{\theta}$  é amplitude térmica média mensal ( $^\circ C$ ).

Os intervalos dos parâmetros característicos do sistema para os quais o ajuste ao  $Q_{vent}$  tem validade, respeitando o fator de geometria apresentado na equação (5.14), são:

Tabela 5.1 – Intervalos de validade dos parâmetros característicos do sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar.

Parâmetro	Intervalo de validade (m)
$l_{SC}$	[2.00 ; 5.00]
$w_{SC}$	[0.80 ; 2.50]
$e_{SC}$	[0.10 ; 0,40]
$d_t$	[0.15 ; 0.40]
$z_t$	[1.50 ; 5.00]
$x_t$	[10.00 ; 20.00]

A inclinação da chaminé solar ( $s_{SC}$ ) pode variar entre  $40^\circ$  e  $90^\circ$ .

O fator de geometria não deve ser inferior a 0.30 e é dado por:

$$f = \frac{w_{sc}}{l_{sc}} \quad (5.14)$$

Os coeficientes  $a_n$ ,  $b_n$  e  $c$  diferem para os valores de espessura do chaminé ( $e_{sc}$ ) e também para diferentes os valores de temperatura exterior média mensal ( $\bar{T}_e$  em °C), como se mostra na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Coeficientes  $a_n$ ,  $b_n$  e  $c$  para o sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar.

	$0.1 \leq e_{sc} < 0.2$	$0.2 \leq e_{sc} < 0.3$	$0.3 \leq e_{sc} \leq 0.4$
$a_1$	$7.1217 \times 10^{-2}$	$5.8671 \times 10^{-2}$	$4.9643 \times 10^{-2}$
$a_2$	$2.1551 \times 10^{-1}$	$3.4315 \times 10^{-1}$	$4.9499 \times 10^{-1}$
$a_3$	1.6510	$7.8241 \times 10^{-1}$	$4.6865 \times 10^{-1}$
$a_4$	$-3.6702 \times 10^{-1}$	$-3.3536 \times 10^{-1}$	$-2.9252 \times 10^{-1}$
$a_5$	$-8.3492 \times 10^{-4}$	$-7.7549 \times 10^{-4}$	$-7.3514 \times 10^{-4}$
$a_6$	$5.1814 \times 10^{-3}$	$4.5612 \times 10^{-3}$	$4.1553 \times 10^{-3}$
$a_7$	$2.7572 \times 10^{-3}$	$3.4007 \times 10^{-3}$	$3.5975 \times 10^{-3}$
$a_8$	$7.4109 \times 10^{-4}$	$8.7459 \times 10^{-4}$	$9.0003 \times 10^{-4}$
$a_9$	$\begin{cases} 8.9460 \times 10^{-4} & \bar{T}_e \leq 21^\circ\text{C} \\ 7.8640 \times 10^{-4} & \bar{T}_e > 21^\circ\text{C} \end{cases}$	$\begin{cases} 9.5519 \times 10^{-3} & \bar{T}_e \leq 21^\circ\text{C} \\ 9.3219 \times 10^{-3} & \bar{T}_e > 21^\circ\text{C} \end{cases}$	$\begin{cases} 1.2979 \times 10^{-2} & \bar{T}_e \leq 23^\circ\text{C} \\ 1.3301 \times 10^{-2} & \bar{T}_e > 23^\circ\text{C} \end{cases}$
$a_{10}$	$1.6545 \times 10^{-2}$	$1.8327 \times 10^{-2}$	$1.9135 \times 10^{-2}$
$a_{11}$	-1.0505	-3.6685	-4.8024
$b_1$	$3.4158 \times 10^{19}$	$1.2323 \times 10^{23}$	$9.3268 \times 10^{30}$
$b_2$	$-1.4784 \times 10^{-1}$	$-1.7472 \times 10^{-1}$	$-2.3568 \times 10^{-1}$
$c$	$7.9086 \times 10^{-1}$	$6.5386 \times 10^{-1}$	$5.5884 \times 10^{-1}$

### 5.2.2 Sistemas de tubos enterrados

O método *PCLR* pode ser aplicado a um edifício cujo sistema passivo de arrefecimento consiste num tubo enterrado auxiliado por uma ventoinha que permite manter o caudal de renovação do ar. Neste caso a curva que relaciona o *PCF* e o *PCLR* tem a mesma expressão que no caso do sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, equação (5.10). Neste sistema a relação entre o *PCLR* e *PCLR\** e o fator de ajuste *B* são obtidos de igual forma, através das equações (5.11) e (5.12).

A equação que permite estimar a energia extraída por ventilação ( $Q_{vent}$ ) é obtida da mesma forma que no caso do sistema combinado de tubos e chaminé solar e é dada por:

$$Q_{vent} = a_1 \times d_t + a_2 \times z_t + a_3 \times x_t + a_4 \times \varphi_{vent} + a_5 \times (\bar{T}_e + 273.15) + a_6 \times \bar{\theta} + a_7 \quad (5.15)$$

onde  $\varphi_{vent}$  é o caudal de renovação de ar, que corresponde ao fluxo de ar que atravessa o tubo enterrado ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ). Os coeficientes  $a_n$ ,  $b_n$  e  $c$  são dados na Tabela 5.3. O coeficiente  $a_5$  depende da temperatura exterior média, como se mostra na mesma tabela; apesar da diferença dos valores do coeficiente ser pequena não pode ser desprezada, pois tem influência nos resultados.

Tabela 5.3 – Coeficientes  $a_n$ ,  $b_n$  e  $c$  para o sistema de tubos enterrados.

$a_1$	$-9.5729 \times 10^{-2}$
$a_2$	$-9.0012 \times 10^{-4}$
$a_3$	$3.9166 \times 10^{-3}$
$a_4$	$1.9831 \times 10^{-3}$
$a_5$	$\begin{cases} -2.0600 \times 10^{-2} & \bar{T}_e \leq 21^\circ\text{C} \\ -2.0300 \times 10^{-2} & \bar{T}_e > 21^\circ\text{C} \end{cases}$
$a_6$	$5.7000 \times 10^{-3}$
$a_7$	5.9519
$b_1$	$3.1265 \times 10^{30}$
$b_2$	$-2.3484 \times 10^{-1}$
$c$	1.2176

Os intervalos dos parâmetros característicos do sistema de tubos enterrados para os quais o ajuste de  $Q_{vent}$  tem validade são:

Tabela 5.4 – Intervalos de validade dos parâmetros característicos do sistema de tubos enterrados.

Parâmetro	Intervalo de validade (m)
$d_t$	[0.15 ; 0.40]
$z_t$	[1.50 ; 5.00]
$x_t$	[10.00 ; 20.00]

O caudal  $\varphi_{vent}$  deve pertencer ao intervalo [100 ; 200]  $m^3 \cdot h^{-1}$ .

## 6. Resultados

### 6.1 Exemplo de um sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar

O modelo numérico de simulação horária permite traçar o perfil de temperatura do ar interior nos casos de estar instalado um sistema passivo de arrefecimento e de não estar instalado qualquer sistema de regulação da temperatura interior. Para se demonstrar os resultados obtidos com o modelo de simulação, no que diz respeito a perfis de temperaturas e ao caudal de renovação do ar, foi escolhido um sistema combinado de chaminé solar e tubos enterrados com determinadas características, presentes na Tabela 6.1, e inclinação da chaminé solar de 50°. Foram escolhidos três dias no final do mês de julho, pertencentes ao clima de Lisboa, com temperatura média exterior de 20.7 °C e radiação solar média incidente no plano da chaminé solar de 518.3 W/m<sup>2</sup>.

Tabela 6.1 – Características do sistema de arrefecimento passivo.

Parâmetro [m]	
$l_{SC}$	3.5
$w_{SC}$	1.2
$e_{SC}$	0.15
$d_t$	0.3
$z_t$	4
$x_t$	15

A Fig. 6.1 mostra o perfil de temperatura do ar exterior, do ar no interior da chaminé solar e do ar à saída do tubo enterrado. Traçou-se ainda o perfil de temperaturas e do ar interior com e sem sistema de arrefecimento passivo. O perfil do caudal de renovação de ar e a radiação incidente na chaminé solar são mostrados na Fig. 6.2.

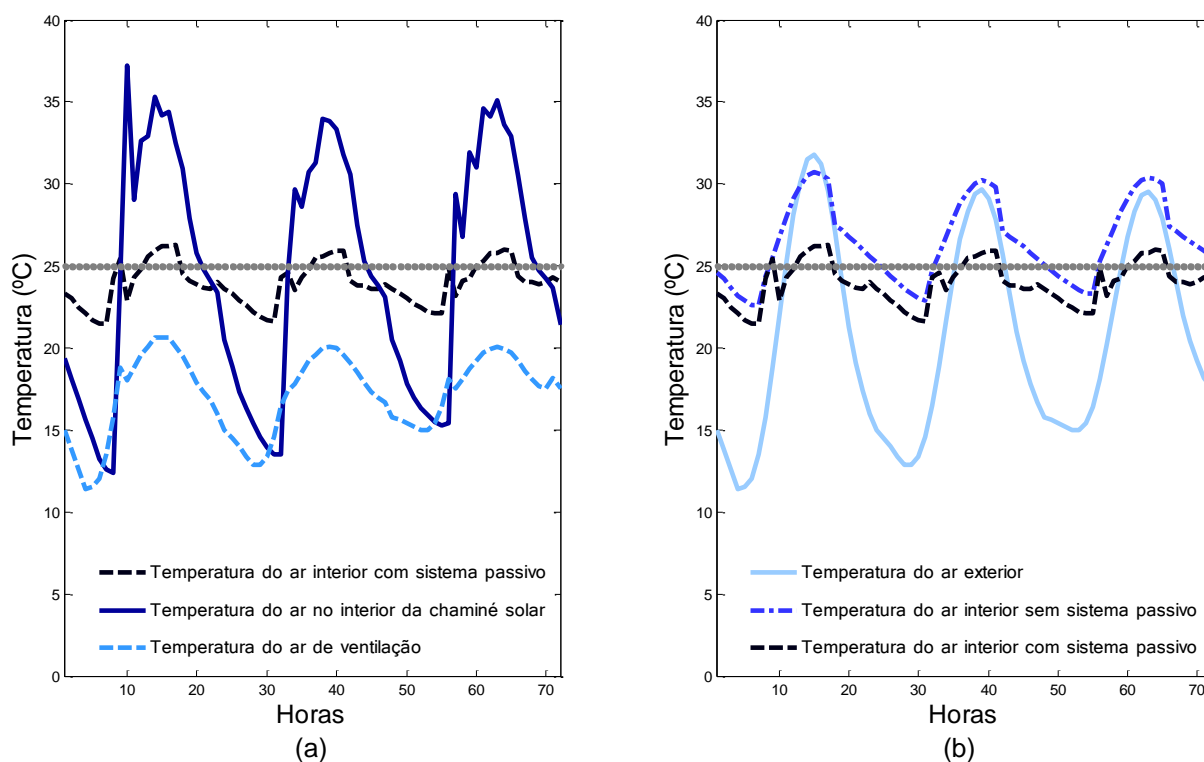


Fig. 6.1 – Temperaturas do ar interior com sistema passivo de arrefecimento, do ar no interior da chaminé solar e do ar de ventilação (a). Temperaturas do ar exterior e do ar interior com e sem sistema instalado e temperatura do ar de ventilação (b).

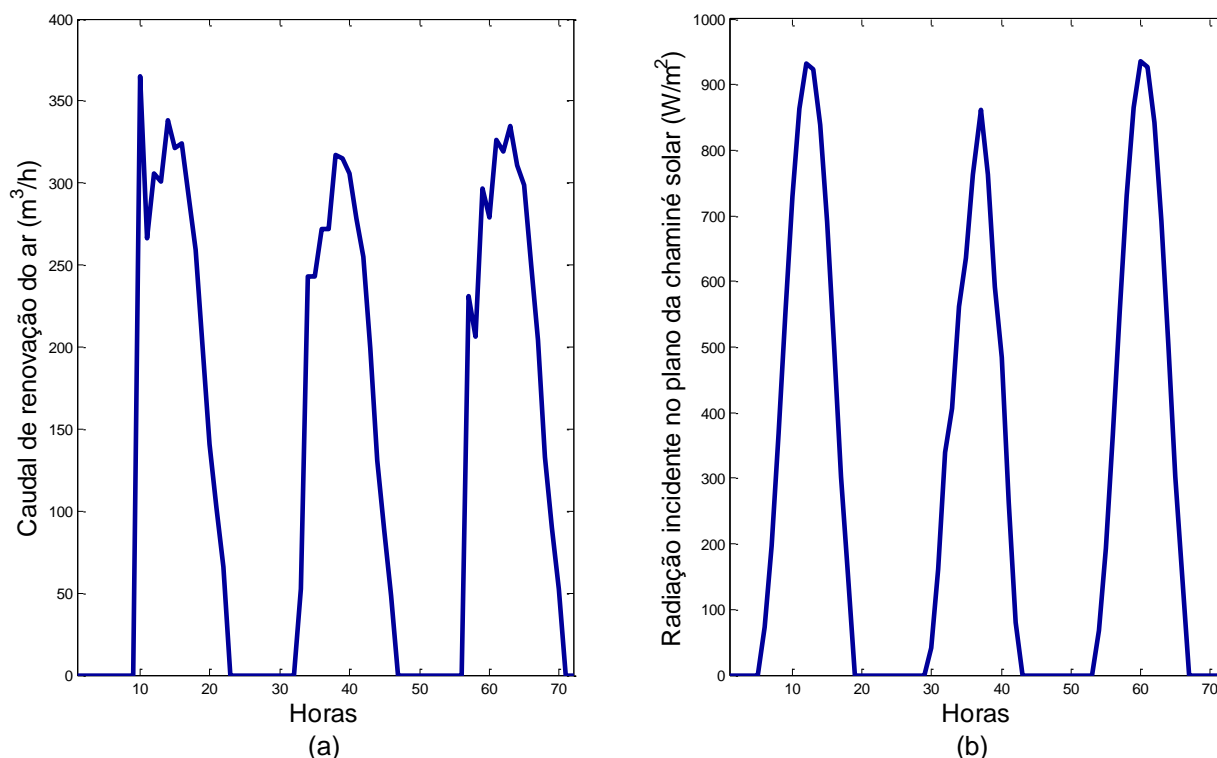


Fig. 6.2 – Perfil do caudal de renovação do ar resultante do efeito da chaminé solar (a) e da radiação incidente no plano da chaminé solar (b).

A Fig. 6.1 (a) permite verificar que a temperatura do ar no interior da chaminé solar é superior às outras temperaturas no período diurno, sendo a diferença em relação à temperatura do ar interior a que promove o efeito de flutuação da chaminé solar. Este gráfico mostra a que a temperatura de ventilação (maioritariamente associada ao efeito do tubo enterrado) é inferior à temperatura do ar interior durante o dia e a noite, esta diferença diurna permite fazer o arrefecimento do espaço, pois o ar interior é renovado pelo ar de ventilação de menor temperatura. Comparando o gráfico (a) e (b) da Fig. 6.1 nota-se que a temperatura do ar exterior é superior à temperatura do ar de ventilação no período diurno, esta diferença demonstra a capacidade do ar arrefecer pela troca de calor com o solo. Durante a noite a temperatura do ar de ventilação é igual à temperatura exterior por não haver caudal de renovação de ar.

Fazendo uma análise da Fig. 6.1 (b) constata-se que sem sistema de arrefecimento passivo a temperatura do ar no interior do gabinete é superior à temperatura exterior na maioria das horas, no entanto, se se instalar o sistema passivo existe uma atenuação dos picos máximos e a temperatura ultrapassa os 25 °C (temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia para arrefecimento) em curtos períodos de tempo e em poucos graus.

O valor do caudal de renovação do ar interior está associado à diferença de temperaturas entre o ar interior e o ar no interior da chaminé solar que, por sua vez, está relacionada com a radiação incidente na chaminé solar. É a radiação solar incidente na chaminé que aquece o ar do seu interior e promove o efeito de flutuação, aumentando a capacidade de ventilação do espaço. Por esse motivo os perfis do caudal de renovação do ar e da temperatura do ar na chaminé solar são semelhantes ao perfil de radiação, no sentido em que existe caudal quando existe radiação (Fig. 6.2) e a temperatura aumenta e diminuição com a mesma (Fig. 6.1 (a)). Quanto maior for a radiação solar incidente, maior será a diferença entre a temperatura do ar na chaminé solar e do interior e maior é o caudal de renovação de ar. Este anula-se quando a temperatura do ar na chaminé solar é inferior à temperatura do ar interior, no período noturno, sendo esta uma condição de funcionamento da chaminé solar.

Para este sistema em particular determinou-se os parâmetros do método PCLR que permitem estimar as necessidades de arrefecimento com os dados a partir do modelo de simulação e a com as equações que constituem o próprio método. A Tabela 6.2 apresenta os resultados intermédios e as necessidades de arrefecimento calculadas a partir do modelo de simulação e do método PCLR, os desvios e os erros relativos. Para se determinar os parâmetros e estimar as necessidades a partir do método PCLR foram utilizadas as equações apresentadas nos capítulos 5 e 5.2.1. Note-se que o valor de  $Q_{ref}$  apresentado inclui o total de ganhos internos e solares no mês de julho e o  $Q_{nd}$  representa as necessidades de arrefecimento para o mesmo mês.

Tabela 6.2 – Comparação dos resultados do método PCLR e do modelo de simulação para um sistema passivo de arrefecimento em particular

	Modelo de Simulação	Método PCLR	Desvio	Erro relativo (%)
$Q_{ref}$ [GJ]	1.010		-	-
$Q_{vent}$ [GJ]	0.587	0.600	0.014	2.3
$PCLR$	0.581	0.594	0.014	2.3
$B$	3.607	3.553	0.054	1.5
$PCLR^*$	2.095	2.112	0.017	0.8
$PCF$	0.813	0.812	0.002	0.2
$Q_{nd}$ [GJ]	0.189	0.190	0.002	-

Foi calculado um erro normalizado (equação (6.1)) para se fazer a comparação entre os resultados das necessidades de arrefecimento obtidas através do método PCLR e os resultados do método de simulação horária. O erro relativo não permite fazer esta análise, pois não tem significado quando as necessidades de arrefecimento obtidas por simulação são nulas ou muito próximas de zero.

$$E = \frac{|Q_{nd\text{simulação}} - Q_{nd\text{PCLR}}|}{Q_{ref}} \quad (6.1)$$

Em relação às necessidades de arrefecimento o erro normalizado obtido para este sistema foi de 0.16 %.

Este sistema passivo combinado apresenta um  $PCF$  de 0.8, o que indica que terá capacidade para extrair 80 % das cargas totais de referência. Os restantes 20 % devem ser colmatados por outro sistema de arrefecimento.

## 6.2 Sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar

- Sistemas com chaminés solares de espessuras entre 0.1 e 0.2 m

Os coeficientes do método PCLR são obtidos através dos ajustes aos pontos resultantes do modelo de simulação horária. O parâmetro *PCF* apresenta uma relação exponencial com o parâmetro *PCLR*. Para obter os coeficientes em função das características do sistema foi necessário determinar os parâmetros *PCF* e *PCLR* com os resultados do modelo de simulação horária para vários sistemas de diferentes dimensões.

