INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Sistema solar térmico activo para melhoria do conforto habitacional

Pedro Pizarro Beleza Rodrigues Queiró

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Física Tecnológica

Júri

Presidente: Prof. Filipe Mendes

Orientador: Prof. Horácio Fernandes

Vogal: Prof. Carlos Silva

19 de Dezembro de 2012

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Horácio Fernandes pelo apoio e pela oportundiade de elaborar esta tese numa área e num tema de grande interesse pessoal e de grande relevância na actualidade.

Ao Eng.º João Cardoso pela ajuda constante no esclarecimento de dúvidas, na abordagem aos problemas e sobretudo pelos dados de insolação fornecidos.

Ao Eng.º Tomás Eiró pelo apoio em temas de Engenharia Civil, em particular nos temas de Térmica de Edifícios e na revisão da tese.

Ao arquitecto Francisco Vilaça pelas informações prestadas sobre custos de instalação e construção das mais variadas coisas.

Aos Eng.ºs Filipe Serra, Gisela Mendes e João Fortunato pelo apoio logístico na elaboração da tese, fornecendo desde materiais para a construção dos sensores até ajuda com a formatação.

Ao António Rosa pelo apoio durante as horas mais compridas da escrita da tese.

À minha noiva Rita Cadimas pela presença constante, apoio e paciência quando mais precisei dela.

E por fim, aos meus pais José Gabriel Queiró e Maria dos Prazeres Beleza pelas oportunidades e apoio que sempre me deram ao longo da minha vida.

Muito obrigado a todos!

Resumo

O objectivo desta tese consiste em desenhar, medir e avaliar o desempenho de um sistema solar térmico activo de baixo custo utilizado para o aquecimento de uma casa. O sistema proposto utiliza o ar como fluído de trabalho em vez da água, permitindo a sua injecção directa dentro de casa sem recorrer a instalações de piso radiante, depósitos ou bombas de água, resultando numa abordagem diferente do actual estado da arte de sistemas de aquecimento baseados em energias renováveis não-fósseis.

Montou-se um exemplar completo deste sistema numa casa na zona de Sesimbra e recolheram-se dados ao longo de vários meses de forma a se poder aferir o rendimento e a potência de aquecimento do colector sob diversas condições de operação. No decorrer do processo de instalação, tomaram-se decisões sobre a localização e orientação do colector de forma a optimizar a recolha de energia nas alturas mais frias do ano e limitar a recolha durante o Verão.

A operação do sistema foi acompanhada através da medição das temperaturas envolvidas – ambiente externa, interna da casa e do ar dentro do próprio colector – ao longo de um período de 14 meses. Com essas temperaturas, a potência e o coeficiente de *performance* do colector foram medidos experimentalmente, avaliando-se também o impacto da actividade do colector na temperatura da casa comparando-a com a evolução da temperatura de uma casa sem nenhuma fonte de aquecimento. Finalmente, comparou-se o desempenho do sistema com as necessidades de aquecimento previstas no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) e retiraram-se conclusões sobre a adequação do colector para a função de aquecimento de uma casa.

Palavras-chave: Energia solar térmica, energias renováveis, térmica de edifícios, aquecimento solar activo, colector solar plano

Abstract

The goal of this thesis is to design, measure and evaluate the performance of a low-cost, active solar thermal system used for heating a house. The proposed system uses air as a working fluid instead of water, allowing for its direct injection into the house without resorting to underfloor heating installations, water tanks or pumps, enabling an approach different from the current state of the art of renewable, non-fossil energy-based heating systems.

A complete example of this system was installed in a house near Sesimbra, in Portugal, and data was collected over several months in order to determine its heating power and efficiency under a diverse set of operating conditions. Over the course of the installation process, decisions were taken concerning the location and positioning of the collector in order to optimize its energy collection during the colder times of the year whilst limiting its summertime collection.

The operation of the system was monitored through the measurement of the temperatures involved – external ambient temperature, internal house temperature and the air inside the collector itself – over a 14 month period. Based on these temperatures, its heating power and coefficient of performance were experimentally measured, as well as the collector's impact on the house's temperatures through a comparison to the theoretical evolution of the same house without any heating sources. Lastly the collector's performance was compared to the "Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios" (RCCTE - Portuguese regulations concerning building's thermal behaviour) and conclusions were drawn concerning the collector's adequacy to the function of heating a house.

Key words: Thermal solar power, renewable energy, building thermal behaviour, active solar heating, flat solar panel

Índice

Agradecimentos iii

Resumo v

Abstract vii

Lista de Tabelas xiii

Lista de Figuras xvii

Nomenclatura xix

1 Introdução 1

1.1 Motivação e Objectivos 1

1.2 Estado actual do mercado de aquecimento em Portugal 2

1.3 Potencial de energia solar térmica em Portugal 4

1.4 Estado da arte – tecnologias disponíveis e custos associados 6

1.4.1 Aquecedores solares a ar 6

1.4.2 Aquecedores clássicos 12

1.4.3 Sistemas de aquecimento centralizado 14

2 Análise teórica 17

2.1 Conforto humano e comportamento térmico de edifícios 17

2.1.1 Conforto térmico humano 17

2.1.2 Balanço térmico dos edifícios 19

2.1.3 Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) 21

2.2 Irradiação solar 22

2.2.1 Geometria solar - ângulos e definições 23

2.2.2 Potência solar incidente 25

2.3 Potência e rendimento de colectores solares 26

3 Desenho e Construção do Colector Solar 29

3.1 Localização da casa e implicações para o colector 29

3.1.1 Localização e orientação do colector 31

3.1.2 Necessidades térmicas da casa 34

3.2 Construção do colector 35

3.2.1 Superficie de absorção, caixa de ar e ventilação 36

3.2.2 Sistema de controlo e parâmetros escolhidos 37

3.2.3 Custos de construção e operação 39

3.3 Desempenho esperado 39

3.3.1 Potência e Rendimento esperados 39

3.3.2 Desempenho térmico da casa 40

4 Análise Experimental 45

4.1 Dados recolhidos 45

4.1.1 Montagem experimental e calibração 46

4.1.2 Erros de medição 47

4.1.3 Propagação de erros no cálculo da potência injectada 48

4.2 Análise dos dados 48

4.2.1 Evolução das temperaturas 48

4.2.2 Resumo dos resultados obtidos 53

4.2.3 Potência injectada 54

4.2.4 Rendimento do colector 54

4.2.5 Temperatura de estagnação do colector 56

4.3 Análise dos resultados 58

4.3.1 Cumprimento das necessidades térmicas da casa 58

4.3.2 Análise crítica dos parâmetros de funcionamento 59

4.3.3 Avaliação económica do desempenho do colector 60

5 Conclusões 63

5.1 Resultados obtidos 63

5.1.1 Conclusões finais 65

5.2 Perspectivas futuras 65

5.2.1 Desenvolvimento do colector 65
5.2.2 Lançamento no mercado 66

Bibliografia **67**

A Aquisições completas **A-1**

Lista de Tabelas

1.1 Consumo de energia no sector doméstico por tipo de energia (tep) 3

1.2 Distribuição de equipamentos utilizados para aquecimento ambiente por tipo de sistema 4

1.3 Potencial de energia solar térmica na União Europeia e em alguns países seleccionados 5

1.4 Custos dos componentes de um sistema de piso radiante com energia solar térmica . . . 15

1.5 Configurações e custos possíveis para sistema de piso radiante com energia solar térmica 15

2.1 Potências dissipadas pelo corpo humano para vários tipos de actividade 18

2.2 Parâmetros numéricos do modelo ASHRAE *Clear Sky Model* 25

3.1 Valores de referência da casa – dimensões, temperaturas alvo e parâmetros do RCCTE . 34

3.2 Especificações técnicas do controlador utilizado (AKO-14220) 38

3.3 Composição das paredes externas da casa por camada 41

4.1 Especificações técnicas dos sensores de temperatura utilizados (LM335) 46

4.2 Temperaturas e tempo de operação do colector entre 20 e 27 de Fevereiro de 2010 . . . 49

4.3 Temperaturas e tempo de operação do colector entre 3 e 10 de Abril de 2010 50

4.4 Temperaturas e tempo de operação do colector entre 3 e 10 de Julho de 2010 51

4.5 Temperaturas e tempo de operação do colector entre 9 e 16 de Outubro de 2010 52

4.6 Temperaturas e tempo de operação do colector entre 17 e 24 de Janeiro 2011 52

4.7 Temperaturas e tempo de operação do colector entre 20 e 27 de Fevereiro 2011 53

4.8 Resultados das medições experimentais – demonstração do aumento de temperatura por acção do colector face à evolução da temperatura exterior 54