Os cálculos são feitos para cada um dos seis climas e são determinados valores médios mensais de forma a calcular *PCLR* e *PCF*. Os sistemas diferentes, que originaram os ajustes, resultam das combinações entre os seguintes parâmetros característicos:

$$l_{sc} = \{2.0 \ 3.5 \ 4.0 \ 5.0\} \quad (\text{m}) \quad (6.2)$$

$$w_{sc} = \{0.80 \ 1.20 \ 1.75 \ 2.00 \ 2.50\} \quad (\text{m}) \quad (6.3)$$

$$e_{sc} = \{0.10 \ 0.15 \ 0.20\} \quad (\text{m}) \quad (6.4)$$

$$s_{sc} = \{40 \ 50 \ 65 \ 90\} \quad (^\circ) \quad (6.5)$$

$$d_i = \{0.150 \ 0.275 \ 0.400\} \quad (\text{m}) \quad (6.6)$$

$$z_i = \{1.50 \ 2.75 \ 5.00\} \quad (\text{m}) \quad (6.7)$$

$$x_i = \{10 \ 15 \ 20\} \quad (\text{m}) \quad (6.8)$$

Excetuando as combinações que resultam em fatores de forma inferiores ao limite mínimo, foram calculados 5184 pontos (*PCLR*, *PCF*) por cada mês da estação de arrefecimento dos seis climas, num total de 145 152 pontos. Para cada uma destas combinações foi feito o ajuste a dez variáveis para determinação da energia transferida por ventilação ( $Q_{vent}$ ), este ajuste não pode ser mostrado graficamente, pelo que são apenas apresentados os seus coeficientes na Tabela 5.2, sendo o coeficiente de correlação do ajuste ( $R^2$ ) de 0.84. Sendo o  $Q_{vent}$  resultante do ajuste aos parâmetros característicos permite-se a extrapolação para valores dentro dos limites indicados na Tabela 5.1. O valor de  $R^2$  foi determinado através da seguinte equação, uma vez que sofreu alterações dependentes da radiação incidente na chaminé solar:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum (\overline{Q_{vent\_simulação}} - \overline{Q_{vent\_simulação}}) \times (\overline{Q_{vent\_ajuste}} - \overline{Q_{vent\_ajuste}}) \right]^2}{\sum (\overline{Q_{vent\_simulação}} - \overline{Q_{vent\_simulação}})^2 \times \sum (\overline{Q_{vent\_ajuste}} - \overline{Q_{vent\_ajuste}})^2} \quad (6.9)$$

A Fig. 6.3 apresenta os pontos (*PCLR*, *PCF*) e as respetivas curvas de ajuste, dos cinco meses da estação de arrefecimento para o clima de Lisboa. As curvas e os pontos correspondentes aos restantes cinco climas podem ser consultadas em Anexo (Fig. 9.1, Fig. 9.2, Fig. 9.3, Fig. 9.4 e Fig. 9.5). Nestes

gráficos não são apresentados todos os pontos que deram origem aos coeficientes do ajuste, por uma questão de facilitar a visualização dos mesmos.

Os ajustes exponenciais apresentados na Fig. 6.3 permitem determinar os parâmetros  $B$  que farão a correção do  $PCLR$  (equação (5.11)). A relação existente entre  $PCF$  e  $PCLR$  é dada pela equação (6.10), onde o coeficiente  $\alpha$  não tem qualquer interesse no método PCLR.

$$PCF = 1 - \alpha \times e^{-B \times PCLR} \quad (6.10)$$

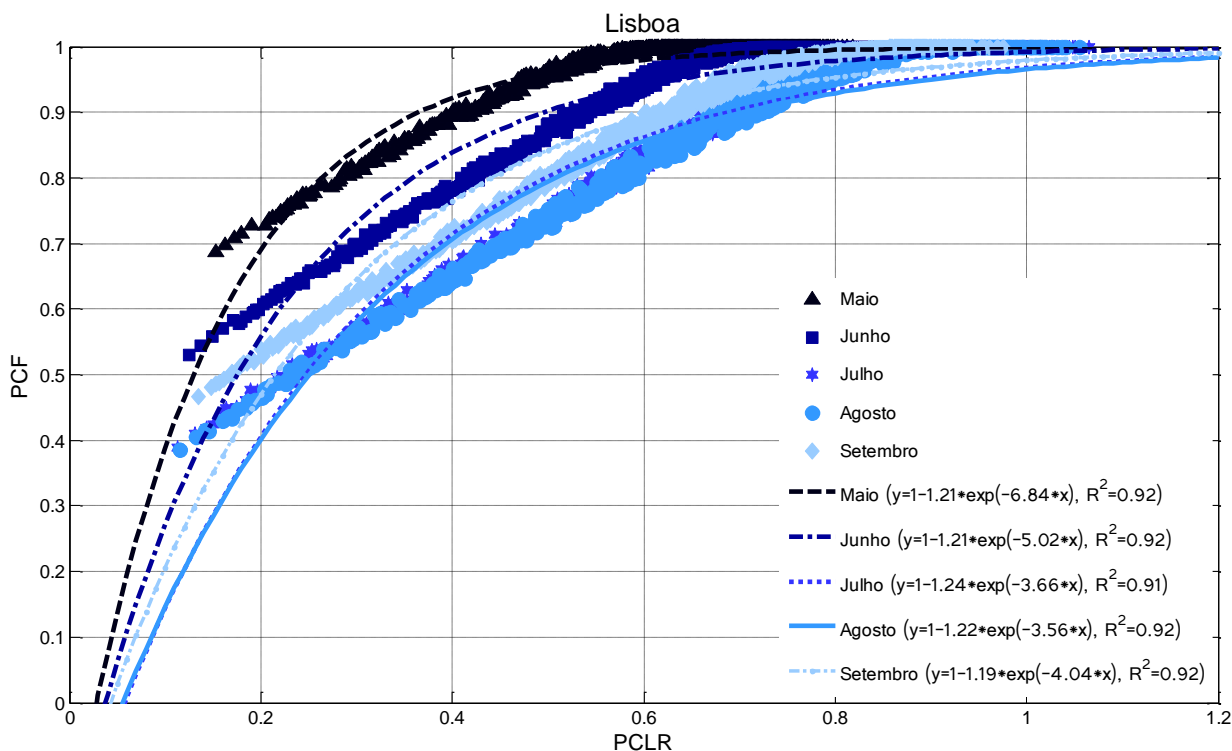


Fig. 6.3 – Curvas mensais de  $PCF$  em função de  $PCLR$  e respetivos ajustes exponenciais para o clima de Lisboa.

A Fig. 6.3 mostra que, para os mesmos valores de  $PCLR$  os pontos apresentam valores de  $PCF$  mais elevados conforme o mês, o que indica que o perfil dos pontos está associado à temperatura exterior média. Os meses com temperaturas exteriores médias mais baixas apresentam curvas acima dos meses com temperaturas mais elevadas. O mesmo se sucede nos outros climas, como é possível verificar pelos seus gráficos em anexo.

Analisando os conjuntos de pontos apresentados na Fig. 6.3 é possível verificar que para valores de  $PCLR$  inferiores a 0.7, aproximadamente, o ajuste exponencial não é o ideal, uma vez que os pontos parecem dispostos numa relação linear. Contudo, para valores superiores a 0.7, aproximadamente, os pontos dispõem-se em curva até atingirem o máximo de 1. Esta relação linear é desprezada, uma vez que os resultados finais serão obtidos a partir de valores corrigidos de  $PCLR$ , pelo que este ajuste unicamente exponencial serve apenas para determinar o parâmetro  $B$ , não sendo necessários os seus coeficientes no método PCLR em si. Esta relação linear apresenta-se para todos os climas, sendo variável o valor  $PCLR$  para o qual a disposição dos pontos muda de relação (ver Fig. 9.1, Fig. 9.2, Fig. 9.3, Fig. 9.4 e Fig. 9.5 em anexo).

Para cada um dos meses dos seis climas existe um valor de  $B$ , o que perfaz um total de 28 dados. Este parâmetro depende da temperatura exterior média de cada um dos meses e pode ser ajustado através de uma curva exponencial, como se mostra na Fig. 6.4. Desta forma são obtidos os coeficientes  $b_1$  e  $b_2$ , presentes na Tabela 5.2., que compõem o método PCLR.

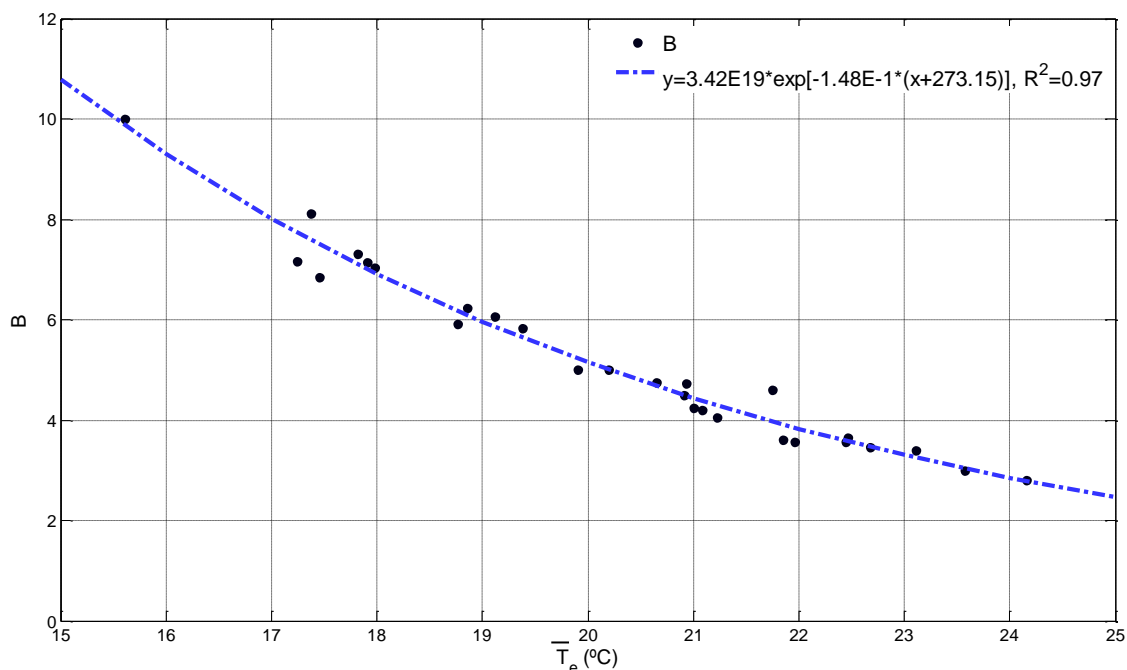


Fig. 6.4 – Conjunto de todos os pontos  $B$  em função da temperatura exterior média mensal e respetivo ajuste exponencial.

Ao fazer-se a correção do parâmetro  $PCLR$  para  $PCLR^*$  (equação (5.11)) é possível ajustar as curvas mensais de todos os climas a uma única curva, como se demonstra na Fig. 6.5. A figura (a) apresenta os pontos  $PCF$  em função de  $PCLR$  de todos os meses para todos os climas (não tendo sido excluídos pontos). A figura (b) apresenta os resultados depois de aplicado o respetivo fator de correção  $B$  a cada um dos pontos. Neste caso, é possível realizar-se um único ajuste de  $PCF$  em função de  $PCLR^*$  (equação (5.10)) e determinar-se o coeficiente  $c$  da Tabela 5.2.

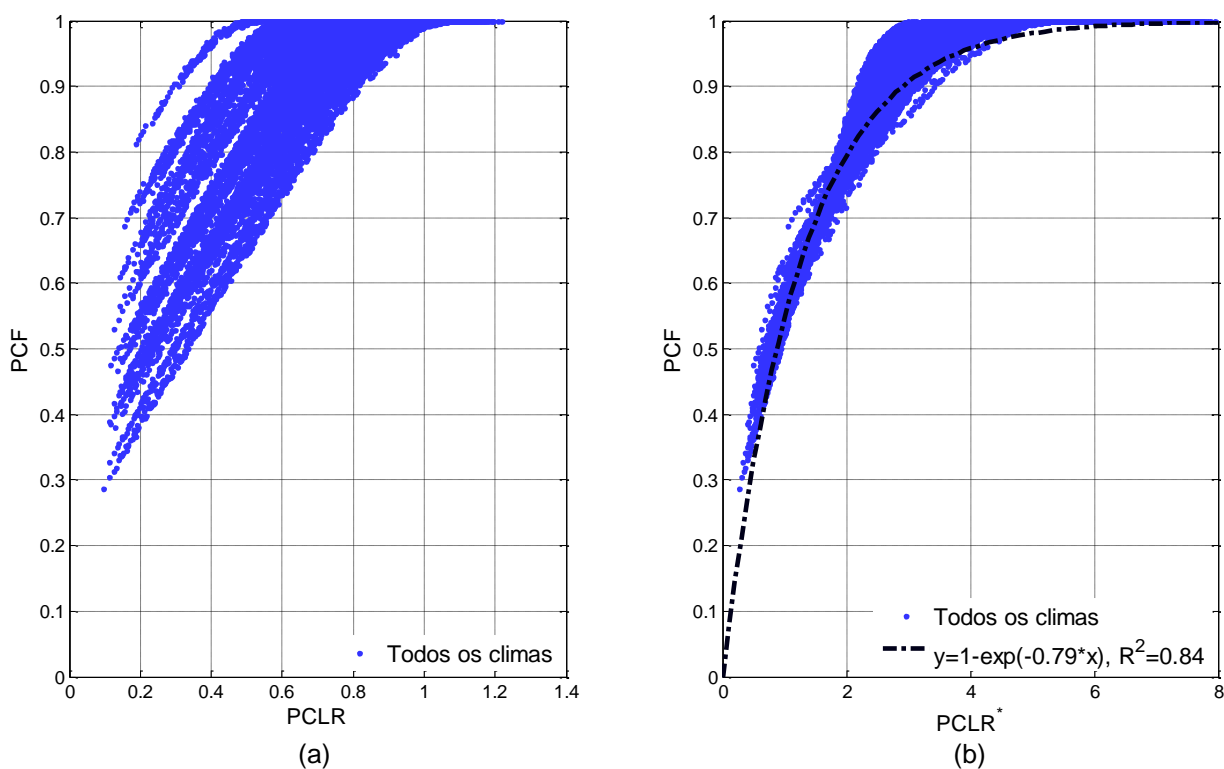


Fig. 6.5 – Resultados de  $PCF$  em função de  $PCLR$  (a),  $PCF$  em função de  $PCLR^*$ , e respetivo ajuste exponencial, (b) de todos os meses para todos os climas.

O cálculo do *PCF* permite estimar as necessidades de arrefecimento médias mensais ( $Q_{nd}$ ) do edifício quando se encontra instalado um sistema de arrefecimento passivo deste tipo. Em todos os pontos calculados o erro<sup>4</sup> médio obtido foi de 4.7 % sendo o erro máximo de 21.4 %.

O erro médio e o erro máximo têm tendência a aumentar com a temperatura exterior média, como se mostra na Fig. 6.6. A partir da análise do gráfico é possível afirmar que para climas mais quentes o método PCLR (aplicado a este tipo de sistemas) apresenta erros mais elevados e é possível ter um conhecimento mais detalhado da sua distribuição e da sua dimensão. O método PCLR apresenta erros médios e máximos menores para meses com temperaturas exteriores médias mais baixas: os erros médio e máximo mais baixos são da ordem de 0.7 % e 7.4 %, respetivamente, para temperaturas exteriores médias de aproximadamente 15 °C e 18 °C; os erros médio e máximo mais elevados apresentam-se para temperatura médias exteriores de 21 °C, aproximadamente, e são da ordem de 8.5 % e 21.4 %, respetivamente.

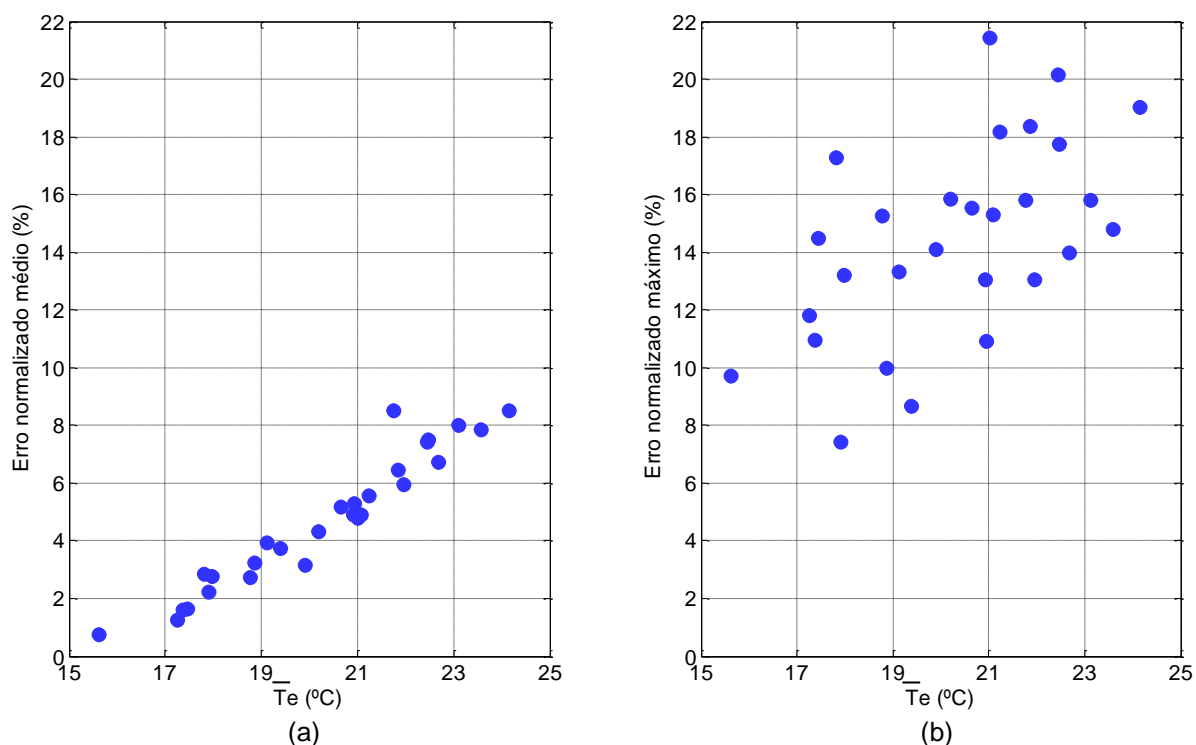


Fig. 6.6 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.

<sup>4</sup> Sempre que se mencionar “erro” pretende-se referir “erro normalizado”.

Analisando os resultados em termos absolutos, a Fig. 6.7 apresenta os desvios dos valores absolutos das necessidades de arrefecimento. É de esperar que os resultados das necessidades de arrefecimento obtidos pelo método PCLR se encontrem desviados, no máximo, de  $\pm 0.21$  GJ do valor obtido por simulação. Para resultados de  $Q_{nd\_PCLR}$  mais baixos a maioria dos desvios são positivos, o que significa que o método está a devolver valores superiores aos de simulação. A maioria dos desvios negativos, que significam que o método PCLR devolve valores inferiores aos de simulação, acontecem para valores de  $Q_{nd\_PCLR}$  a partir dos 0.2 GJ, aproximadamente.

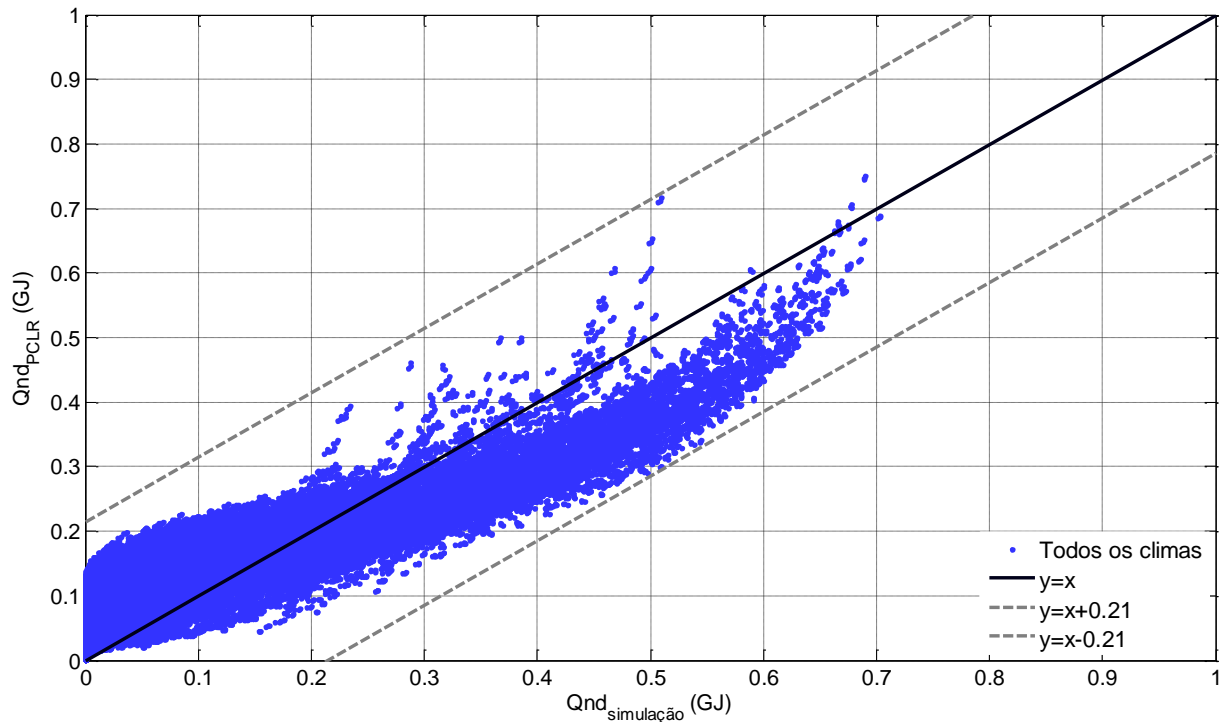


Fig. 6.7 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método PCLR e representação das retas dos desvios máximos absolutos.

- Sistemas com chaminés solares de espessuras entre 0.2 e 0.3 m

Os coeficientes do método PCLR para os sistemas com chaminés solares de espessuras entre 0.2 e 0.3 m foram obtidos da mesma forma que os coeficientes para os sistemas anteriores. Os parâmetros característicos utilizados são os apresentados nas equações (6.2), (6.3) e de (6.5) a (6.8). Neste tipo de sistemas as espessuras da chaminé solar utilizadas foram:

$$e_{sc} = \{0.20 \quad 0.25 \quad 0.30\} \quad (\text{m}) \quad (6.11)$$

O total de pontos obtidos é semelhante ao caso anterior. O ajuste da energia transferida por ventilação ( $Q_{vent}$ ) foi realizado de igual forma, sendo o resultado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0.71.

A Fig. 6.8 apresenta os pontos ( $PCLR$ ,  $PCF$ ) dos cinco meses da estação de arrefecimento para o clima de Lisboa. As curvas correspondentes aos restantes cinco climas podem ser consultadas em Anexo (Fig. 9.6, Fig. 9.7, Fig. 9.8, Fig. 9.9 e Fig. 9.10). Os ajustes apresentados permitem determinar os fatores de correção  $B$  de forma semelhante ao caso anterior (equação (6.10)). Novamente se verifica que as curvas de maior valor de PCF correspondem a meses de menor temperatura exterior média. Os resultados dos fatores de correção  $B$  são mostrados na Fig. 6.9.

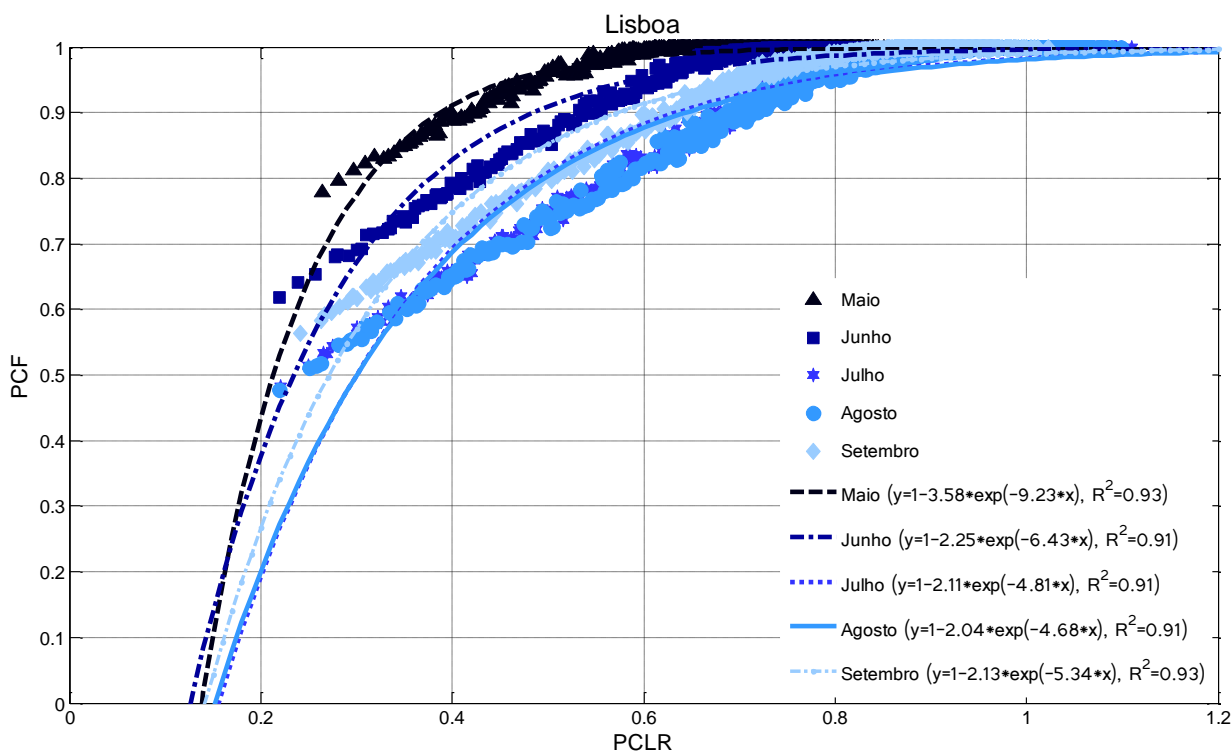


Fig. 6.8 – Curvas mensais de  $PCF$  em função de  $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Lisboa.

Com o aumento da espessura da chaminé solar é possível verificar que os pontos de menor valor de  $PCLR$  estão na ordem dos 0.2, sendo superiores aos do caso anterior, que se encontram em 0.1, aproximadamente. Esta diferença resulta do aumento da capacidade de transferir energia por ventilação obtido pela maior espessura da chaminé solar, ou seja, de valores de  $Q_{vent}$  superiores.

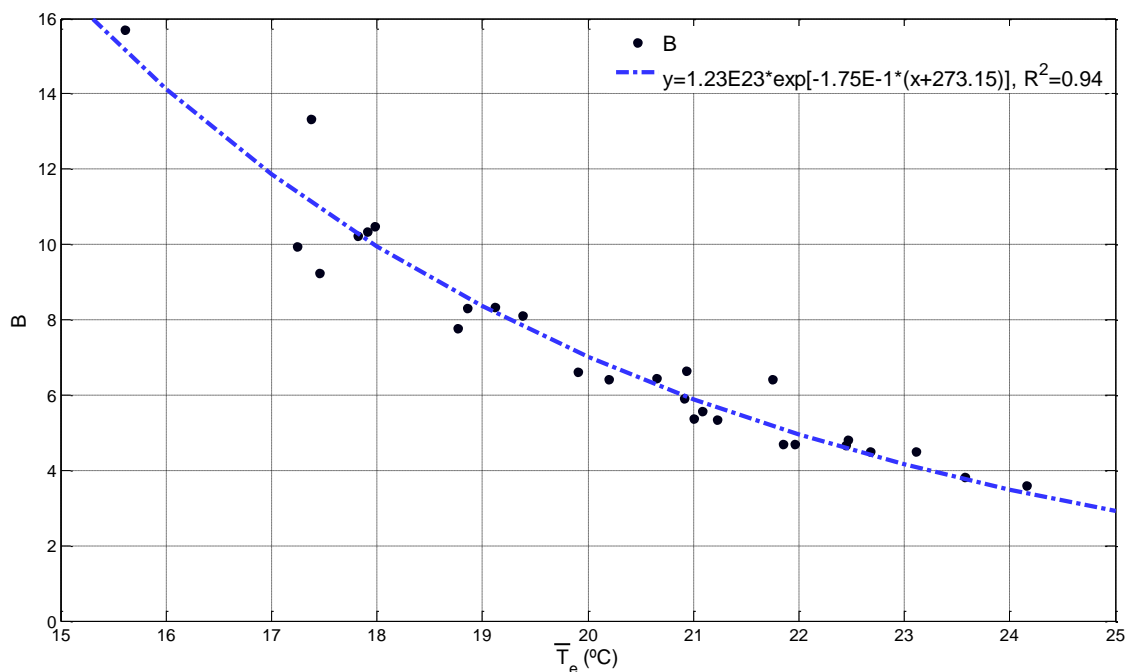


Fig. 6.9 – Conjunto de todos os pontos  $B$  em função da temperatura média mensal e respetivo ajuste exponencial.

A Fig. 6.10 apresenta todos os os pontos  $PCF$  em função de  $PCLR$  e os resultados depois de aplicado o fator de correção  $B$ . De igual forma ao do caso anterior, a partir do ajuste  $PCF$  em função de  $PCLR^*$  obtém-se o coeficiente  $c$  presente na Tabela 5.2.

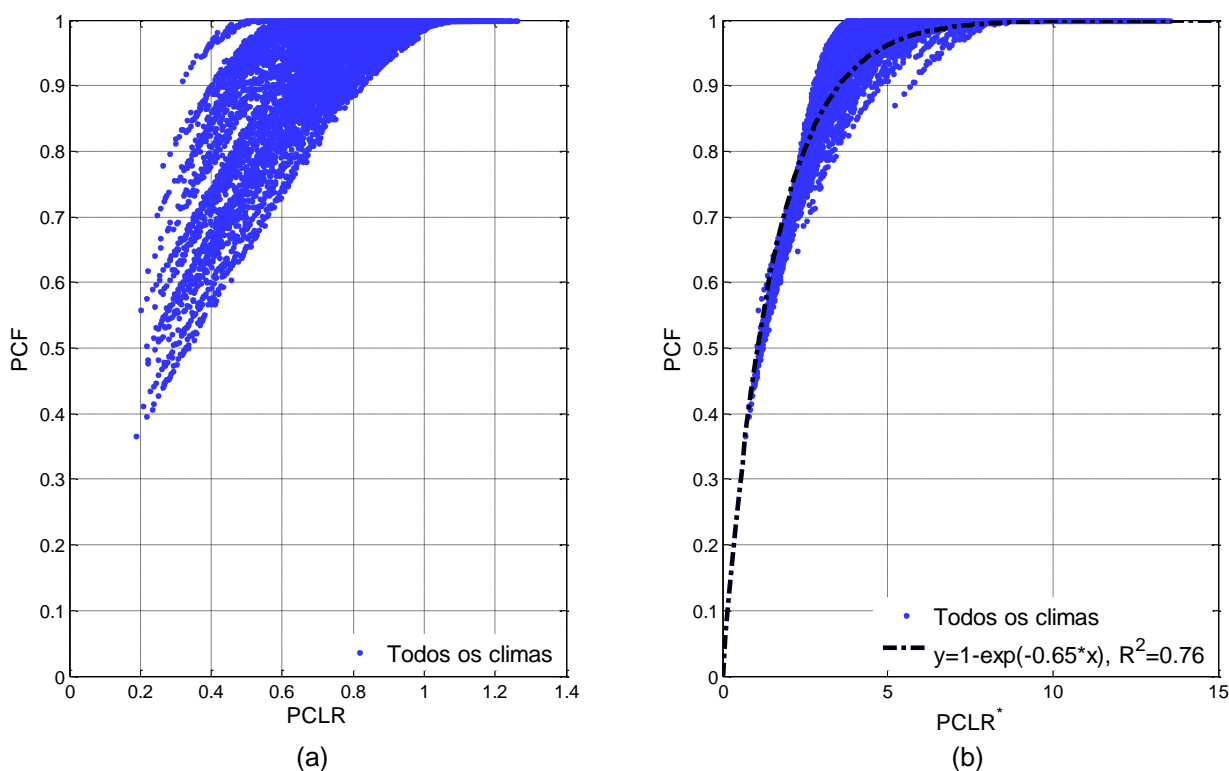


Fig. 6.10 – Resultados de  $PCF$  em função de  $PCLR$  (a),  $PCF$  em função de  $PCLR^*$ , e respetivo ajuste exponencial, (b) de todos os meses para todos os climas.

Globalmente, o erro médio obtido para este tipo de sistemas foi de 3.1 % sendo o máximo de 16.6 %.

Os erros médio e máximo demonstram igual tendência para aumentar com a temperatura exterior média, como se mostra na Fig. 6.11. Os erros mais baixos encontram-se para temperaturas exteriores médias de, aproximadamente, 15 °C e são da ordem de 0.2 % e 4.1 % o erro médio e o máximo, respetivamente. Os erros mais elevados são na ordem dos 7.7 % e dos 16.6 %, o erro médio e o erro máximo, respetivamente, e encontram-se para temperatura médias exteriores a rondar os 23 °C. Comparativamente ao caso anterior os erros apresentam valores semelhantes.

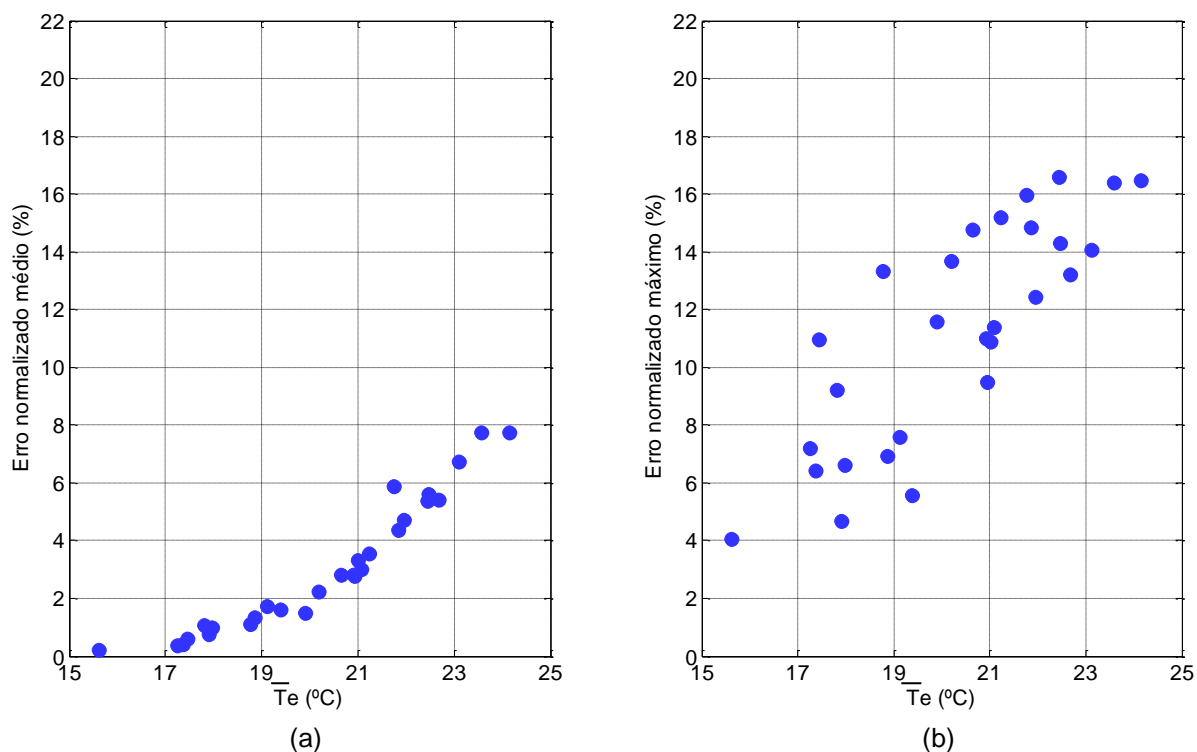


Fig. 6.11 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.

A Fig. 6.12 mostra os desvios absolutos dos resultados das necessidades de arrefecimento. Neste caso é de esperar desvios, no máximo, de  $\pm 0.17$  GJ do valor obtido por simulação. Os desvios têm uma disposição semelhante ao caso anterior, a maioria dos desvios positivos encontram-se na gama de valores de  $Q_{nd\_PCLR}$  mais baixos e os negativos para valores de  $Q_{nd\_PCLR}$  mais elevados. A maioria dos pontos obtidos com este sistema apresenta menor valor de necessidades de arrefecimento, por comparação com o caso anterior que as necessidades máxima atingem os 0.7 GJ, neste caso ficam-se pouco acima dos 0.6 GJ.

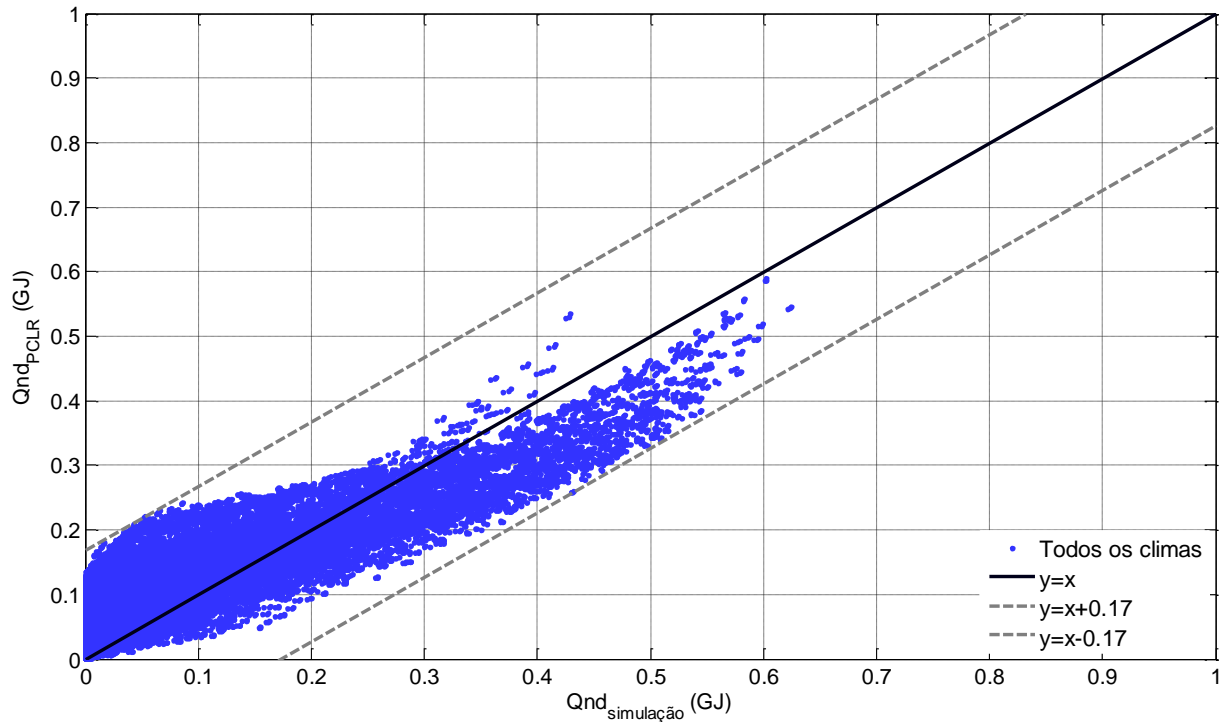


Fig. 6.12 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método PCLR e representação das retas dos desvios máximos absolutos.

- Sistemas com chaminés solares de espessuras entre 0.3 e 0.4 m

Os coeficientes do método PCLR para os sistemas com chaminés solares de espessuras entre 0.3 e 0.4 m foram obtidos da mesma forma que os coeficientes para sistemas apresentados anteriormente. Os parâmetros característicos utilizados neste caso são os apresentados nas equações (6.2), (6.3) e de (6.5) a (6.8), sendo que para a espessura da chaminé solar foram usados os seguintes valores:

$$e_{sc} = \{0.30 \quad 0.35 \quad 0.40\} \quad (\text{m}) \quad (6.12)$$

O total de pontos obtidos é semelhante aos casos anteriores. O ajuste da energia transferida por ventilação foi realizado de igual forma, sendo o resultado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0.62.

A Fig. 6.13 apresenta os pontos ( $PCLR$ ,  $PCF$ ) dos cinco meses da estação de arrefecimento para o clima de Lisboa. As curvas correspondentes aos restantes cinco climas podem ser consultadas em Anexo (Fig. 9.11, Fig. 9.12, Fig. 9.13, Fig. 9.14 e Fig. 9.15). Os ajustes apresentados permitem determinar os fatores de correção  $B$  de forma semelhante aos casos anteriores (equação (6.10)). Como nos casos anteriores, os meses com menor temperatura exterior média apresentam curvas acima das restantes. Os resultados dos fatores de correção  $B$  são mostrados na Fig. 6.14.