4.9 Valores dos parâmetros de rendimento óptico do colector 56

4.10 Cenários possíveis de cumprimento das necessidades de aquecimento da casa para limiar mínimo de 4 °C 60

4.11 Tempos de retorno médios para o colector proposto comparado com alternativas 60

Lista de Figuras

1.1 Exemplo de instalação de um sistema solar sem cobertura do tipo SolarWall 7
1.2 Diagrama de funcionamento de um sistema solar sem cobertura do tipo SolarWall 7
1.3 Estrutura e corte lateral do colector solar coberto de McCullough et al (1981) 8
1.4 Estrutura do colector solar coberto de McAlaster (1982) 8
1.5 Estrutura, composição e fluxo de ar do colector solar coberto de Mohamad (1997) 9
1.6 Exemplo de instalação de um colector solar Q Solar A3A 10
1.7 Diagrama do fluxo de ar no colector Solar Sponge 10
1.8 Exemplo de instalação de um colector Solar Sponge em Sydney, Austrália 11
1.9 Evolução da potência calorífica do colector Solar Sponge a 26 de Agosto de 2005 11
1.10 Evolução das temperaturas interior e exterior com e sem colector Solar Sponge em funcionamento 12
1.11 Radiador eléctrico independente de referência 13
1.12 Aquecedor a gás independente de referência 14

2.1 Diagramas dos mecanismos de transferência de calor 19
2.2 Representação esquemática da condução térmica em série e em paralelo 20
2.3 Definição de latitude, declinação e ângulo horário solar 24
2.4 Definição de altitude solar, zénite e azimute solar 24
2.5 Definição de azimute de superfície e ângulo de incidência 24

3.1 Parede sul da casa com colector solar finalizado e em funcionamento 29
3.2 Localização da casa e zona circundante – demonstração de inexistência de obstáculos à incidência do Sol no colector 30
3.3 Energia incidente ao longo do ano para inclinações de 0°, 45° e 90° (modelo ASHRAE) . 32
3.4 Energia incidente ao longo do ano para para inclinações de 0° e 90° com média diária para cada mês (dados LNEG) 33
3.5 Alçada Sul da casa 33

3.6 Planta do piso térreo da casa. As zonas a aquecer são os quartos A, B e C e as instalações sanitárias adjacentes (área total de 44,8 m^2) 34
3.7 Desenho técnico do colector; visões frontal e laterais 35
3.8 Curva de caudal contra potência consumida do ventilador 37
3.9 Montagem do ventilador no interior da casa antes da montagem do silenciador 38
3.10 Circuito de controlo do funcionamento do colector, incluindo os dois relés actuados independentemente pelo controlador AKO-14220 38
3.11 Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 2 de Abril e 15 de Maio de 2010 41
3.12 Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 21 de Junho e 20 de Julho de 2010 42
3.13 Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 15 e 28 de Outubro de 2010 42
3.14 Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 13 de Fevereiro e 14 de Março de 2011 43

4.1 Teclado e *inputs* do MultiLog 46
4.2 Diagrama dos sensores e *pin-out* do MultiLog 47
4.3 Curva de calibração da montagem experimental (R^2 = 0,9754) 47
4.4 Primeira aquisição experimental (20 a 27 de Fevereiro de 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector 49
4.5 Segunda aquisição experimental (3 a 10 de Abril de 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector 50
4.6 Terceira aquisição experimental (3 a 10 de Julho 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector 51
4.7 Quarta aquisição experimental (9 a 16 de Outubro 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector 52
4.8 Quinta aquisição experimental (17 a 24 de Janeiro 2011) com temperaturas e períodos de operação do colector 52
4.9 Quinta aquisição experimental (20 a 27 de Fevereiro 2011) com temperaturas e períodos de operação do colector 53
4.10 Acima: potência solar incidente e evolução das temperaturas ao longo do dia. Abaixo: Potência injectada pelo colector ao longo desse mesmo dia e COP do colector. 55

4.11 Temperaturas de estagnação da superfície de absorção em função da potência incidente 57

A-1 Aquisição entre 20 Fevereiro e 20 Março 2010 . . . . . A-1

A-2 Aquisição entre 2 Abril e 15 Maio 2010 . . . . . A-2

A-3 Aquisição entre 16 Maio e 21 Julho 2010 . . . . . A-2

A-4 Aquisição entre 28 Julho e 29 Julho 2010 . . . . . A-3

A-5 Aquisição entre 9 Agosto e 11 Agosto 2010 . . . . . A-3

A-6 Aquisição entre 9 Outubro e 17 Outubro 2010 . . . . . A-4

A-7 Aquisição entre 17 Outubro e 24 Outubro 2010 . . . . . A-4

A-8 Aquisição entre 24 Outubro e 7 Novembro 2010 . . . . . A-5

A-9 Aquisição entre 15 Novembro e 28 Novembro 2010 . . . . . A-5

A-10 Aquisição entre 19 Dezembro e 29 Dezembro 2010 . . . . . A-6

A-11 Aquisição entre 17 Janeiro e 29 Janeiro 2011 . . . . . A-6

A-12 Aquisição entre 13 Fevereiro e 20 Março 2011 . . . . . A-7

A-13 Aquisição entre 20 Março e 3 Abril 2011 . . . . . A-7

A-14 Aquisição entre 3 Abril e 29 16 Abril 2011 . . . . . A-8

Nomenclatura

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
COP	Coefficient of Performance
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
EREC	European Renewable Energy Council
ESTIF	European Solar Thermal Industry Federation
ICESD	Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
INE	Instituto Nacional de Estatística
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
tep	tonelada equivalente de petróleo

Capítulo 1

Introdução

A necessidade de aquecer a casa é comum a todas as latitudes – um sistema de aquecimento eficiente pode fazer a diferença entre uma casa confortável o ano todo e um lugar que só se pode visitar no Verão. Em climas como o Português, com elevadas amplitudes térmicas um pouco por todo o país, esta é uma preocupação séria, existindo no mercado vários sistemas para aquecer e controlar a temperatura interna de uma casa assentes em diversas tecnologias, desde as tradicionais lareiras até sistemas solares térmicos com piso radiante. No entanto, a esmagadora maioria destes sistemas funciona à base de combustíveis fósseis (lenha, gás, electricidade produzida com carvão, gasóleo, etc) com os custos financeiros e ecológicos que daí decorrem, tornando-se desejável encontrar um sistema simples, barato e ecologicamente limpo para aquecer uma casa.

Assim sendo, o presente trabalho procura avaliar e caracterizar um sistema de aquecimento activo de baixo custo que se espera poder vir a ser uma alternativa real no aquecimento de casas em Portugal. Este sistema deverá ser simples, baseado em energias renováveis e capaz de cumprir os regulamentos em vigor para garantir a qualidade de vida dos habitantes das casas onde for instalado. Deve ser ainda possível implementá-lo em todo o território nacional, com particular atenção a áreas urbanas de maior densidade populacional.

No decorrer deste estudo será feita uma abordagem ao actual mercado de aquecimento, em particular ao uso de energias renováveis, com vista a avaliar a possível procura de um sistema desse tipo. Em seguida, será descrito o sistema proposto – a sua construção, operação e custos – e avaliado o seu desempenho através de uma série de medições experimentais. Finalmente, serão propostas melhorias ao sistema e será avaliada a possibilidade de o lançar no mercado.

1.1 Motivação e Objectivos

Este projecto nasceu da necessidade do proprietário de uma casa na zona de Sesimbra aquecer a sua casa de forma fiável e barata. Esta casa em particular sofria de problemas de humidade sérios e

atingia temperaturas no Inverno da ordem dos 5 °C - 6 °C, levando inclusivamente ao congelamento parcial do azeite lá armazenado, pelo que se tornou essencial encontrar uma forma de aquecer a casa adequadamente e a baixo custo, aliviar os problemas de humidade e permitir aos seus ocupantes um nível de conforto térmico suficiente. Neste contexto, dado que o dono não queria instalar um sistema tradicional – devido aos custos e aos perigos associados, por exemplo com o armazenamento de gás na casa – surgiu a oportunidade de desenvolver um sistema inovador para aquecer a casa.

Dadas as condições da casa – exposição solar abundante, paredes isoladas e orientadas aos pontos cardeais sem obstruções significativas –, o custo de instalação de uma caldeira e a dificuldade de obter resultados semelhantes com aquecedores de pequeno porte, tomou-se a decisão de projectar, instalar e avaliar um sistema solar térmico activo para o aquecimento da casa. Esperava-se também que um sistema solar que funcionasse a ar conseguisse reduzir o nível de humidade do ar através de uma ventilação melhorada, contribuindo também para o conforto dos ocupantes. Em termos de custo, este sistema solar teria de ter uma operação de muito baixo custo para, num prazo razoável, compensar a instalação de outros sistemas. No entanto, sabia-se à partida que o custo de instalação seria provavelmente mais elevado.

Definiram-se assim os objectivos deste trabalho:

1. Desenhar e estimar o funcionamento de um colector solar térmico a ar para instalação na casa;
2. Instalar e operar esse mesmo colector solar;
3. Avaliar o seu funcionamento com vista a:
    - Melhorar os parâmetros de operação e o rendimento do colector;
    - Equacionar a possibilidade de lançar um produto no mercado baseado neste colector.

Ao longo desta tese será dada resposta a estes objectivos, começando por uma avaliação do mercado actual de energia em Portugal com foco no aquecimento habitacional no capítulo 1, seguida por uma apreciação da teoria envolvida tanto no comportamento térmico de edifícios como na incidência da radiação solar na Terra no capítulo 2. Será depois discutido o desenho do sistema de aquecimento e estimado o seu funcionamento com base nesta teoria no capítulo 3 e analisado o seu desempenho prático no capítulo 4, apresentando-se as conclusões no capítulo 5.

1.2 Estado actual do mercado de aquecimento em Portugal

A oferta tecnológica de aquecimento de casas, actualmente, não contempla um conjunto significativo de sistemas baseados em energias renováveis. As fontes de energia de aquecimento mais comuns,

de acordo com o INE e a DGEG (Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico, [7], 2010), são a lenha, o gasóleo de aquecimento e a electricidade, surgindo o solar térmico no fundo da tabela logo acima do carvão (tabela 1.1). No caso do aquecimento de águas, a situação melhora em termos de oferta tecnológica, mas a sua implementação em Portugal continua bastante baixa, sendo o solar térmico a fonte menos utilizada em residências Portuguesas.

Fonte	Aquecimento ambiente	Arrefecimento ambiente	Aquecimento de águas	Cozinha	Equipamentos eléctricos
Lenha	360.828		41.016	292.347	
Gasóleo Aquecimento	75.445		49.191		
Electricidade	74.346	13.107	19.639	332.557	381.003
GPL Garrafa	10.403		249.457	223.993	
Gás Natural	8.231		162.782	92.494	
GPL Canalizado	2.899		43.396	24.330	
Solar Térmico	1.546		17.559		
Carvão	192			6.212	
Total	533.892	13.107	583.040	971.933	381.003

Tabela 1.1: Consumo de energia no sector doméstico por tipo de energia (tep)

Quanto ao número e tipo de equipamentos de aquecimento disponíveis, os aquecedores eléctricos independentes são os mais comuns nas casas Portuguesas, utilizados em 61,2% dos alojamentos Portugueses ([7]). Em comparação, o INE e a DGEG não encontraram painéis solares térmicos utilizados exclusivamente para aquecimento de ambientes, como demonstrado na tabela 1.2. Este fenómeno deve-se ao facto de que os sistemas solares térmicos existentes serem utilizados quase exclusivamente para aquecimento de águas sanitárias – 92% do consumo energético atribuído ao solar térmico – e de não existirem actualmente no mercado sistemas dedicados para o aquecimento ambiente. As ofertas que existem, como será explicado na secção 1.4.3, consistem exclusivamente de sistemas de aquecimento de águas sanitárias que podem ser adaptados para aquecimento de piso radiante, pelo que não são contabilizados como aparelhos de aquecimento ambiente pelo INE ou pela DGEG.

A utilização de sistemas solares térmicos a água para aquecimento doméstico apresenta vários problemas, no entanto, sendo inclusivamente desaconselhado pelo programa Medida Solar Térmico 2010 ([8]), de incentivo à instalação de sistemas solares térmicos. Apesar de ser possível atingir bons níveis de conforto térmico com baixo consumo energético, este tipo de instalação tipicamente implica elevados custos de construção, uma grande área de colectores solares (tipicamente da ordem dos 10 m^2) e reservatórios da ordem dos 1000 litros (Wondrausch, 2009, [9]) para funcionar. Para além disto, o sistema de circulação de água deve ser separado do de aquecimento de águas sanitárias devido à diferença de temperatura entre das duas ($\approx 30\ ^\circ C$ para aquecimento habitacional, contra $\approx 45\ ^\circ C$ para águas quentes sanitárias), pelo que não será possível reutilizar um sistema desses em funcionamento.

Tipo de Equipamento	Alojamentos	%	Equipamentos	Equipamentos / alojamento
Aquecedor eléctrico independente	1.884.850	61,2	2.794.054	1,5
Lareira aberta	740.264	24,0	766.581	1,0
Caldeira para aquecimento central por circulação de água	323.520	10,5	340.904	1,1
Lareira com recuperador de calor	340.498	11,1	346.204	1,0
Ar Condicionado (Bomba de Calor)	223.429	7,3	402.664	1,8
Salamandra (lenha)	222.856	7,2	226.138	1,0
Aquecedor a GPL independente	218.293	7,1	237.589	0,1
Sistema solar térmico	x	x	x	x

Tabela 1.2: Distribuição de equipamentos utilizados para aquecimento ambiente por tipo de sistema

O sistema descrito neste estudo é um sistema solar térmico activo a ar, o que implica um funcionamento bastante diferente de todos os sistemas encontrados nesta pesquisa. De qualquer forma, esta será a concorrência a enfrentar caso seja lançado no mercado, pelo que se torna agora necessário analisar o seu funcionamento. Assim sendo, seleccionou-se um aquecedor eléctrico moderno, um aquecedor a gás e um conjunto de painéis solares térmicos a água para análise e comparação. Dada a importância da lenha e do gasóleo de aquecimento, tentou-se ainda estimar os custos associados a sistemas dessa natureza, bem como os de uma caldeira central (uma a gás natural e outra eléctrica), mas sem comparar directamente o desempenho dos aparelhos dadas as suas diferenças de uso.