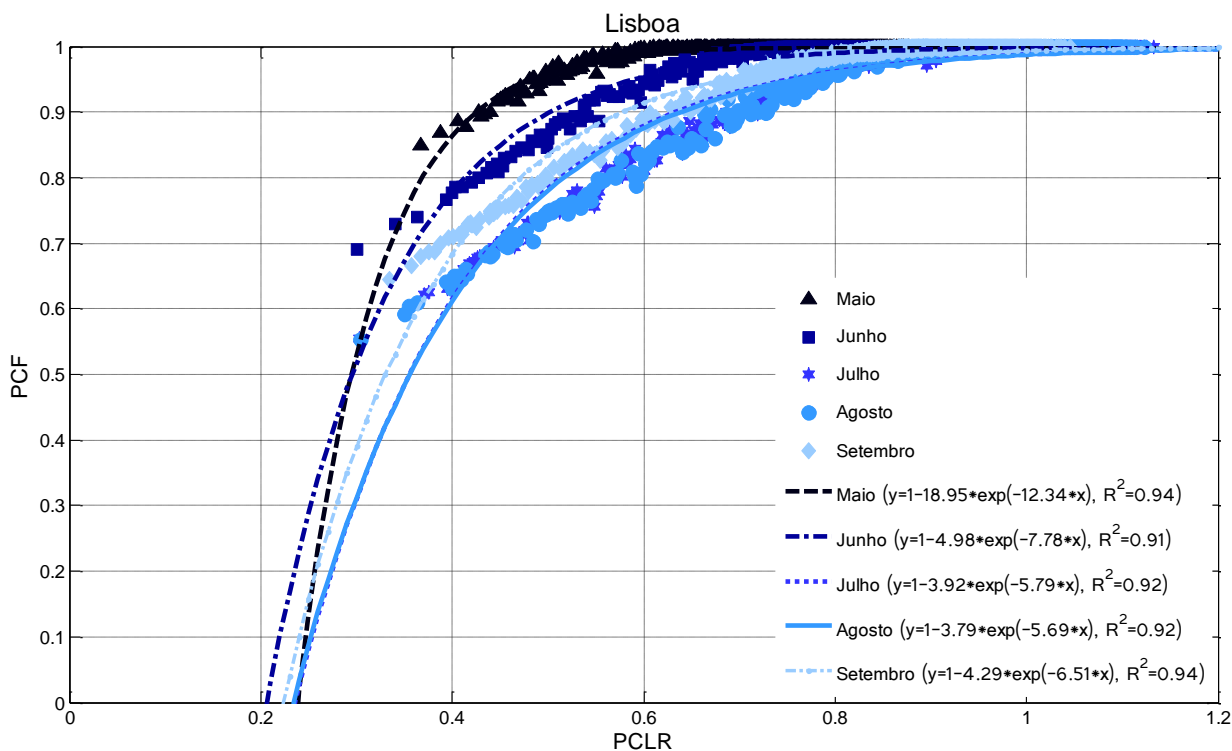


Fig. 6.13 – Curvas mensais de  $PCF$  em função de  $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Lisboa.

Com o novo aumento da espessura da chaminé solar é possível verificar que os pontos mais baixos em relação aos valores de  $PCLR$  são superiores aos dos casos anteriores, sendo 0.3 neste caso e no anterior de 0.2, aproximadamente, tal resulta do aumento da capacidade de transferir energia por ventilação obtido pela maior espessura da chaminé solar, como sucedeu no caso anterior.

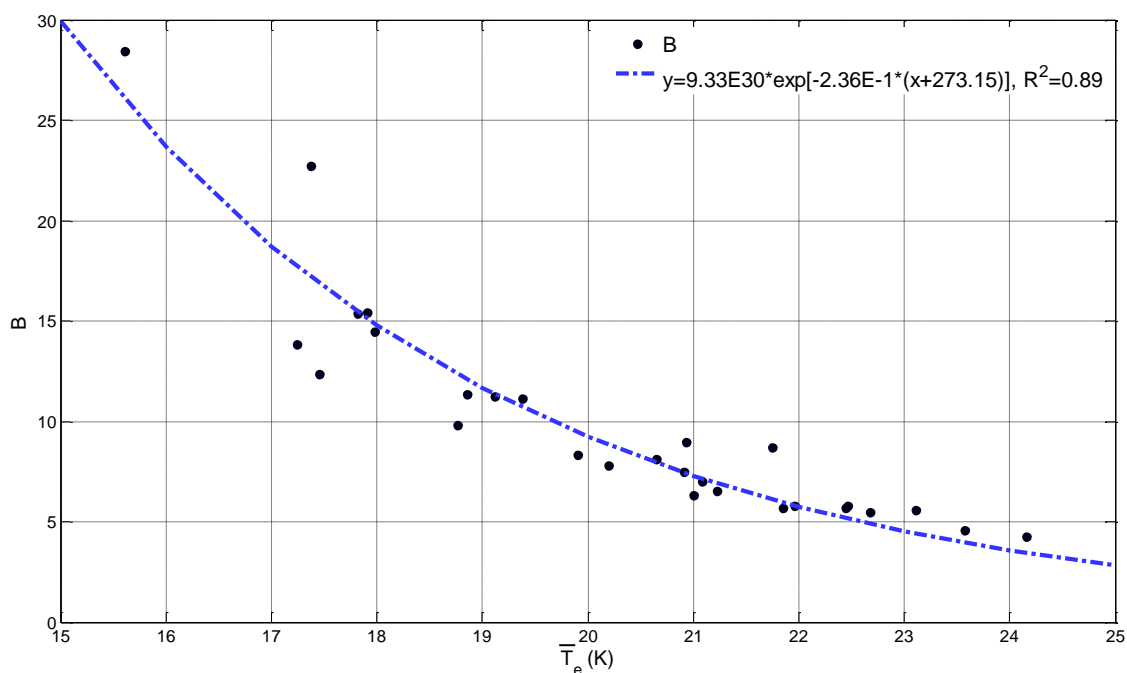


Fig. 6.14 – Conjunto de todos os pontos *B* em função da temperatura média mensal e respetivo ajuste exponencial.

A Fig. 6.15 apresenta todos os pontos *PCF* em função de *PCLR* e os resultados depois de aplicado o fator de correção *B*. De igual forma aos casos anteriores, a partir do ajuste *PCF* em função de *PCLR\** obtém-se o coeficiente *c* presente na Tabela 5.2.

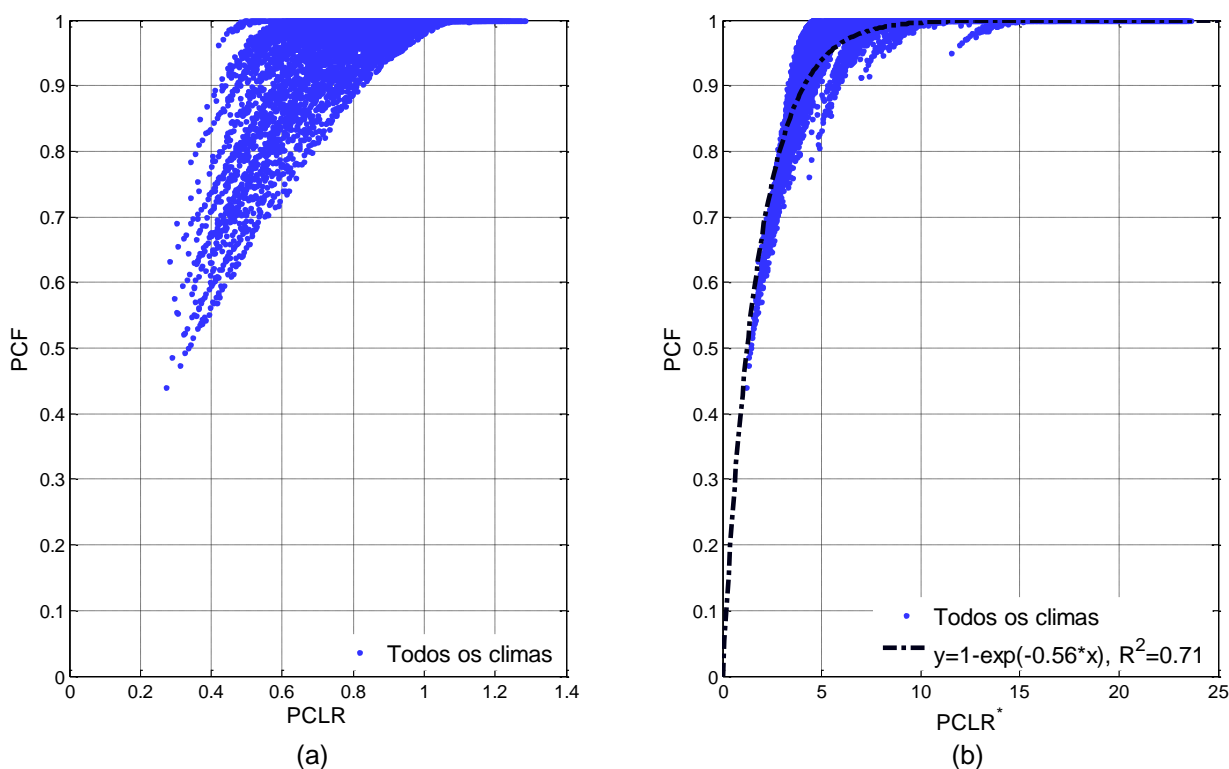


Fig. 6.15 – Resultados de *PCF* em função de *PCLR* (a), *PCF* em função de *PCLR\**, e respetivo ajuste exponencial, (b) de todos os meses para todos os climas.

No total dos pontos calculados, o erro médio obtido para este tipo de sistemas foi de 2.1 % sendo o erro máximo de 16.7 %.

À semelhança dos casos anteriores, os erros médio e máximo demonstram tendência para aumentar com a temperatura exterior média, como se mostra na Fig. 6.16. O erro médio mais baixo é da ordem de 0.1 % e o erro máximo mais baixo é 2.3 %, aproximadamente, para temperaturas exteriores médias à volta de 15 °C e 17 °C, sendo os erros mais elevados na ordem dos 6.8 % e dos 16.7 %, respetivamente o erro médio e máximo, para temperatura médias exteriores de 24 °C e 21 °C, aproximadamente.

Comparativamente ao caso anterior os resultados são semelhantes, não se detetando diferenças significativas nos valores máximos e mínimos dos erros.

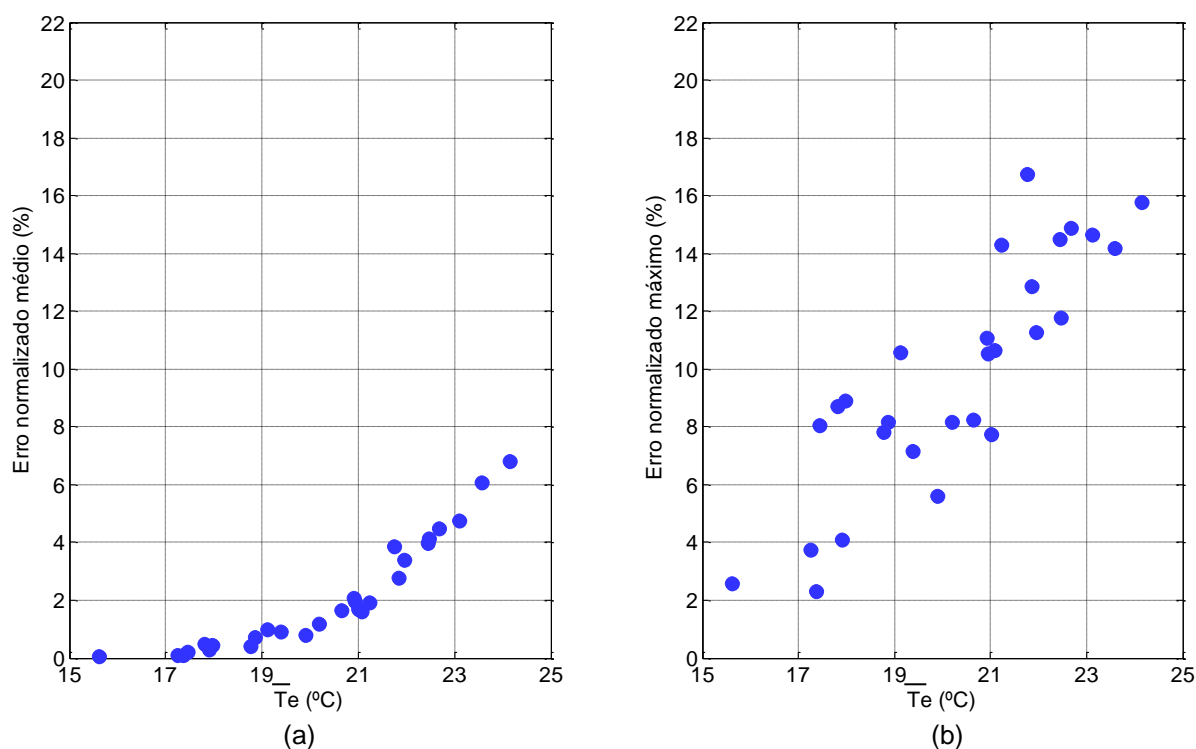


Fig. 6.16 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.

A Fig. 6.17 mostra os desvios absolutos dos resultados das necessidades de arrefecimento. Este tipo de sistemas apresenta desvios máximos de +0.17 GJ e -0.15 GJ. Os desvios têm uma disposição semelhante ao caso anterior, a maioria dos positivos encontram-se na gama de valores de  $Q_{nd\_PCLR}$  mais baixo e os negativos para valores de  $Q_{nd\_PCLR}$  mais elevados.

Por comparação aos sistemas anteriores verifica-se que as necessidades de arrefecimento diminuíram, de uma forma geral. Os pontos de maior  $Q_{nd\_simulação}$  são inferiores 0.55 GJ e os dos casos anteriores ultrapassam este valor. De uma forma geral, os resultados das necessidades de arrefecimento diminuíram, estando a maioria dos pontos mais próximos da origem que nos casos anteriores.

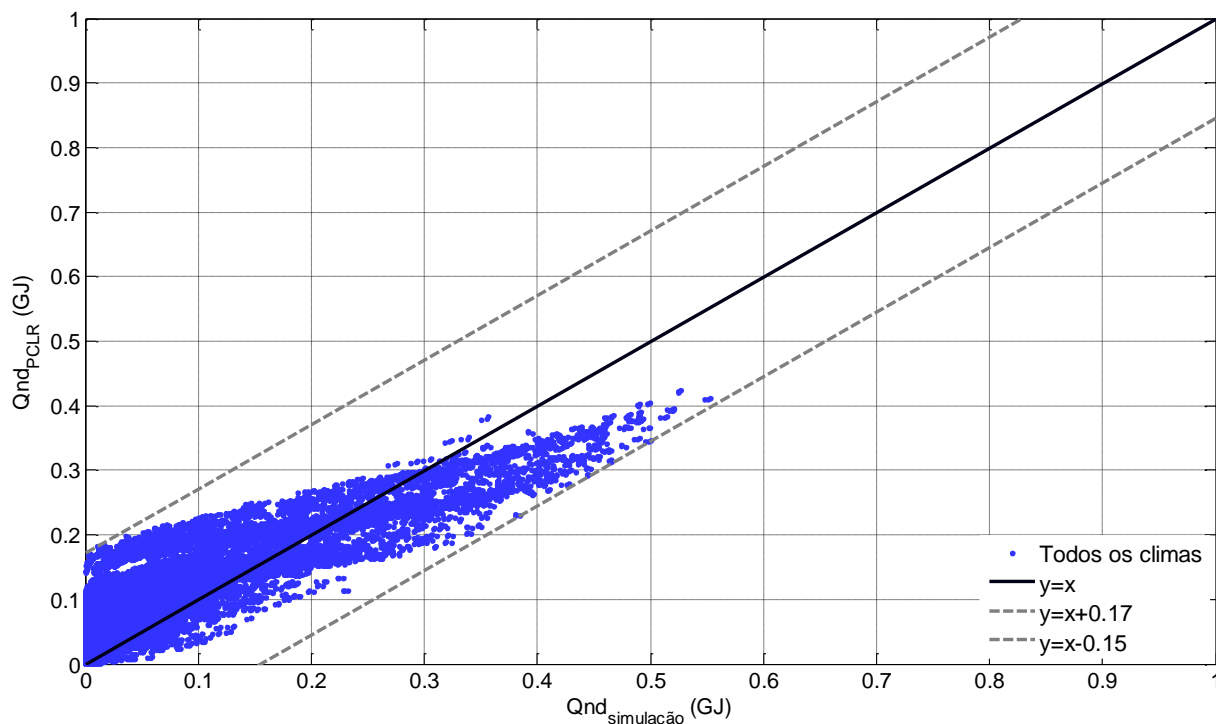


Fig. 6.17 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método PCLR e representação das retas dos desvios máximos absolutos.

### 6.3 Sistemas de tubos enterrados

Os coeficientes do método PCLR para o sistema de tubos enterrados foram obtidos de forma semelhante aos casos do sistema combinado. O parâmetro  $PCF$  é uma função de  $PCLR$  e o ajuste exponencial dessa relação permite determinar os fatores de correção  $B$ . Para obter os coeficientes em função das características do sistema foi necessário fazer os cálculos do método PCLR aplicado ao modelo de simulação horária para diferentes sistemas. Neste caso, o modelo de simulação não integra a chaminé solar, sendo o caudal de renovação do ar uma das variáveis do próprio sistema. Considerou-se que o sistema entra em funcionamento sempre que a temperatura interior do espaço seja superior a 20 °C.

Os cálculos são feitos para cada um dos seis climas, durante a estação de arrefecimento, e são determinados valores médios mensais de forma a calcular  $PCLR$  e  $PCF$ , tal como nos sistemas anteriores. Os sistemas diferentes resultam das combinações entre os seguintes parâmetros característicos:

$$d_t = \{0.15 \quad 0.20 \quad 0.30 \quad 0.40\} \quad (\text{m}) \quad (6.13)$$

$$z_t = \{1.50 \quad 2.00 \quad 2.75 \quad 4.00 \quad 5.00\} \quad (\text{m}) \quad (6.14)$$

$$x_t = \{10.0 \quad 12.5 \quad 15.0 \quad 17.5 \quad 20.0\} \quad (\text{m}) \quad (6.15)$$

$$\varphi_{vent} = \{100 \quad 150 \quad 200\} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}) \quad (6.16)$$

As combinações resultam em 301 pontos ( $PCLR$ ,  $PCF$ ) por cada mês da estação de arrefecimento para cada um dos seis climas, num total de 25 620 pontos. Determinou-se a energia transferida por ventilação ( $Q_{vent}$ ) para cada um dos sistemas (25 620) e fez-se o ajuste a seis variáveis. Este ajuste não pode ser representado graficamente, pelo que são apenas apresentados os seus coeficientes na Tabela 5.3, o coeficiente de correlação do ajuste ( $R^2$ ) é de 0.74.

A Fig. 6.18 apresenta os pontos ( $PCLR$ ,  $PCF$ ) dos cinco meses da estação de arrefecimento para o clima de Lisboa. As curvas correspondentes aos restantes cinco climas podem ser consultadas em Anexo (Fig. 9.16, Fig. 9.17, Fig. 9.18, Fig. 9.19 e Fig. 9.20).

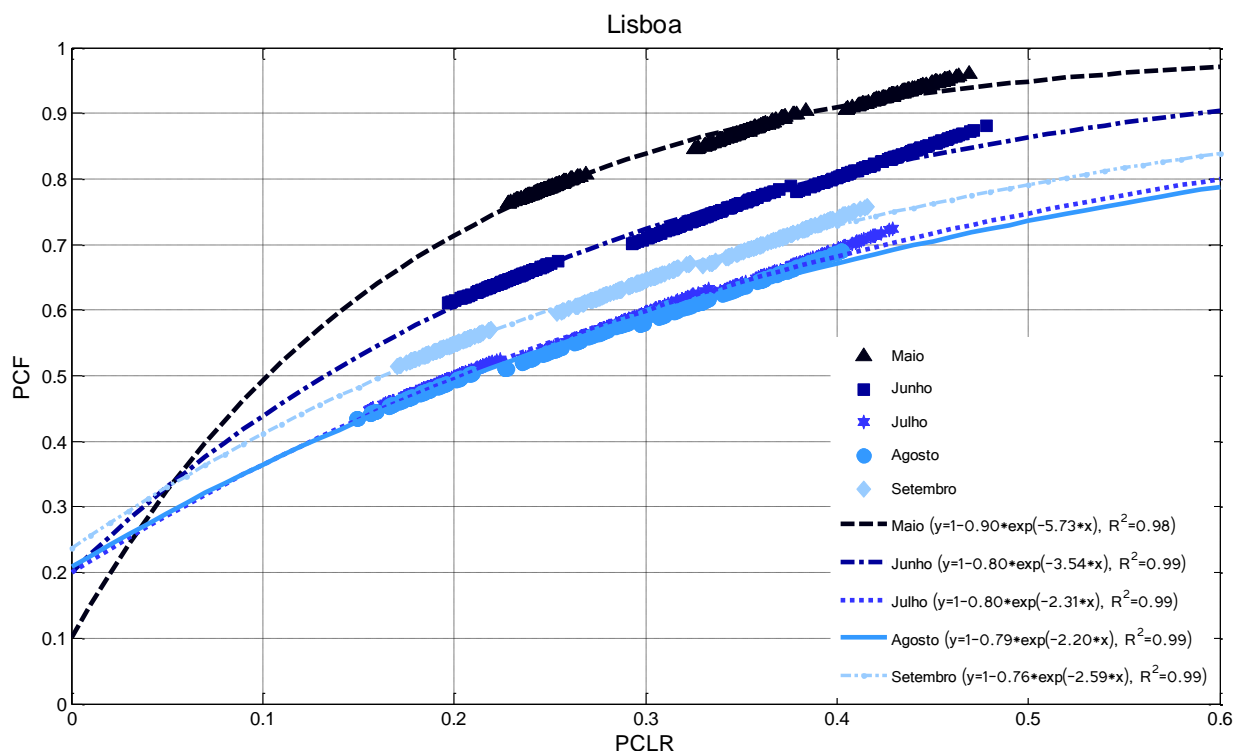


Fig. 6.18 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Lisboa.