1.3 Potencial de energia solar térmica em Portugal

O potencial da energia solar em Portugal sempre foi reconhecido como muito elevado devido às características do nosso clima, com Lisboa a rondar as 2750 horas de Sol por ano. No entanto, historicamente o seu aproveitamento tem sido lento; em 2008 apenas existiam cerca de 86.000 m^2 (ESTIF, [10], 2011) de painéis solares térmicos instalados. Nos últimos anos, em contraste, Portugal assistiu a um fortíssimo crescimento no mercado solar térmico, devido sobretudo aos programas de incentivo fiscal lançados em 2009. De acordo com a ESTIF ([10]), em 2009 Portugal instalou cerca de 90.000 m^2 de colectores solares térmicos, tanto quanto tinha anteriormente em operação. Ainda assim, o potencial de energia solar por aproveitar é grande; de acordo com o European Renewable Energy Council ([11], 2004), o potencial em Portugal atinge os 27.062.100 m^2, como apresentado na tabela 1.3.

De acordo com o INE ([7], 2010) existem 3.932.010 alojamentos habitacionais em Portugal; assim sendo, existe um potencial de cerca de 7 m^2 de colectores solares térmicos por alojamento em Portugal

País	População	Potencial absoluto (m^2)	Potencial por 1000 habitantes (m^2)	Produção anual de energia	
				GWh	Mtep
Alemanha	82.193.000	320.552.700	3900	130.607	11,2
Áustria	8.121.000	31.671.900	3900	11.193	1,0
Espanha	39.490.000	106.623.000	2700	64.448	5,5
França	59.521.000	232.131.900	3900	139.279	12,0
Itália	57.844.000	190.885.200	3300	116.543	10,0
Holanda	15.983.000	62.333.700	3900	26.180	2,3
Suécia	8.883.000	55.962.900	6300	16.849	1,4
Portugal	10.023.000	27.062.100	2700	16.237	1,4
Reino Unido	59.823.000	233.309.700	3900	102.196	8,8
União Europeia	377.499.000	1.412.037.300	3770	682.149	58,7

Tabela 1.3: Potencial de energia solar térmica na União Europeia e em alguns países seleccionados

ainda por explorar. Tomando os valores de [16] como referência, para uma potência média de 0,58 kW / m^2 isso sugere a possibilidade de instalar 4,1 kW de potência térmica por casa em Portugal, o que traria enormes benefícios económicos, financeiros e ecológicos – corresponde a um aquecedor a gás por casa em Portugal a funcionar em pleno (o Hotspot da Galp dá 4 kW máximos, por exemplo) utilizando colectores na média do mercado.

Actualmente, o maior obstáculo à instalação em larga escala de sistemas solares térmicos, infelizmente, é o seu custo – como mencionado acima, a instalação desses equipamentos em Portugal apenas disparou com o programa de incentivos de 2009, e dado o actual clima de incerteza económica e austeridade financeira, não é de esperar que programas desse tipo voltem a surgir a curto prazo. Por exemplo, um sistema solar térmico simples para aquecimento de águas sanitárias, com um colector de 2 m^2, custa cerca de €700 (estimativa de [11]), podendo exceder rapidamente os €1000 dependendo da instalação. Caso seja necessária uma maior área, este valor sobe rapidamente, o que torna especialmente caro para famílias grandes em cidades densamente povoadas. Sistemas com os 7 m^2 mencionados acima, em Portugal, custariam cerca de €2800 - €3500 a instalar, dependendo das condições da casa para instalação do tanque, tubagens, inclinação do painel e outros factores.

No que toca à dimensão económica do mercado, de acordo com [7], a despesa média anual com energia por alojamento era, em 2010, de €840 por ano, dos quais 10,7%, ou €61,68, se deviam ao aquecimento ambiente. Assim sendo, pode-se estimar um potencial económico para a energia solar térmica para aquecimento habitacional de cerca de cerca de €242,5 milhões por ano apenas em necessidades de aquecimento ambiente doméstico. O mercado estimado tem assim em Portugal uma dimensão apreciável, sendo que a tecnologia utilizada é facilmente exportável para qualquer país e os métodos empregues adequam-se facilmente a qualquer país fora das zonas tropicais.

1.4 Estado da arte – tecnologias disponíveis e custos associados

1.4.1 Aquecedores solares a ar

A oferta de sistemas de aquecimento no mercado nacional actualmente não contempla sistemas activos de aquecimento solar a ar. O próprio INPI não tem patentes em vigor nem pedidos registados de sistemas deste tipo em Portugal, sendo o registo mais parecido um sistema de pré-aquecimento de ar para ventilação de grandes superfícies (Hollick, 2005, [24]). No entanto, existem algumas opções no mercado internacional e alguns estudos já efectuados sobre este tipo de sistemas, tornando-se interessante rever a literatura existente no âmbito desta tese.

Existem dois tipos principais de sistema de aquecimento solar a ar:

- Sistemas **sem cobertura**, onde a superfície de absorção está exposta directamente ao ar e o ar é forçado através da superfície de forma a absorver calor;
- Sistemas **cobertos**, que utilizam uma cobertura transparente para criar uma caixa de ar sobre a superfície de absorção, circulando o ar sobre a superfície antes de o injectar para dentro de casa.

Ambos os tipos de sistema podem aquecer o ar exterior para o injectar num sistema de ventilação ou recircular o ar interior numa configuração de parede de Trombe, sendo até possível a utilização de um sistema sem cobertura em conjunto com painéis solares fotovoltaicos numa configuração híbrida que utiliza os painéis fotovoltaicos como superfície de absorção e circulando o ar sobre a parte de trás dos painéis para aquecimento da casa. Um exemplo estas instalações híbridas é o edifício Solar XXI do LNEG, que assegura assim o aquecimento do edifício e a produção de energia eléctrica utilizando a mesma parede voltada a sul ([28]).

Os sistemas sem cobertura são utilizados sobretudo para aquecimento de grandes superfícies comerciais ou industriais, bem como para algumas aplicações em processos industriais, devido sobretudo à necessidade de ter uma grande superfície colectora para compensar as perdas radiativas que uma cobertura normalmente minimiza. Esta exigência, apesar de simplificar a construção e diminuir os custos associados ao sistema, tem fortes implicações arquitectónicas – tanto em termos estéticos como de espaço disponível – pelo que não é viável para aplicações habitacionais; ainda assim, existem vários exemplos de sistemas deste tipo, como o SolarWall da Conserval Engineering ([29]), particularmente popular nos Estados Unidos e no Canadá (exemplos nas figuras 1.1 e 1.2).