Na Fig. 6.18 é possível verificar que o ajuste exponencial é mais próximo dos pontos comparativamente aos ajustes representados nos sistemas combinados. Estes ajustes permitem determinar os fatores de correção *B*, tal como nos casos anteriores.

É de salientar que para o clima de Lisboa os pontos de *PCF* não atingem o máximo de 1, mas para é possível verificar essa tendência no clima de Coimbra (ver Anexo - Fig. 9.18), por exemplo.

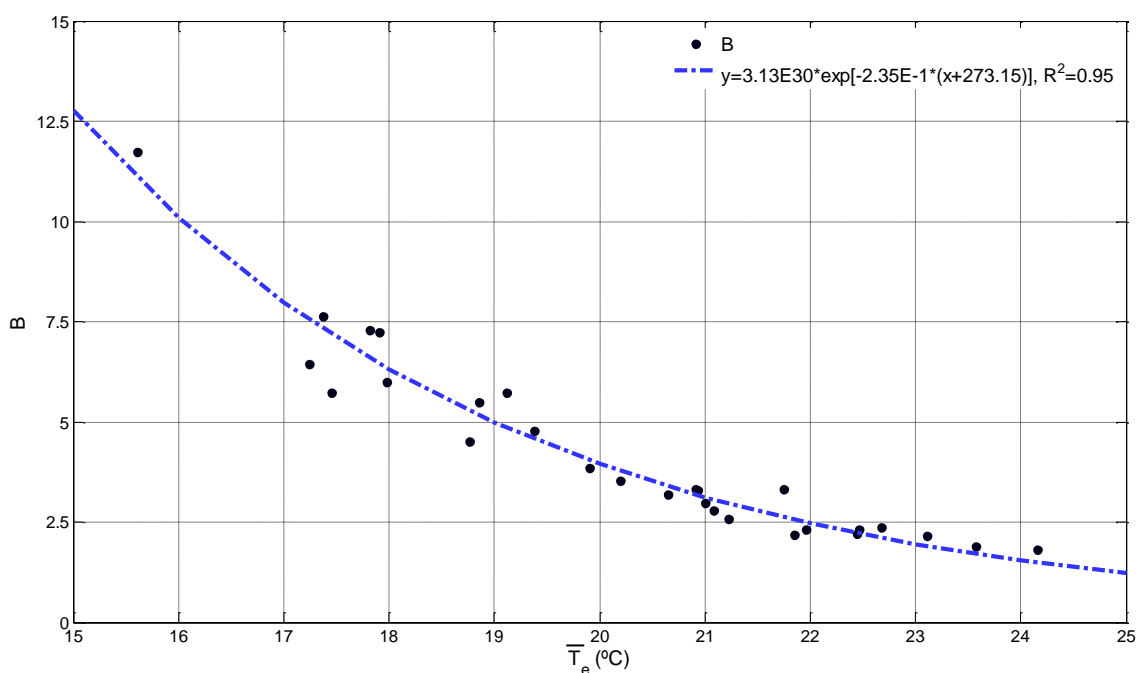


Fig. 6.19 – Curva do parâmetro de ajuste *B* em função da temperatura exterior média mensal.

Da mesma forma que para os sistemas anteriores, o fator de correção  $B$  é aplicado ao  $PCLR$  resultando o  $PCLR^*$ . A Fig. 6.20 mostra os valores de  $PCF$  em função de  $PCLR$  e  $PCLR^*$ , a partir do ajuste apresentado na figura (b) é possível determinar o coeficiente  $c$  na Tabela 5.3.

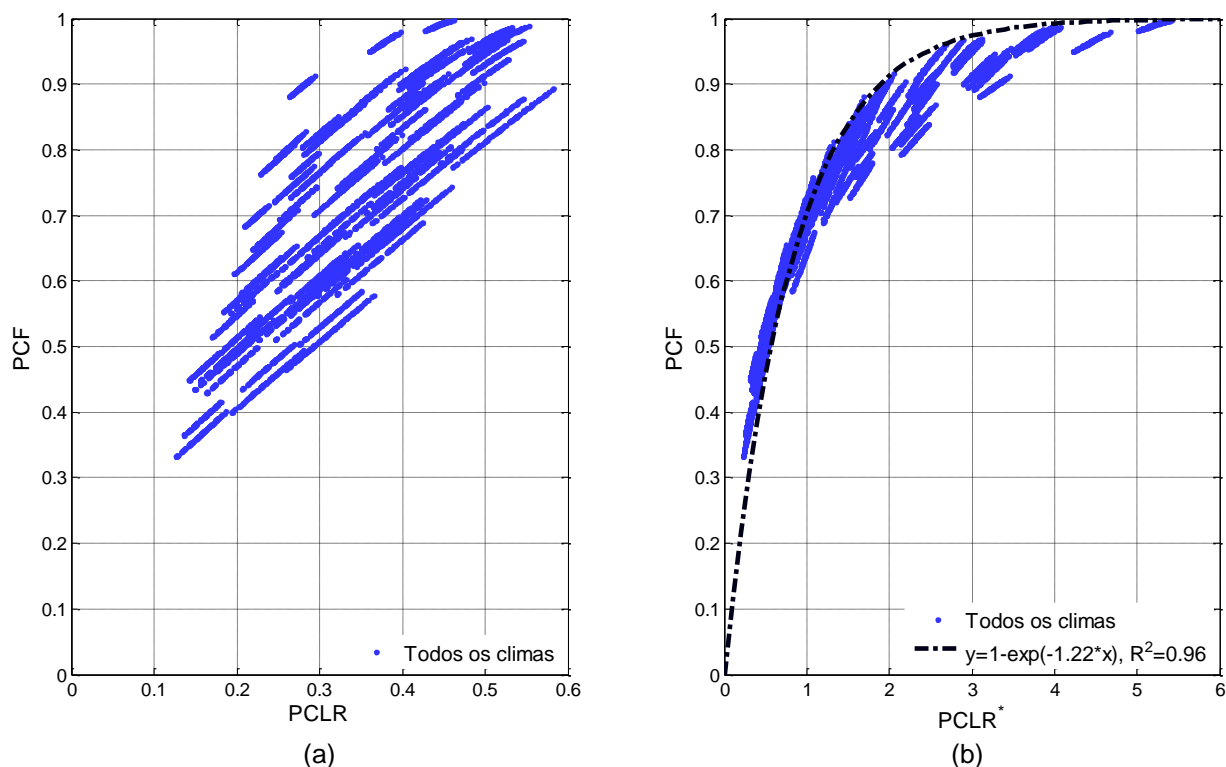


Fig. 6.20 –  $PCF$  em função de  $PCLR$  (à esquerda) e  $PCF$  em função do  $PCLR^*$  (à direita)

Foi calculado um erro normalizado, segundo a equação (6.1), para se fazer a análise dos resultados do método PCLR por comparação aos resultados obtidos com o método de simulação horária. No conjunto de todos os pontos calculados o erro médio obtido foi de 3.7 % sendo o máximo de 13.2 %.

Neste sistema de tubos enterrados não se distingue uma tendência de evolução do erro médio ou máximo em função da temperatura exterior média, tal como é possível verificar na Fig. 6.21.

Contudo, comparando os resultados gerais deste sistema com os apresentados anteriormente é possível afirmar que este método apresenta menor erro máximo. Quanto ao erro médio, este encontra-se na mesma ordem de valores dos combinados.

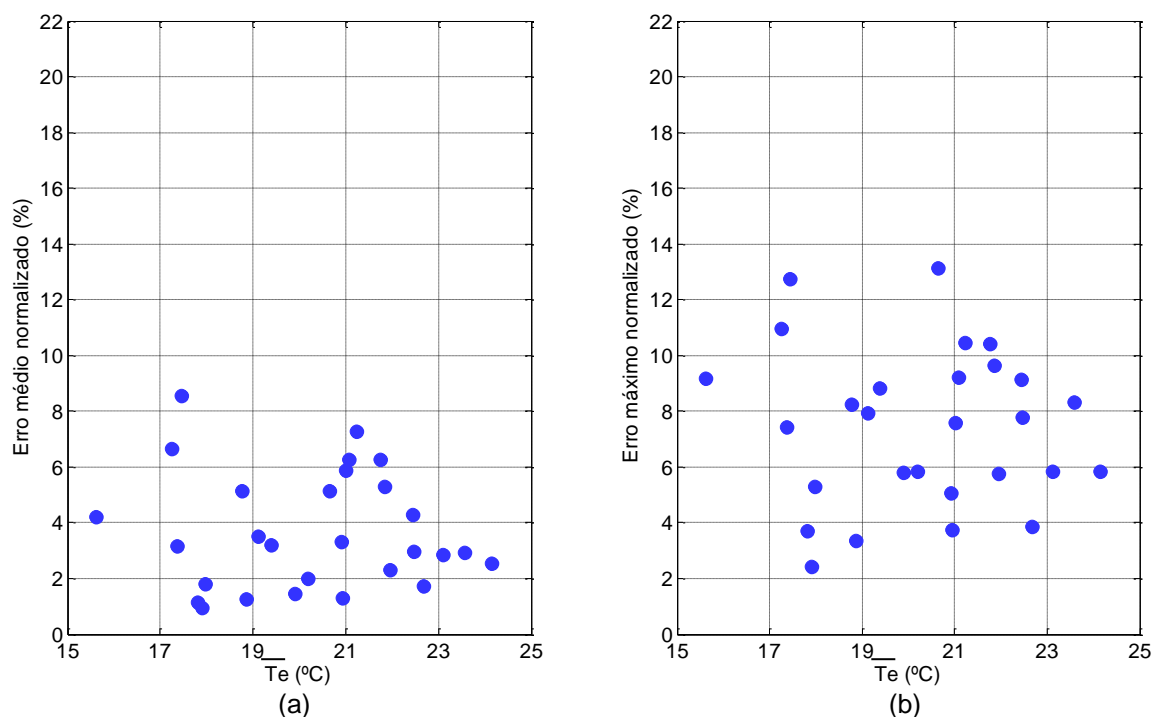


Fig. 6.21 – Erro normalizado médio (a) e erro normalizado máximo (b) em função da temperatura exterior média.

Em relação aos desvios absolutos das necessidades de arrefecimento, a Fig. 6.22 apresenta os resultados e os valores dos desvios máximos esperados. Para este sistema de tubos enterrados o desvio absoluto negativo máximo é de 0.12 GJ e o positivo é de 0.14 GJ. É possível verificar que a maioria dos pontos apresenta desvios negativos e que os desvios são menores comparativamente aos encontrados nos sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar. Este tipo de sistemas apresenta valores absolutos de necessidades de arrefecimento da mesma ordem que os sistemas combinados com chaminé solar de espessura entre 0.1 e 0.2 m.

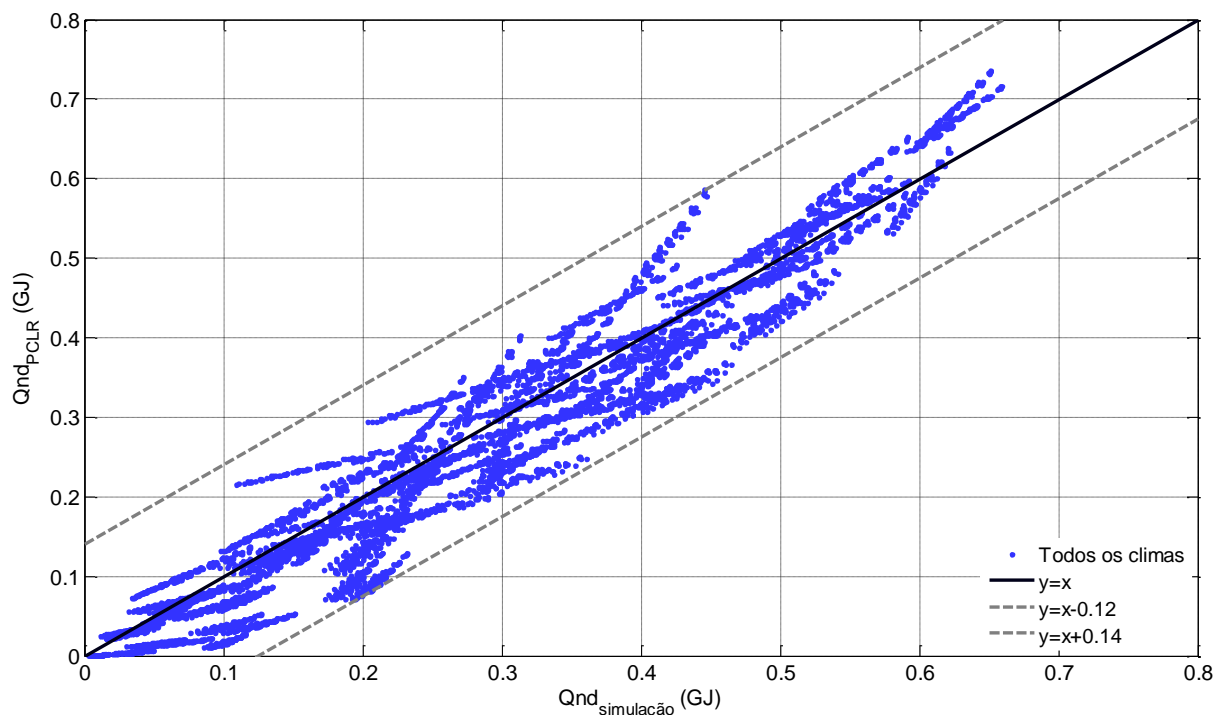


Fig. 6.22 – Comparação dos resultados das necessidades de arrefecimento obtidos por simulação e através do método PCLR e representação das retas dos desvios máximos absolutos.

## 7. Conclusão

O trabalho apresenta um método inovador, o método PCLR, que pretende estimar as necessidades de arrefecimento de uma forma rápida e simples quando não são necessários valores de elevada exatidão, uma vez que se trata de um método simplificado que calcula valores médios mensais. Tendo em consideração que o erro médio apresentado para os sistemas combinados de tubos enterrados e chaminé solar se encontra entre os 2 e os 5 %, sendo o erro máximo de 21 %, é possível afirmar que o método calcula o que é desejado com a aproximação que se exige a um método simplificado. Ainda que os desvios máximos sejam significativos, sabe-se que correspondem a climas com temperaturas médias exteriores superiores a 21 °C, sendo que para valores inferiores o método apresenta resultados com menores erros. Para o caso do sistema de tubos enterrados os resultados são mais favoráveis, o erro médio obtido é de 4 % e o máximo é de 13 %.

O método PCLR desenvolvido nesta tese está dependente das condições climáticas do local, das características do sistema e da energia de referência, correspondente às cargas internas e solares, e tal como o método SLR, não depende das características do edifício em si. Este método pode ser aplicado a outros sistemas passivos de arrefecimento desde que se estudem as correlações existentes entre os parâmetros *PCF* e *PCLR* e se determinem os respetivos coeficientes.

A instalação de um sistema passivo de arrefecimento pode suprimir o total de necessidades de arrefecimento, dependendo do tipo de sistema, das suas características e das condições climáticas. Num sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, as características da chaminé solar que determinam a capacidade de ventilação são:

- A área da chaminé solar exposta ao sol influencia o fluxo de ar que a atravessa, pois permite aquecer uma maior quantidade de ar e aumentar o efeito de flutuação.
- Outro parâmetro da chaminé que tem um impacto significativo no seu funcionamento é a área de entrada de ar na chaminé, uma maior área permite um maior caudal de ar.
- A velocidade do ar na chaminé solar depende, entre outros parâmetros, do seno da inclinação e indiretamente da radiação solar incidente, que por sua vez também depende da inclinação. Maiores ângulos favorecem o aumento da radiação, mas reduzem o efeito de flutuação, havendo assim um ponto de equilíbrio obtido na inclinação ótima.
- A superfície negra e o isolamento da chaminé são duas características a ter em conta, pois permitem o um maior aquecimento do ar no interior da chaminé solar. O mesmo se considera para o vidro, importante no efeito de estufa que promove o aquecimento do ar. A existência e as características típicas destes parâmetros não são contabilizados no método PCLR, por se considerarem como características intrínsecas do conceito de chaminé solar.

Quer no sistema combinado quer no sistema de tubos enterrados, as características que mais influenciam o desempenho do tubo enterrado são:

- As dimensões do próprio tubo e a velocidade do ar que o atravessa. Um tubo mais comprido permite compensar uma maior velocidade de passagem do ar, uma vez que uma maior velocidade do ar implica menos tempo para se dar a troca de calor com o solo. O diâmetro do tubo permite um maior caudal de ar e uma maior superfície de contacto para troca de calor, o que beneficia o arrefecimento do ar.
- As características térmicas do material que compõe o tubo devem ser tidas em conta, para que não dificultem as trocas de calor entre o ar e o solo. O material deve ter elevada condutividade térmica.
- Maiores condutividade e difusidade térmicas do solo implicam um maior arrefecimento do ar na passagem pelo tubo. Um solo seco tem menor capacidade de arrefecimento que um solo húmido, devido à menor condutividade térmica.

- A profundidade a que o tubo está enterrado influencia a temperatura do solo, quanto menor a temperatura do solo maior é a capacidade de arrefecimento. A maior profundidade é vantajosa até certo ponto, pois a partir de determinado valor a diferença de temperatura que se consegue deixa de compensar os custos de instalar a maior profundidade.
- O valor da temperatura exterior, que corresponde à temperatura de entrada do ar no tubo, na medida em que quanto maior for o seu valor maior será a temperatura do ar de ventilação, e consequentemente, menor é a capacidade de arrefecimento do sistema.

A combinação das características do sistema das quais dependem o caudal de renovação do ar e a capacidade de arrefecimento do ar de ventilação permite construir um sistema adequado às necessidades.

O método PCLR aqui apresentado demonstra a possibilidade de aplicar o conceito do método SLR a sistemas passivos de arrefecimento, recorrendo a parâmetros inovadores como o *PCLR* e *PCF*. Esta possibilidade foi explorada com recurso a métodos teóricos desenvolvidos na literatura, sendo o recurso a modelos de simulação dinâmica excluído do âmbito deste trabalho.

## 8. Referências

- Asimakopoulou, D., e M. Santamouris. *Passive cooling of buildings*. London: James and James Science Publishers, 1996.
- Balcomb, J. Douglas. “Development of simplified design aids based on the results on simulation analysis.” *Internacional Colloquium on Passive Solar House Testing*. Nice, France: Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, 1980.
- Bradshaw, Vaughn. *The building environment: active and passive control systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- Cavelius, Ralf , Charlotta Isaksson, Eugenijus Perednis, e Graham E. F. Read. “Passive Cooling Technologies.” Australia: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, 2003.
- EN ISO 13790. “Energy performance of buildings, calculation of energy use for space heating and cooling.” 2007.
- Gómez, Francisco , Luisa Gil, e José Jabaloyes. “Experimental investigation on the thermal comfort in the city: relationship with the green areas, interaction with the urban microclimate.” *Building and Environment*, 2004: 1077 – 1086.
- Gonçalves, Helder, e João Mariz Graça. *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. Lisboa: Tipografia Peres, 2004.
- Hollmuller, P. “Analytical characterization of amplitude-dampening and phase-shift in air/soil heat-exchangers.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003: 46: 4303-4317.
- Khanal, Rakesh, e Lei Chengwang . “Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation.” *Energy and Buildings*, 2010: 1811–1819.
- Kim, Gon, Hong Soo Lim, Tae Sub Lim, Laura Schaefer, e Jeong Tai Kim. “Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings.” *Energy and Buildings*, 2012: 105–111.
- Musall, Eike , Tobias Weiss, Karsten Voss, e Aurélie Lenoir. “Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects.” *EuroSun Conference* . Graz, Austria, 2010.
- Panão, Marta J. N. Oliveira, Susana M. L. Camelo, e Helder J. P. Gonçalves. “Solar Load Ratio and ISO 13790 methodologies: indirect gains from sunspaces.” *Energy and Buildings*, 2012: 212–222.
- Panão, Marta Oliveira. “Simulação térmica de edifícios num contexto urbano - Contribuição para a eficiência energética na cidade.” Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, 2008.