O segundo tipo de sistemas é o mais relevante para este trabalho, dado que são estes que encontram maior aplicação em edifícios de habitação. Nestes sistemas o ar é circulado por uma caixa de ventilação formada pela superfície de absorção, a cobertura e uma caixilharia lateral, sendo que a

Figura 1.1: Exemplo de instalação de um sistema solar sem cobertura do tipo SolarWall

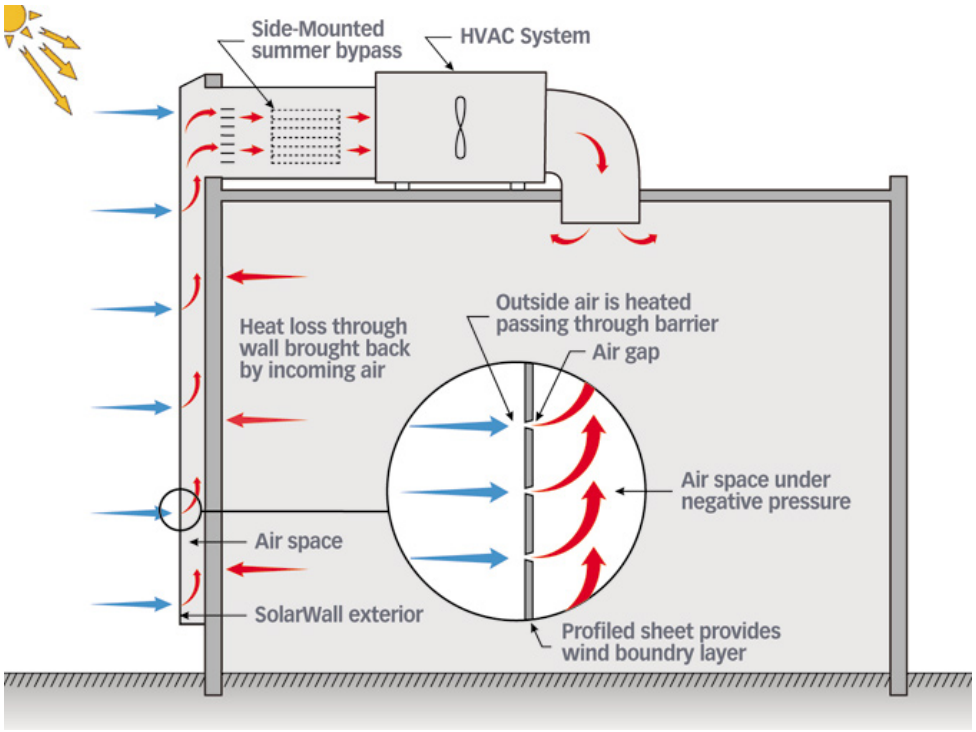


Figura 1.2: Diagrama de funcionamento de um sistema solar sem cobertura do tipo SolarWall

cobertura deve ser o mais transparente possível e a superfície de absorção ter a maior absorptância possível (por exemplo através da utilização de revestimentos selectivos). A configuração da entrada de ar e do percurso do ar na caixa pode variar, tendo impactos fortes na eficiência, complexidade e custo do colector.

Dado o objectivo declarado de controlar os custos de construção do colector, a configuração da caixa de ar e do sistema de ventilação não deverá ser muito complexa. Ainda assim, é pertinente mencionar algumas configurações já estudadas e patenteadas; estas vão desde uma superfície de absorção perfurada e com a saída de ar por baixo da placa colectora, como descrito por McCullough et al em 1981 (figura 1.3, [25]) até sistemas mais complexos como descritos por McAlaster em 1982, onde o ar é circulado através de múltiplos níveis e de obstáculos desenhados para maximizar a absorção de calor (figura 1.4, [26]).

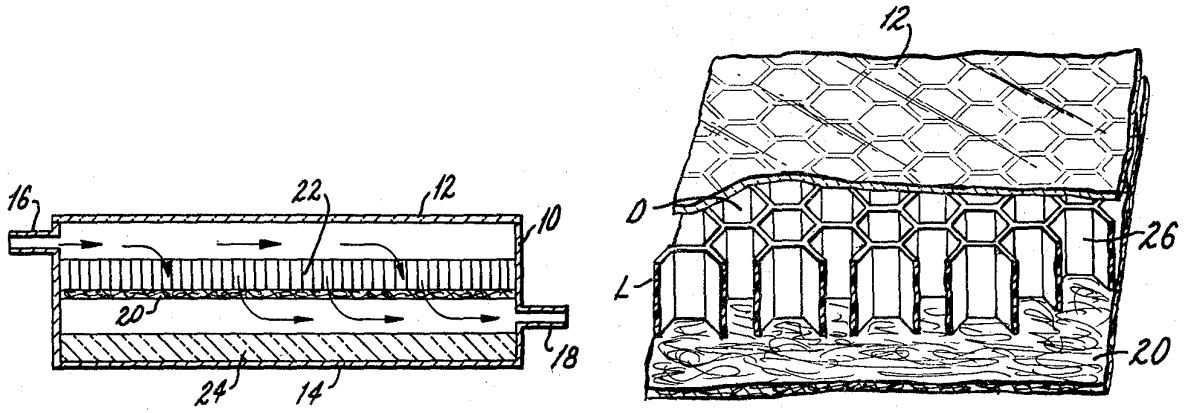


Figura 1.3: Estrutura e corte lateral do colector solar coberto de McCullough et al (1981)

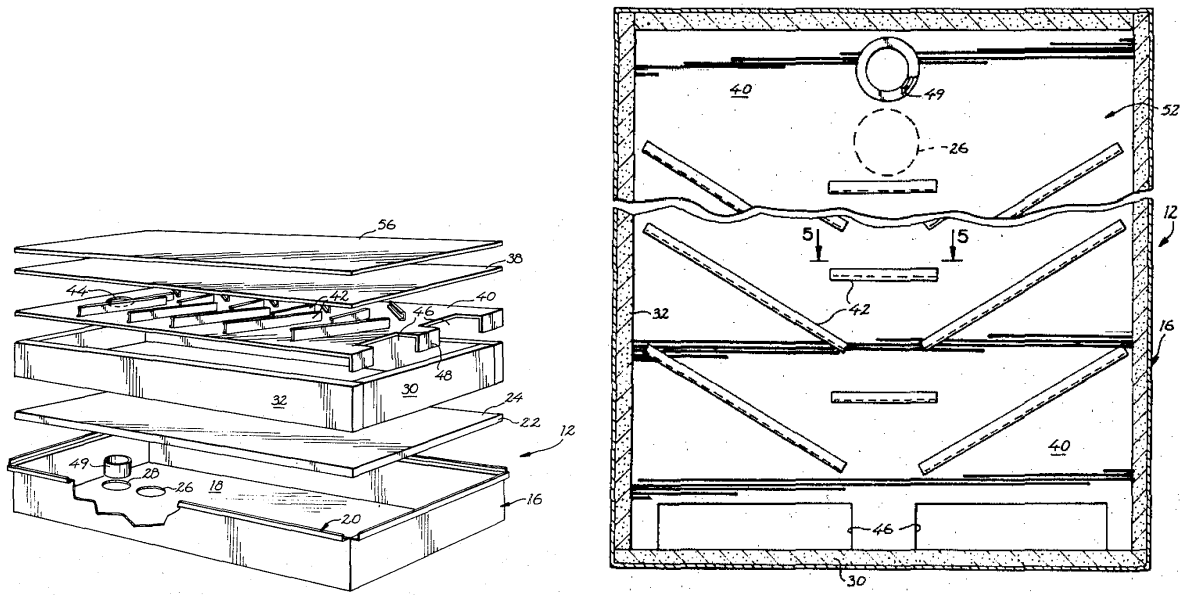


Figura 1.4: Estrutura do colector solar coberto de McAlaster (1982)

O funcionamento de colectores planos simples também é estudado em artigos académicos – por exemplo, Mohamad (1997), [27], que estuda o funcionamento de um colector em que o ar passa pelos dois lados da placa de absorção com vista a melhorar a eficiência do colector (figura 1.5).

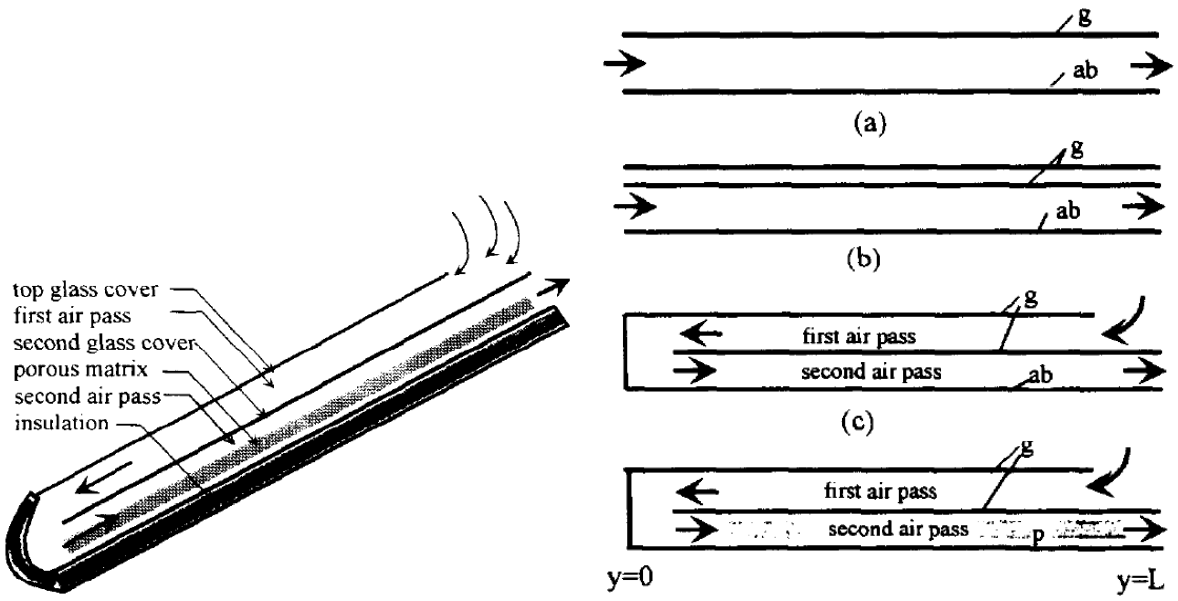


Figura 1.5: Estrutura, composição e fluxo de ar do colector solar coberto de Mohamad (1997)

No entanto, para efeitos de comparação com o sistema descrito neste trabalho os sistemas mais adequados seguirão os mesmos princípios aqui descritos: barato e simples de construir e operar. Existem poucas ofertas no mercado de sistemas activos, pelo que se escolheu um sistema comercial e um sistema caseiro. Destes, o último é, por sinal, o único com dados e documentação disponível ao público, pelo que será tomado como referência para a avaliação dos resultados experimentais.

Começando pelo colector comercial, a empresa Australiana Q Solar oferece uma gama de colectores solares térmicos, dos quais o modelo A3A é indicado para climas temperados ou frios. Este sistema (figura 1.6, [30]) é composto por um colector plano coberto, de materiais desconhecidos, de 3m^2 de área e uma pequena ventoinha de potência desconhecida, reclamando uma potência de aquecimento máxima de cerca de 700W. Esta potência máxima é a declarada pela própria empresa na página do produto sem providenciar detalhes, pelo que se vai tomar apenas como indicativa. Este colector custa cerca de €450 sem instalação nem portes de envio para Portugal, não sendo possível estimar o custo de operação por se desconhecer a potência da ventoinha.

Existem vários outros sistemas comerciais (por exemplo, o SolarsHeat 1500G da Your Solar Home), mas estes têm tendência para ser mais complexos. O modelo 1500G da YSH, por exemplo, já traz integrada a ventoinha, o sistema de controlo de temperatura e um painel fotovoltaico para alimentar as ventoinhas, bem como o Q Solar A1D. No entanto, não existe informação pública sobre o desempenho destes sistemas, pelo que se optou pelo sistema caseiro apresentado em seguida.

O sistema Solar Sponge foi desenvolvido por David L. Jones em 2005 ([31]) com um objectivo semelhante ao descrito neste trabalho. O sistema é constituído por uma placa absorvedora de alumínio de

Figura 1.6: Exemplo de instalação de um colector solar Q Solar A3A

1,6 m^2, pintada de preto e coberta por uma placa de 1 mm de policarbonato, que tem uma transmitância de cerca de 90%, e com uma caixa de ar de 25 mm de altura. A figura 1.7 mostra o caminho que o ar percorre dentro do colector e a figura 1.8 o colector montado na casa onde ia ser usado.

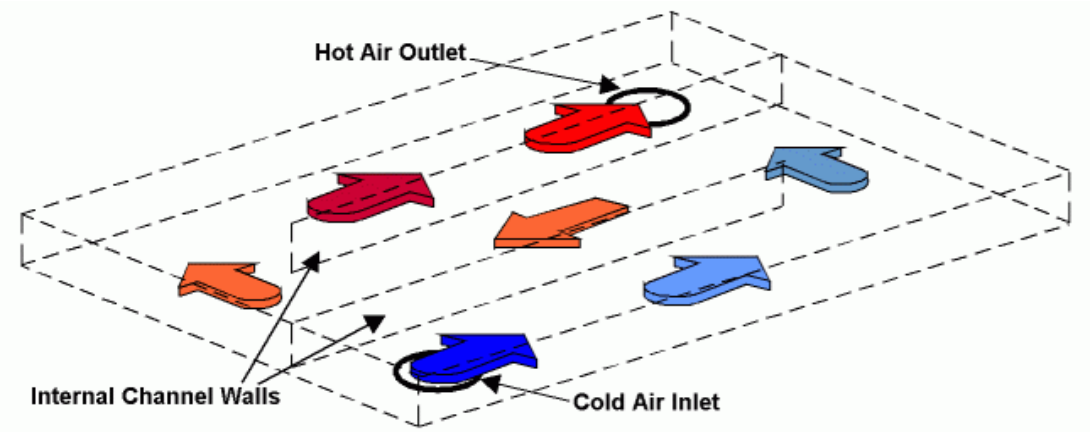


Figura 1.7: Diagrama do fluxo de ar no colector Solar Sponge

O ar quente gerado pelo colector é injectado para dentro de casa recorrendo a quatro ventoinhas de 120 mm, com um consumo combinado de cerca de 40W, assegurando um fluxo de cerca de 400 m^3 por hora em sistema aberto (o fluxo efectivo deverá ser bastante inferior). A figura 1.9 apresenta os resultados de um teste do Solar Sponge a 26 de Agosto – sensivelmente correspondente ao final de

Figura 1.8: Exemplo de instalação de um colector Solar Sponge em Sydney, Austrália

Fevereiro em Lisboa – mostrando uma potência de pico num dia limpo de Inverno de cerca de 500 W, e uma potência média de operação a rondar os 300 W.