- Parliament, European. “Directive 2010/31/EU - Energy Performance of Buildings.” *Official Journal of the European Union*, 2010.
- Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, e Christine Pout. “A review on buildings energy consumption information.” *Energy and Buildings*, 2008: 394-398.
- Rodrigues, António Moret, António Canha da Piedade, e Ana Marta Braga. *Térmica de Edifícios*. Edições Orion, 2009.
- Roriz, Luís, João Rosendo, Fernando Lourenço, e Kathrin Calhau. *Energia Solar em Edifícios*. Edições Orion, 2010.
- Safarzadeh, H., e M.N. Bahadori. “Passive cooling effects of courtyards.” *Building and Environment*, 2005: 89–104.
- Sakonidou, E. P. , T. D. Karapantsios, e A.I. Baloukts. “Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow.” *Solar Energy*, 2008: 82: 80-94.
- Shashua-Bar, Limor , e Milo E. Hoffman. “Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees.” *Building and Environment*, 2004: 1087 – 1099.
- Tzempelikos, Athanassios, e Andreas K. Athienitis. “The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand.” *Solar Energy*, 2007: 369–382.
- VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf. *VDI Heat Atlas* . Springer, 1993.



## 9. Anexos

- Sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, com chaminés solares de espessuras entre 0.1 e 0.2 m

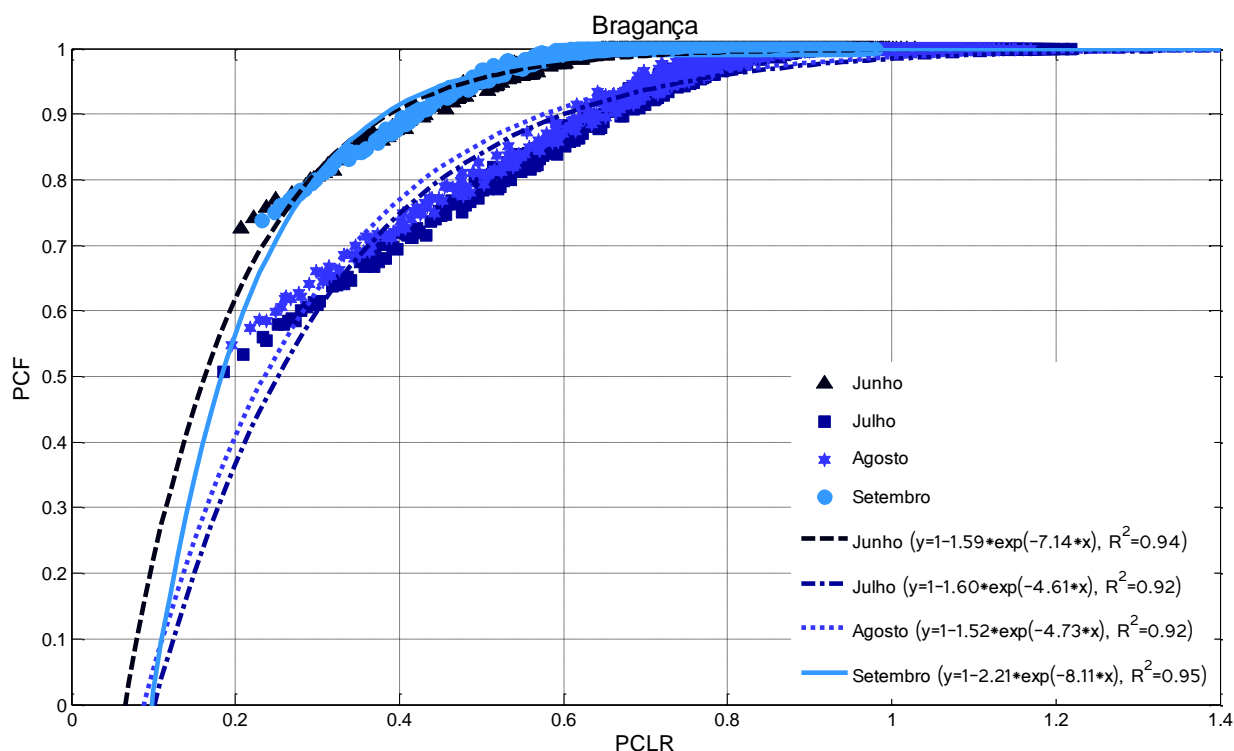


Fig. 9.1 – Curvas mensais de  $PCF$  em função de  $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.1 e 0.2 m)

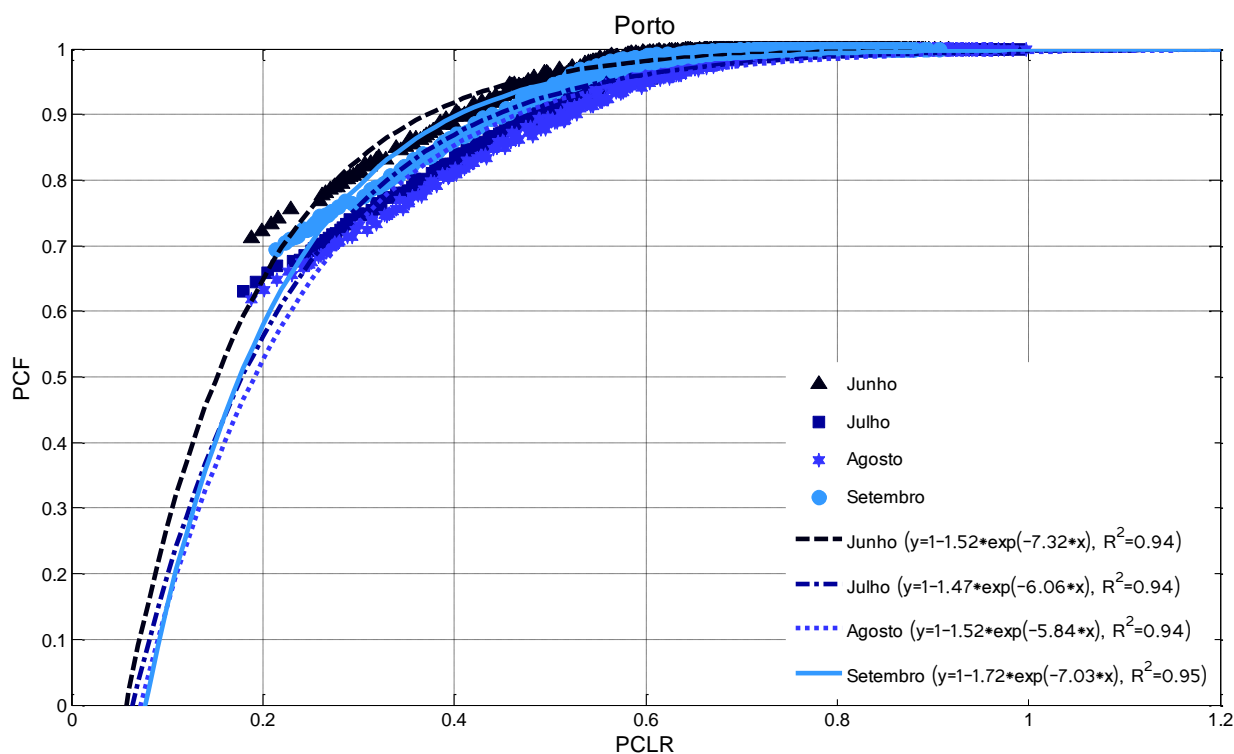


Fig. 9.2 – Curvas mensais de  $PCF$  em função de  $PCLR$ , e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.1 e 0.2 m)

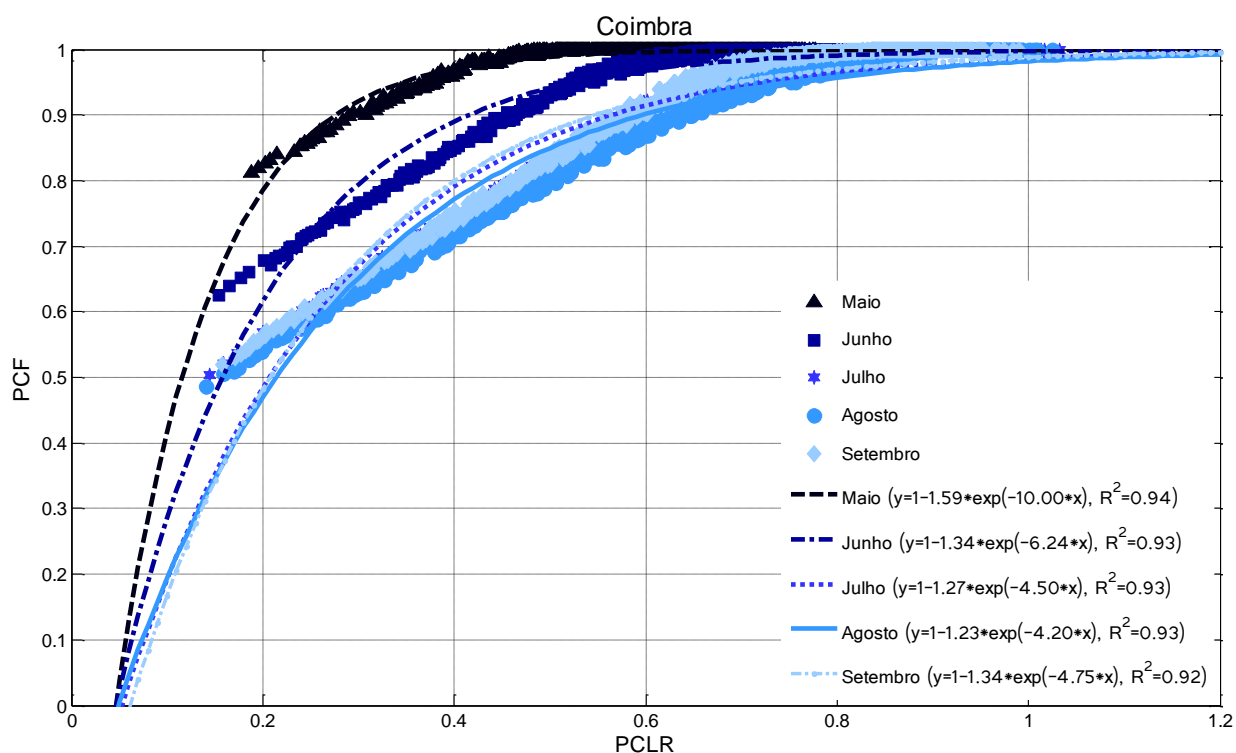


Fig. 9.3 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.1 e 0.2 m)

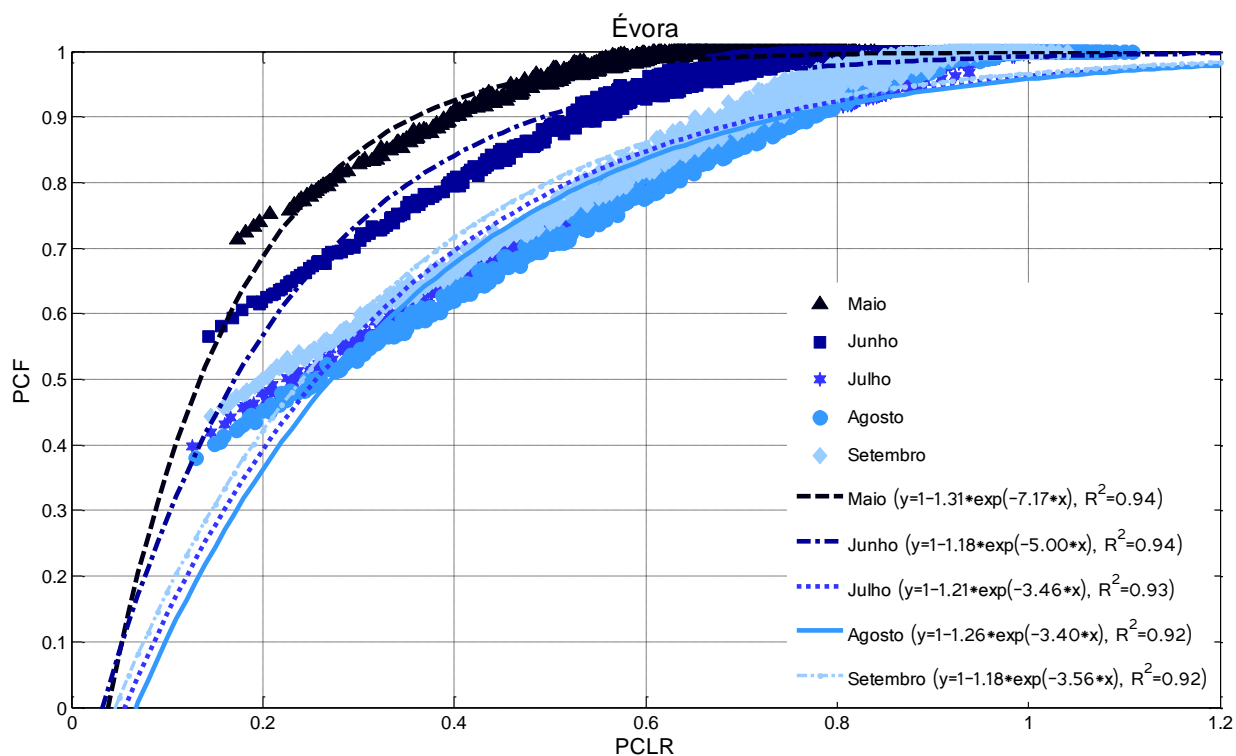


Fig. 9.4 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.1 e 0.2 m)

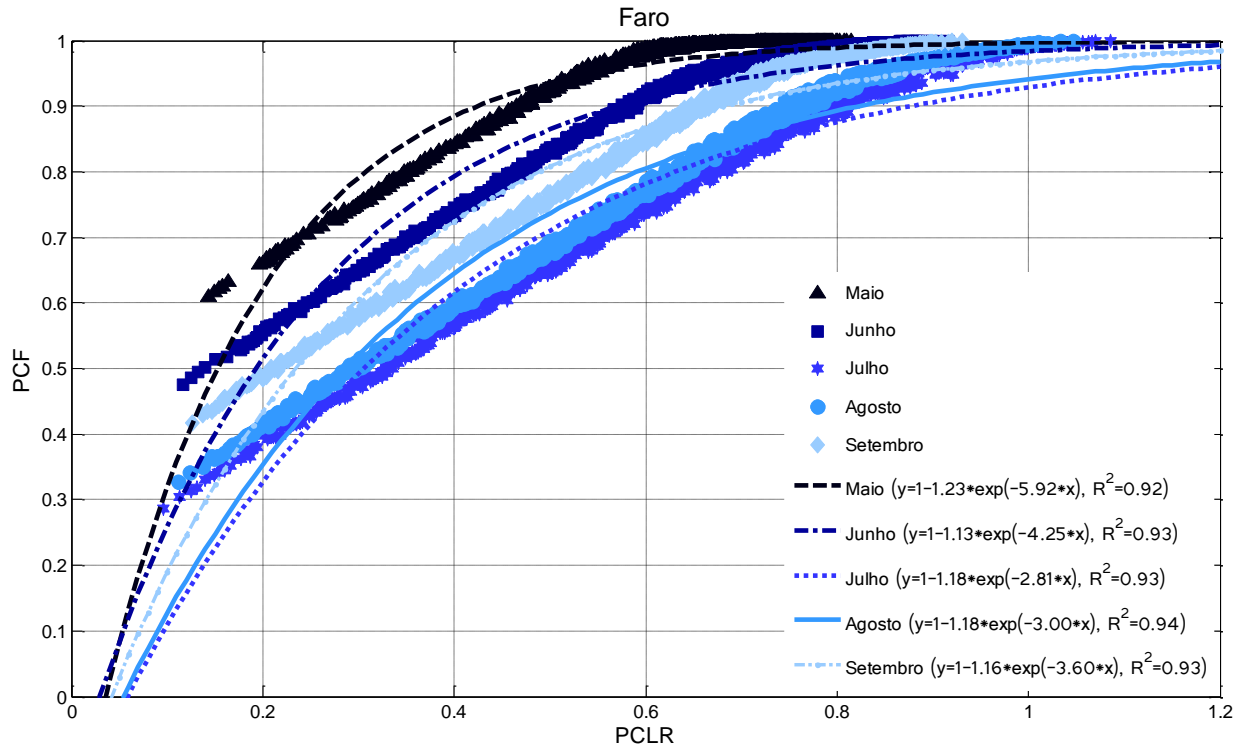


Fig. 9.5 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.1 e 0.2 m)

- Sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, com chaminés solares de espessuras entre 0.2 e 0.3 m

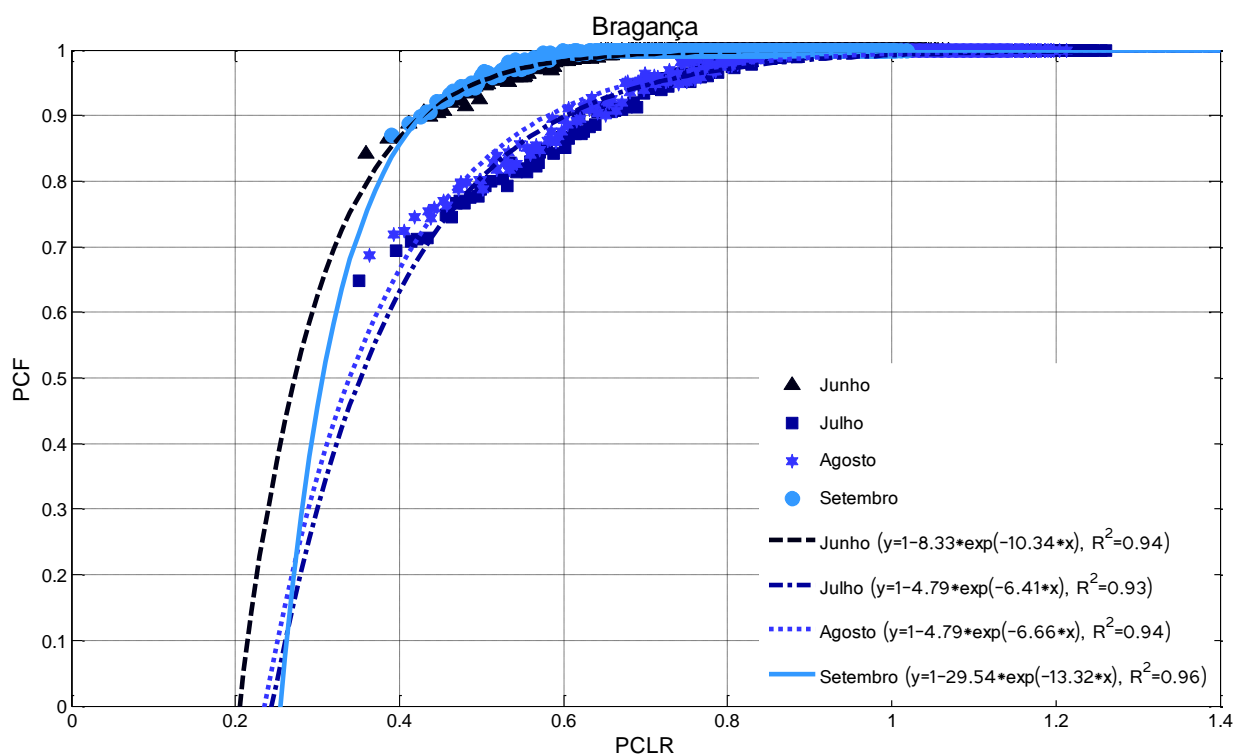


Fig. 9.6 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.2 e 0.3 m)

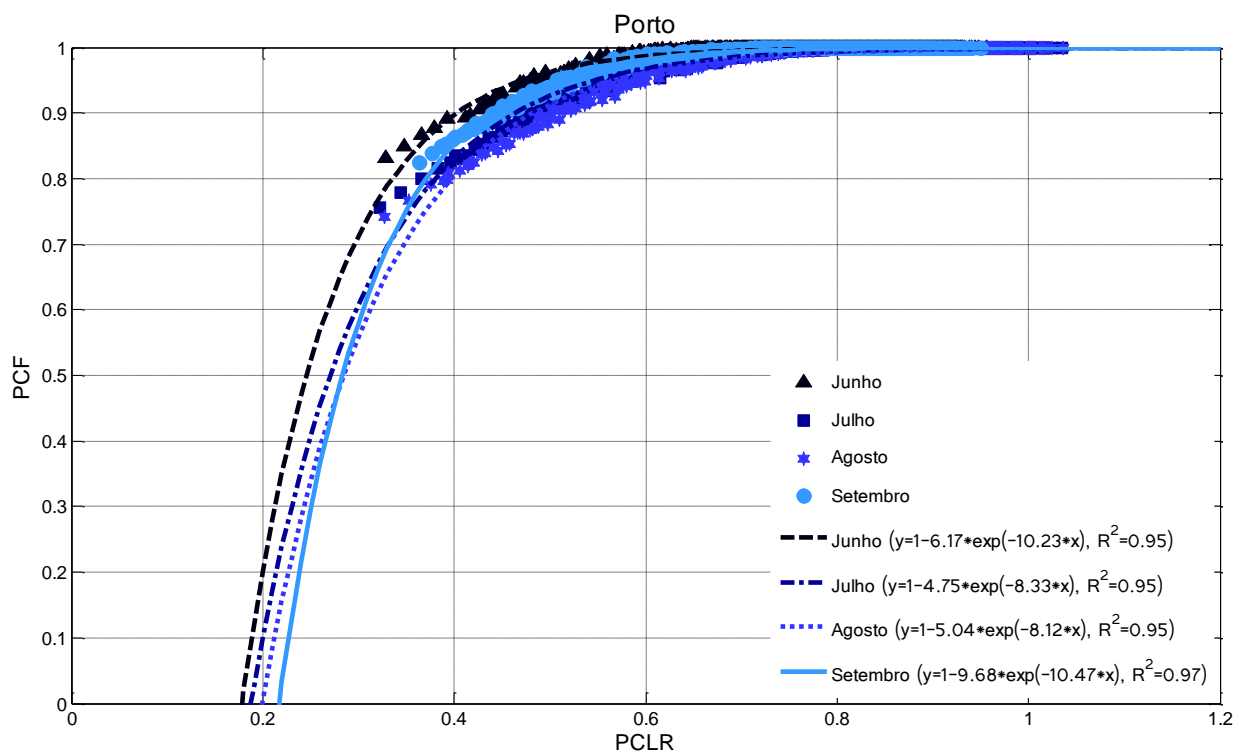


Fig. 9.7 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.2 e 0.3 m)

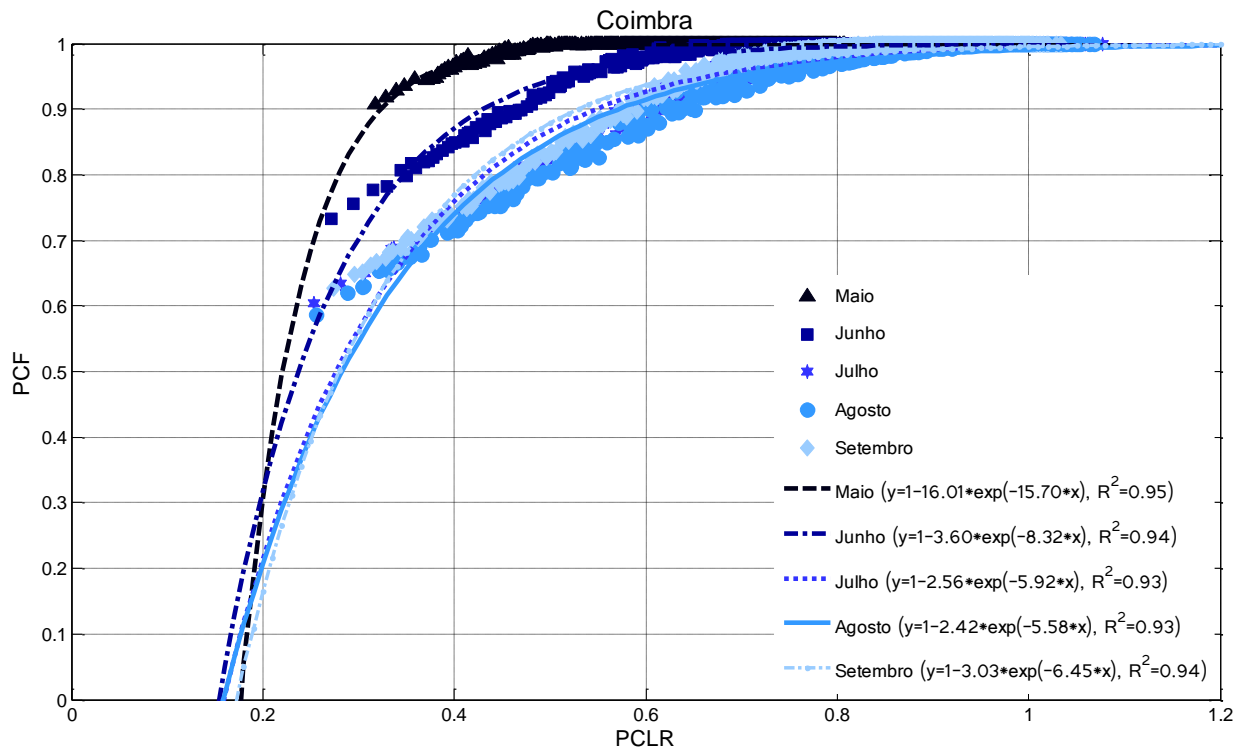


Fig. 9.8 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.2 e 0.3 m)

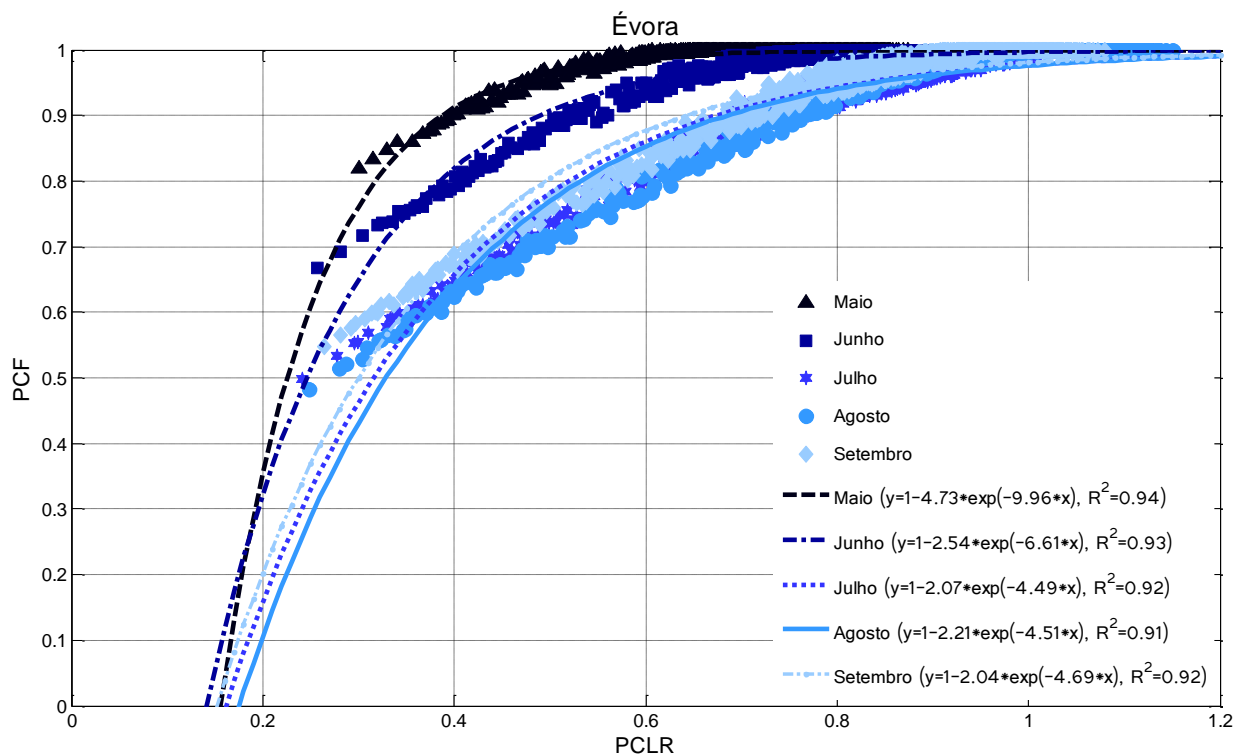


Fig. 9.9 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.2 e 0.3 m)

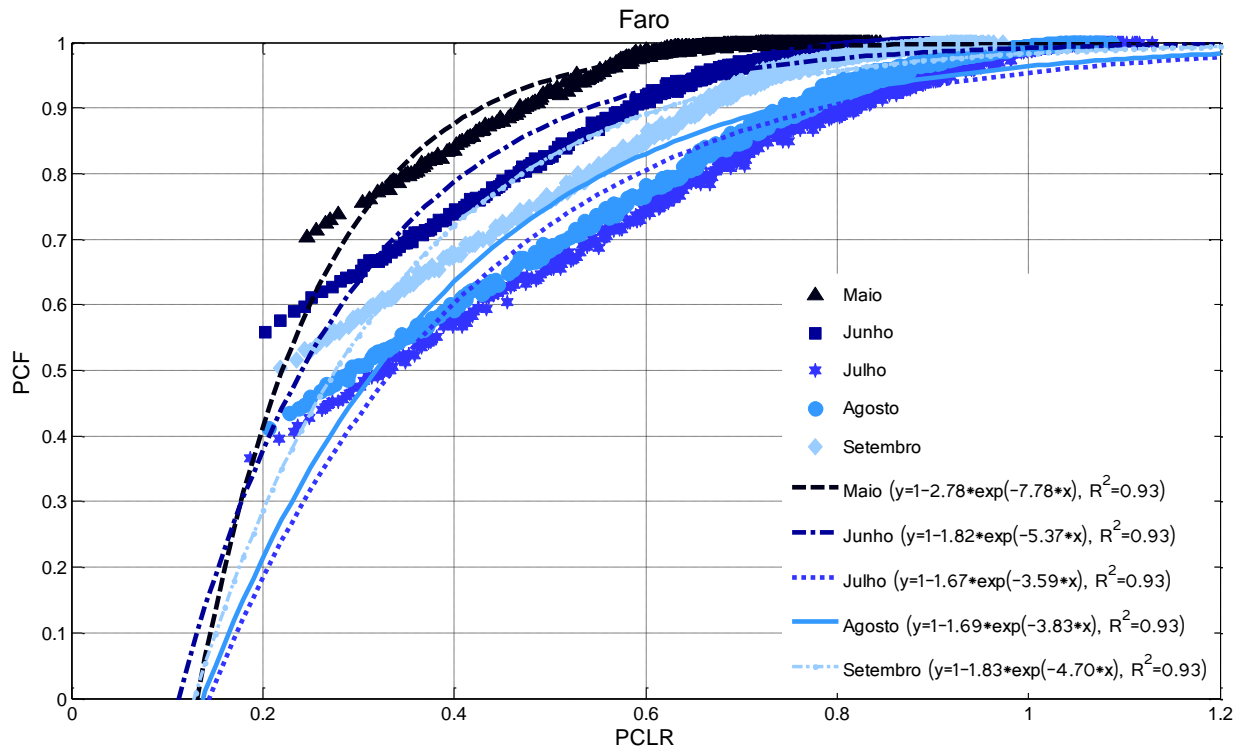


Fig. 9.10 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.2 e 0.3 m)

- Sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar, com chaminés solares de espessuras entre 0.3 e 0.4 m

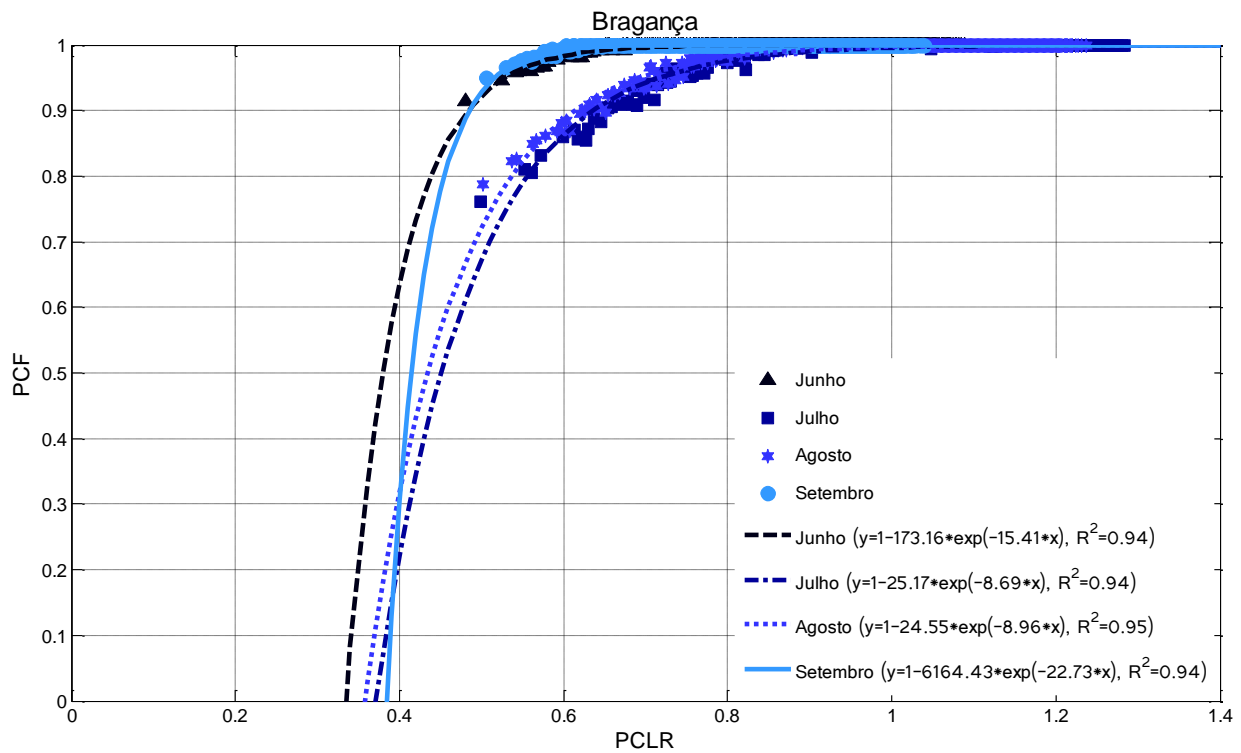


Fig. 9.11 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.3 e 0.4 m)

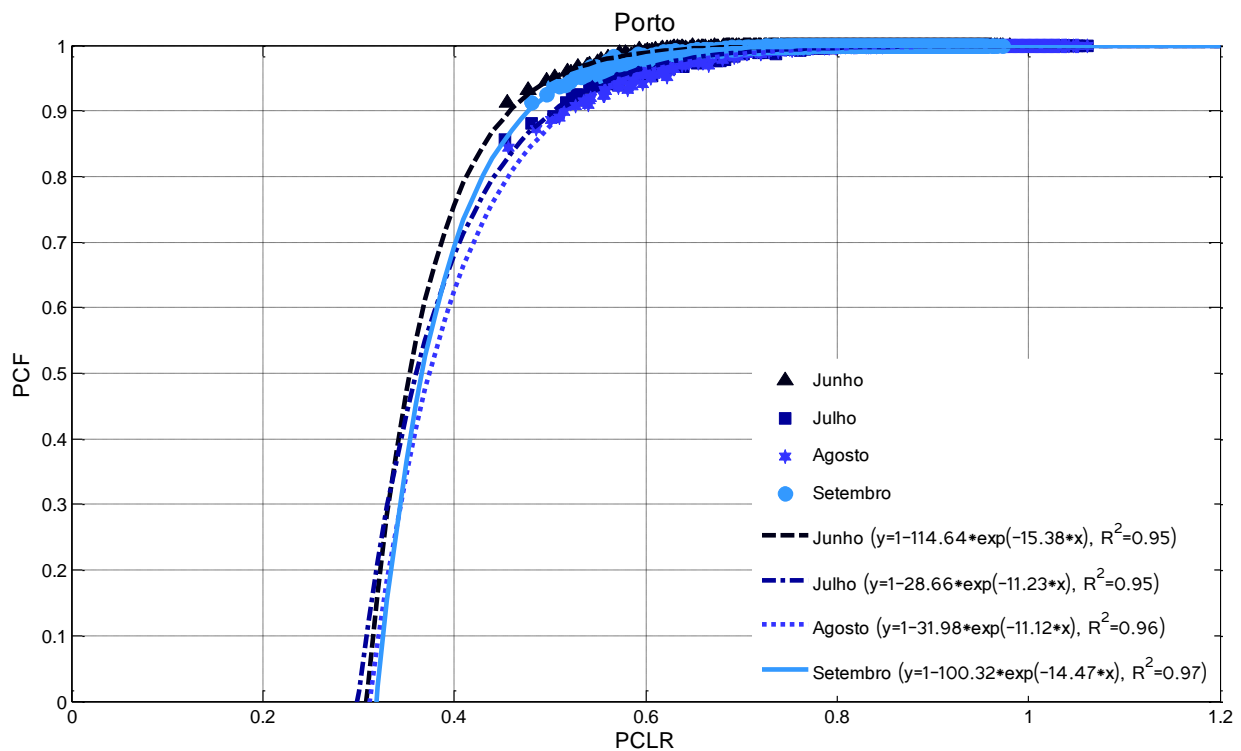


Fig. 9.12 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.3 e 0.4 m)

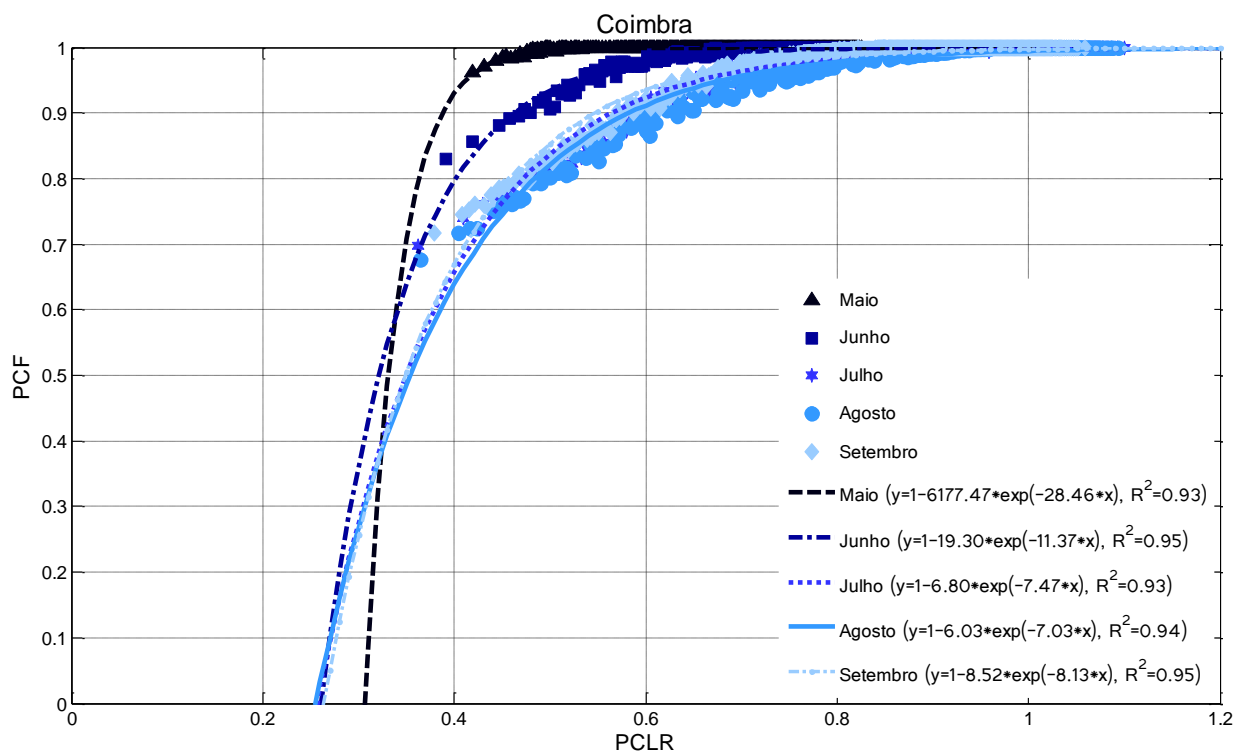


Fig. 9.13 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.3 e 0.4 m)