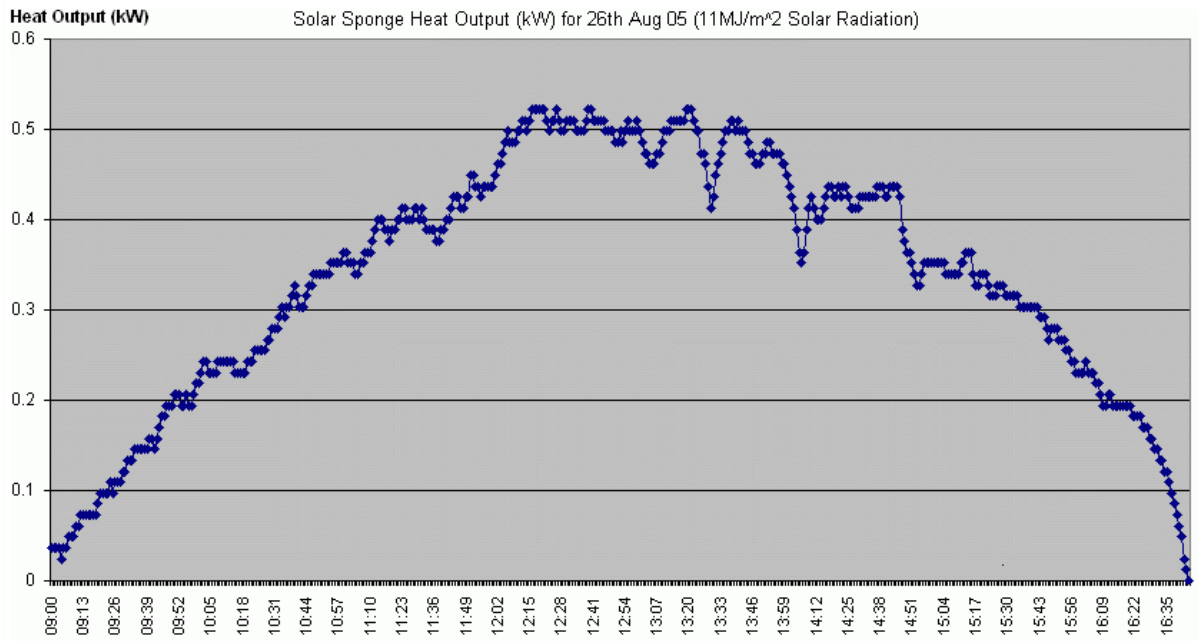


Figura 1.9: Evolução da potência calorífica do colector Solar Sponge a 26 de Agosto de 2005

O autor do colector reclama um ganho de temperatura na divisão que recebia o calor de 1 - 3 °C com base nos resultados apresentados na figura 1.10. Esta avaliação do colector peca por ter pouca estatística e por não se conhecer a precisão da medição efectuada, tomando-se estes resultados como

interessantes mas não definitivos. Finalmente, o Solar Sponge custou cerca de €500,60 a construir e instalar, apresentando um custo de operação médio de 0,6 cêntimos de euro por hora e 1,9 cêntimos por kWh de energia calorífica produzida com um custo de 0,1393 €/kWh (Site EDP, 2012, [3]) de electricidade. O custo de construção, no entanto, não contempla portes de envio; assume-se que a construção de um sistema semelhante em Portugal passaria pela aquisição local dos materiais necessários.

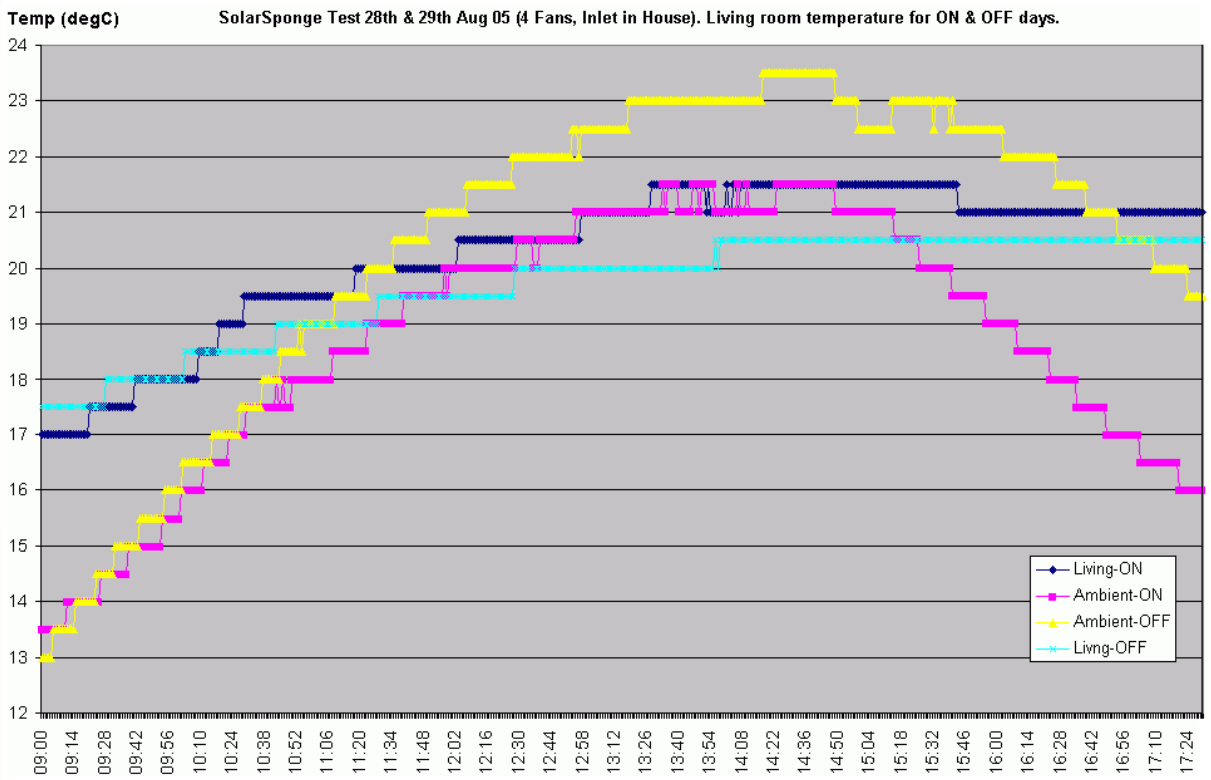


Figura 1.10: Evolução das temperaturas interior e exterior com e sem colector Solar Sponge em funcionamento

É necessário notar ainda que a utilização de uma cobertura de plástico (policarbonato), apesar de mais barata que o vidro, limita seriamente o tempo de vida útil do colector. Não conhecendo a composição específica da cobertura utilizada não é possível estimar o tempo que a mesma demorará até se degradar, mas será sempre inferior ao tempo de vida útil de uma cobertura de vidro.

1.4.2 Aquecedores clássicos

Aquecedor independente eléctrico

Para representar o elemento de aquecimento mais utilizado do país ([7]) escolheu-se um aquecedor Kunft NYL12 de 1200W ([12]), que funciona a óleo e se apresenta na figura 1.11. Com um custo unitário de €23, é uma unidade de baixo custo e bastante comum no mercado Português, pelo que se vai tomar como representativa deste tipo de equipamentos de aquecimento. Com uma potência de 1200W e um custo de 0,1393 €/kWh (Site EDP, 2012, [3]) de electricidade, uma hora de operação deste aquecedor

resultaria em 1,2 kWh de energia calorífica gerada – para este tipo de aquecedores pode-se considerar um rendimento de 100% – a um custo de 16,7 cêntimos de euro por hora de atuação ou 13,9 cêntimos por kWh de energia calorífica disponibilizada.