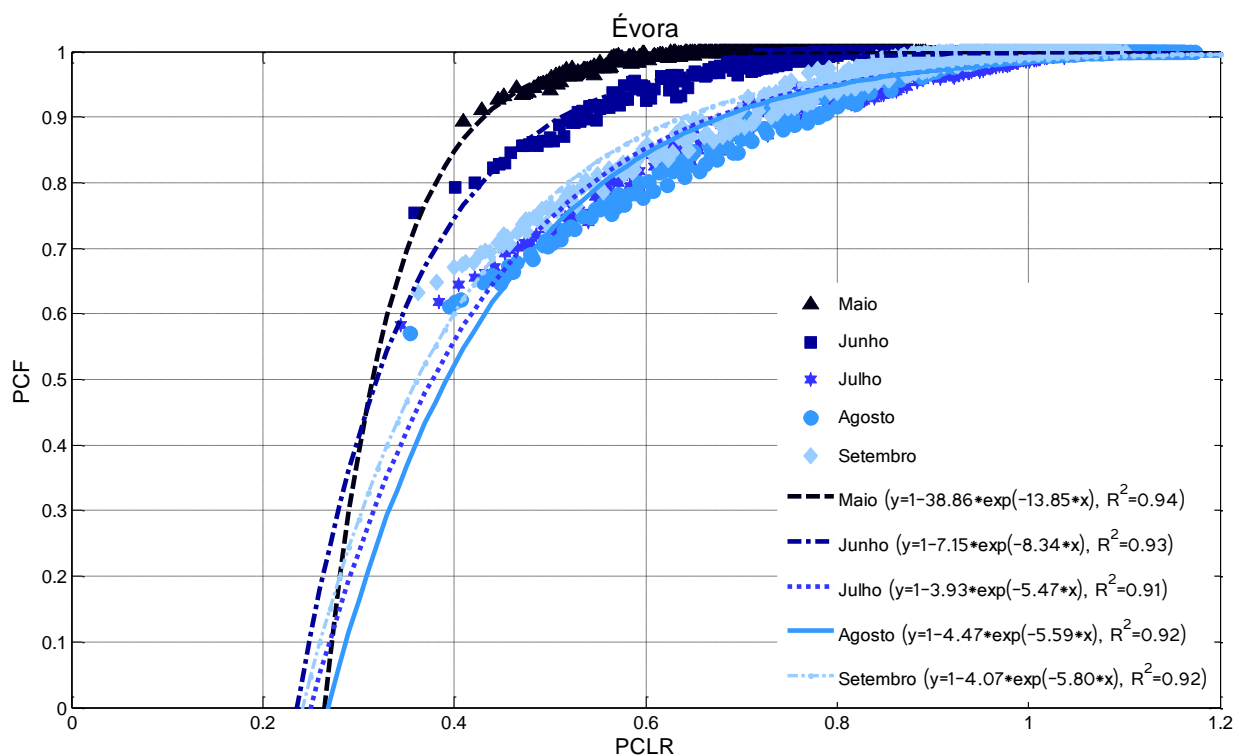


Fig. 9.14 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.3 e 0.4 m)

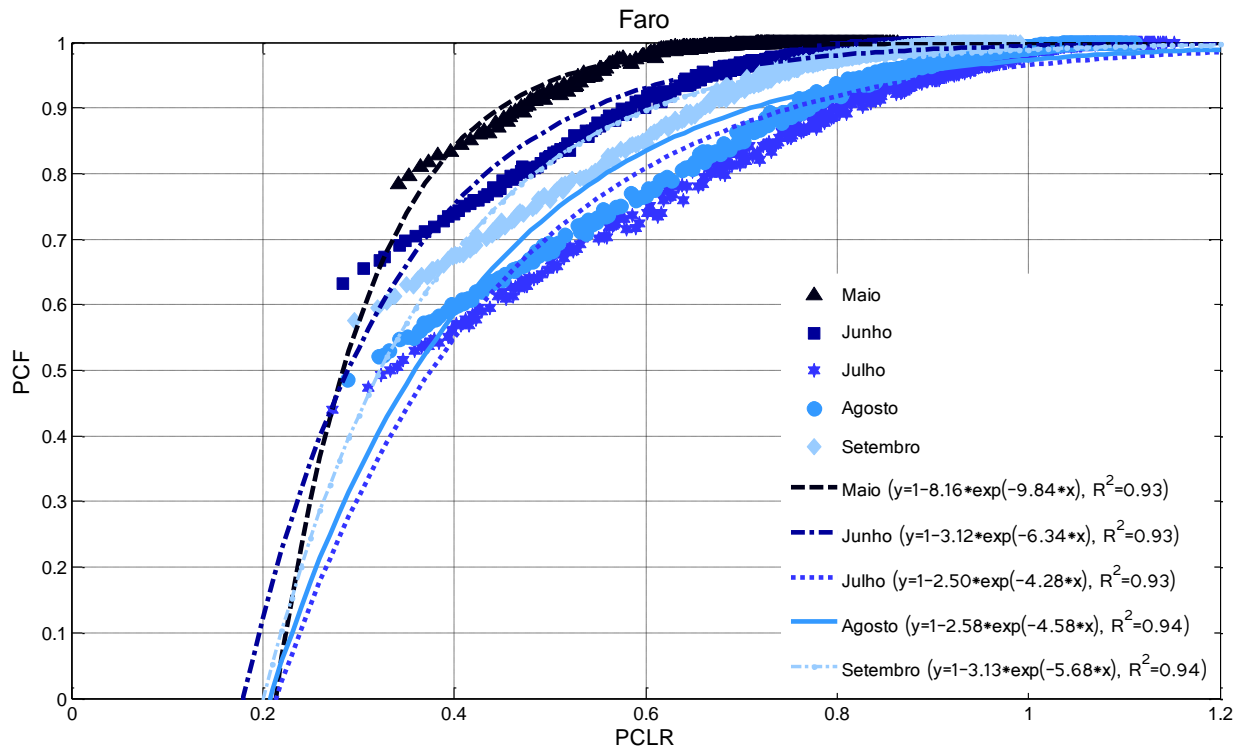


Fig. 9.15 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro. (Sistemas com  $e_{SC}$  entre 0.3 e 0.4 m)

• Sistema de tubos enterrados

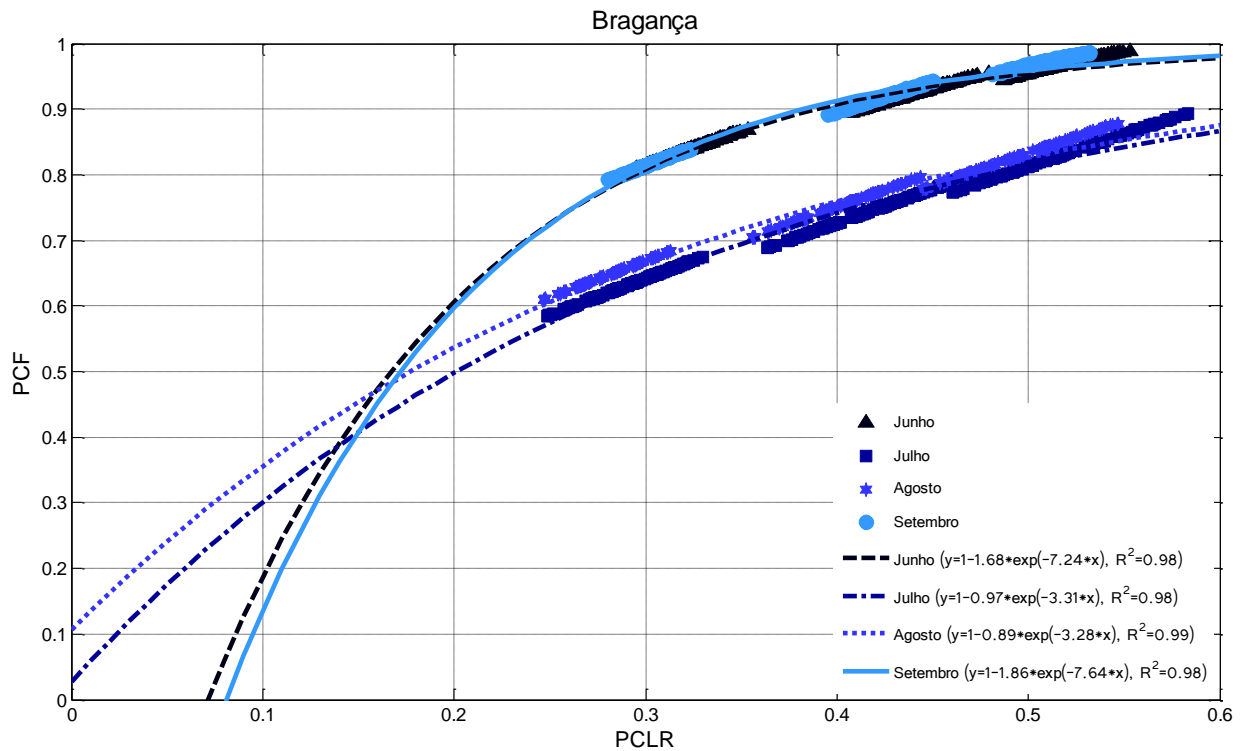


Fig. 9.16 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Bragança.

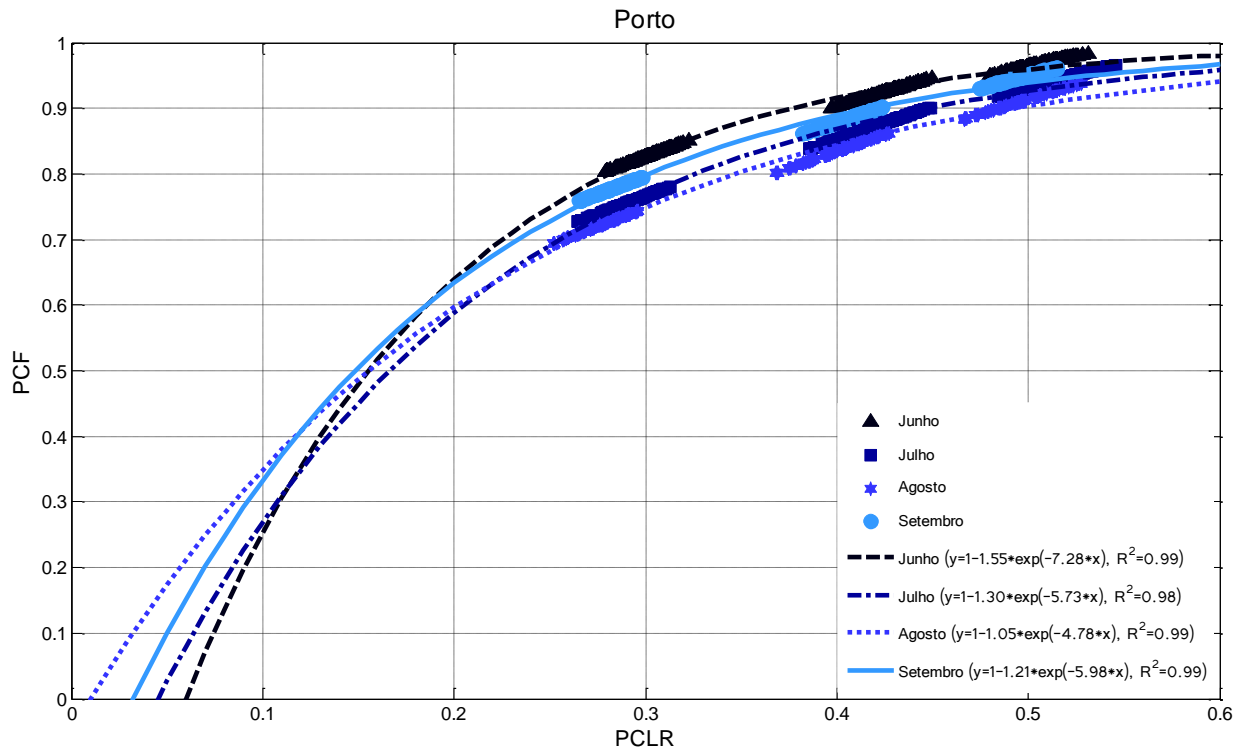


Fig. 9.17 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima do Porto.

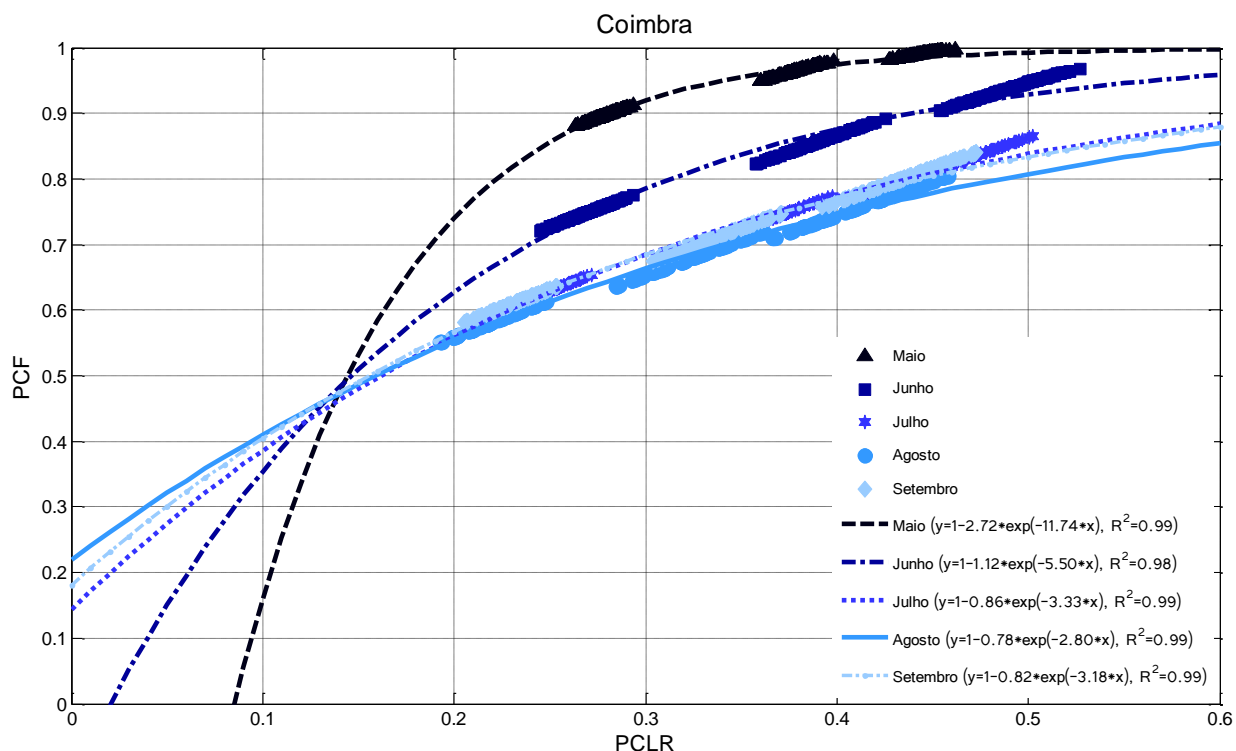


Fig. 9.18 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Coimbra.

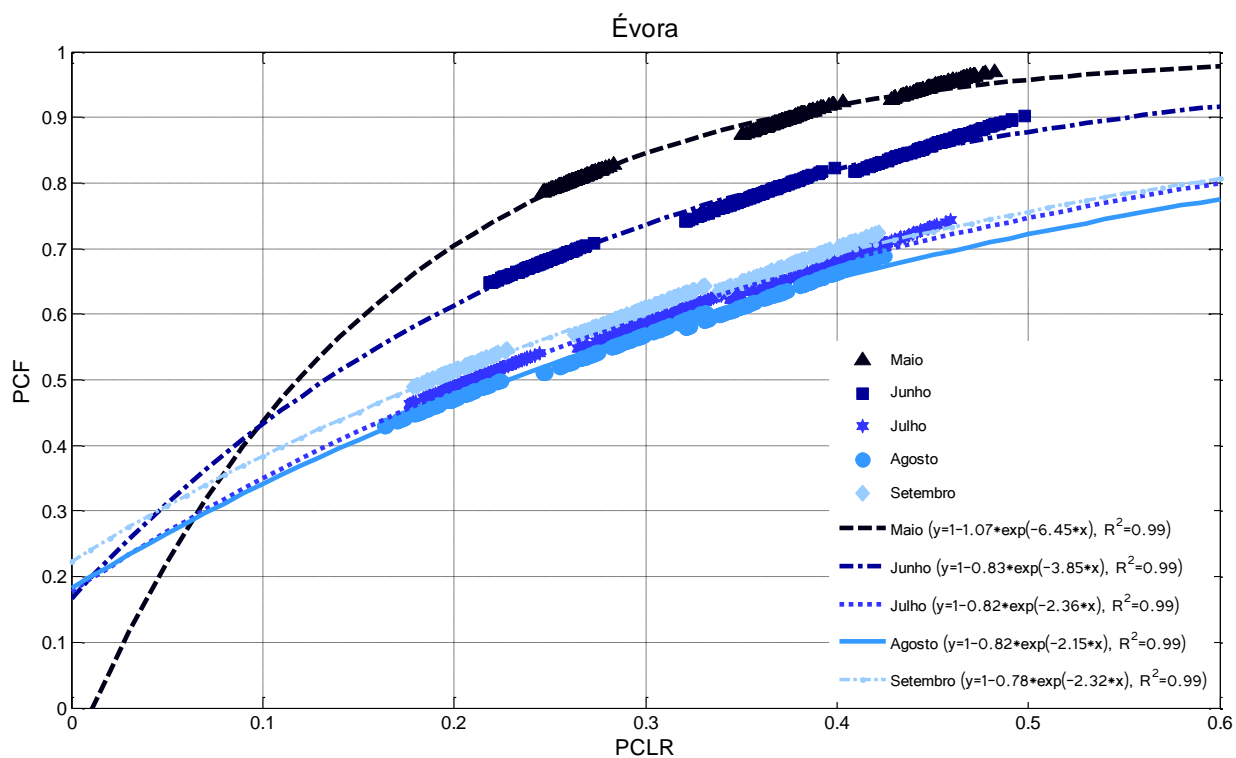


Fig. 9.19 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Évora.

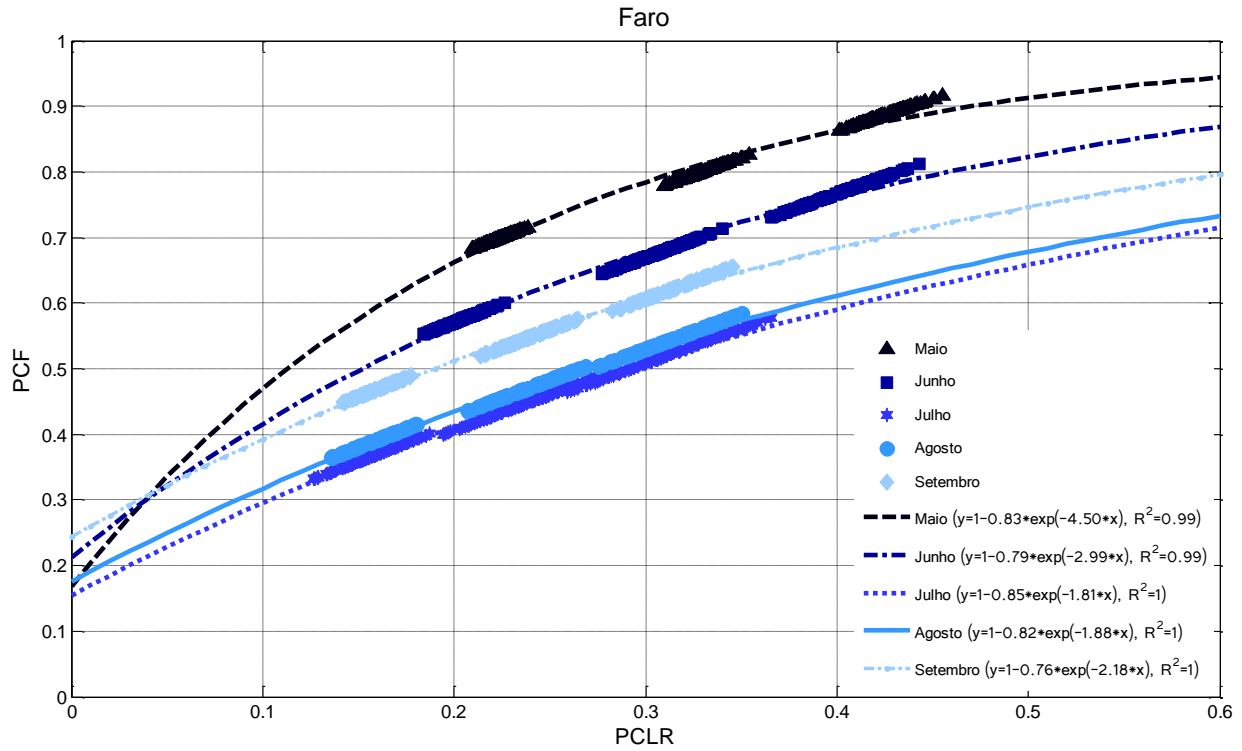


Fig. 9.20 – Curvas mensais de *PCF* em função de *PCLR*, e respetivos ajustes exponenciais, para o clima de Faro.