Figura 1.11: Radiador eléctrico independente de referência

Em termos comparativos, este tipo de aquecedor tem a vantagem de ser facilmente transportado para outra zona da casa conforme necessário, algo que um colector solar não poderia fazer. No entanto, é também uma fonte pontual, que depende das correntes de convecção do ar para espalhar o calor produzido pela casa; assim sendo, para se ter o mesmo efeito do sistema descrito neste trabalho, seria necessário ter pelo menos um aquecedor por divisão, aumentando os custos iniciais.

Aquecedor independente a gás

Nesta categoria escolheu-se um aquecedor Hotspot, da Galp, com uma potência entre 1,7 e 4 kW, que funciona a gás butano e custa €126 por unidade (figura 1.12, [13]). Uma garrafa Pluma, da própria Galp, custa cerca de €30 por 12 kg de gás; à potência mais baixa, de 1,7 kW, o consumo de gás é de 112 g / h, o que resulta num custo horário de 28,0 cêntimos e num custo de 16,5 cêntimos por kWh.

Este tipo de aquecedor sofre de limitações semelhantes às dos aquecedores eléctricos, ainda que tendo a capacidade de ser deslocado sem desligar. Adicionalmente, no entanto, apresenta também um problema de segurança potencialmente sério; a presença de uma garrafa cheia de gás junto de uma fonte de ignição é sempre arriscada. Para além disso, o custo por kWh de energia calorífica é cerca de 18% superior ao dos aquecedores eléctricos para uma potência apenas 0,5 kW superior, e o custo do aparelho é ainda mais pesado – mais de 5x mais caro.

Figura 1.12: Aquecedor a gás independente de referência

1.4.3 Sistemas de aquecimento centralizado

Painéis Solares Térmicos

A oferta de sistemas de aquecimento habitacional baseados em energia solar térmica resume-se a sistemas de piso radiante em que o colector solar aquece um reservatório de água que depois circula pelo piso da habitação a aquecer e liberta calor através do pavimento, não existindo neste momento no mercado sistemas que funcionem a ar ou que forneçam calor à casa de outra forma que não por piso radiante. Tipicamente estes sistemas vêm integrados com circuitos de aquecimento de águas sanitárias, permitindo um uso mais eficiente da energia solar colectada – sobretudo no Verão, altura em que o aquecimento da casa é desnecessário – e exigem outros equipamentos para funcionar. Numa configuração básica, estes sistemas precisam de um colector solar, um depósito de água termicamente isolado, uma rede de tubagens no piso das áreas a aquecer e uma bomba que faça circular a água pelo sistema todo.

A pesquisa bibliográfica produziu duas configurações possíveis para uma casa média em Portugal, considerando-se como tendo uma área pavimentada de $\approx$ 150 m^2 dos quais 50 m^2 seriam considerados para aquecimento por este sistema. A primeira configuração ([14]) aponta para $\approx$ 16 m^2 de colectores solares – em média, 8 painéis – e um depósito de água de 600 L. A segunda configuração ([9], [15]) sugere 10 m^2 de colectores – 5 painéis – e um depósito de água de 1000 L. Ambas as configurações utilizariam uma bomba de 400W de potência capaz de impôr um fluxo de 1-2 L / minuto e necessitariam de uma rede de tubagens adequada nas divisões a aquecer.

Os custos unitários considerados foram:

Os resultados dos cálculos para as duas configurações são apresentadas na tabela 1.5.

Componente	Custo unitário	Fonte
Colectores	€801,19 por painel	[16], custo médio por painel
Depósito 600L	€1.803,47	[17], [18], [19]
Depósito 1000L	€3.426,37	[17], [18], [19]
Bomba	€120,00	[20]
Obras	€80,00 por m^2	conversa pessoal com empreiteiro local

Tabela 1.4: Custos dos componentes de um sistema de piso radiante com energia solar térmica

Componente	Cenário 1	Cenário 2
Colectores	€6.409,54	€4.005,97
Depósito	€1.803,47	€3.426,37
Bomba	€120,00	€120,00
Obras	€4.000,00	€4.000,00
Total	€12.333,01	€11.552,34

Tabela 1.5: Configurações e custos possíveis para sistema de piso radiante com energia solar térmica

De acordo com [16], a potência média por painel no mercado português é de 1090,6 W (para uma potência incidente assumida de 1000 W m^{-2}, aplicável para um colector bem inclinado nas horas de maior insolação, e para painés com cerca de 2 m^2 de área), resultando numa potência total de 8,7 kW para o primeiro cenário e 5,5 kW para o segundo. Em ambos os casos, o custo de operação é dominado pela bomba, de 400 W. O custo horário de operação ([3]) é de 5,57 cêntimos e o custo por kWh de aquecimento produzido é de 0,64 - 1,01 cêntimos. Como esperado, o custo de operação é substancialmente mais baixo do que as alternativas eléctricas e a gás, mas o investimento inicial é avultado. Este tipo de solução faz sentido normalmente quando se constrói uma casa de raíz; nessas condições o custo de instalação das tubagens pode ser coberto pela construção normal do pavimento e o depósito e sistema de aquecimento podem substituir uma caldeira clássica.

Outras formas de aquecimento

Como visto na secção 1.2, existem outros dois combustíveis e dois tipos de equipamento com relevância em Portugal, respectivamente o aquecimento a lenha – utilizando lareiras, quer abertas quer com recuperador de calor – e o aquecimento a gasóleo. Em termos de equipamento, para além das lareiras, também é muito frequente o uso de caldeiras centrais. No âmbito deste trabalho não se irão considerar estes equipamentos devido à dificuldade de encontrar valores comparáveis; de acordo com [7], por exemplo, grande parte da lenha utilizada em Portugal é cortada pelo próprio utilizador, tornando um cálculo do seu custo muito difícil, e ainda que as caldeiras possam ser comparadas aos sistemas solares térmicos explorados na secção 1.4.3, a sua construção e funcionamento varia fortemente de modelo para modelo, pelo que também não é de forma alguma simples estimar um custo de operação.

Assim sendo serão apenas considerados sistemas dedicados de aquecimento de forma a garantir a comparibilidade dos dados.

Capítulo 2

Análise teórica

Os conceitos fundamentais a ter presentes no desenho, construção e análise do sistema de aquecimento apresentado neste trabalho dividem-se em dois grupos principais: os que dizem respeito ao conforto térmico do ser humano e os que descrevem o funcionamento do sistema desenhado. Ao longo deste capítulo serão analisados os conceitos básicos e as suas implicações, bem como as suas aplicações à análise do desempenho do sistema proposto.

2.1 Conforto humano e comportamento térmico de edifícios

O comportamento térmico de edifícios tem assumido, ao longo da história, um papel importantíssimo no conforto dos seus ocupantes. Ao longo dos últimos anos a crescente preocupação com a conservação do ambiente levou a uma atenção redobrada à eficiência térmica dos edifícios, culminando na elaboração do RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios ([4]) – em 1999 e na sua subsequente revisão em 2006 para o alinhar com as normas Europeias em vigor e dotá-lo de mecanismos de implementação mais adequados. Esta preocupação é bem vinda dado que em 2010, apesar do combustível mais utilizado em Portugal para aquecimento ser a lenha (e de grande parte desta ser recolhida pelo próprio utilizador a custo zero), o aquecimento doméstico era responsável por 21,5% da factura energética de uma família em Portugal (ICESD, 2010, [7]), sendo que apenas uma ínfima parte da energia consumida provinha de fontes renováveis. Esta falta de participação das energias renováveis nos sistemas de aquecimento em Portugal foi uma das motivações desta tese; iremos agora explorar alguns dos conceitos de térmica de edifícios que deveremos ter presentes na análise e qualificação do desempenho do sistema proposto.

2.1.1 Conforto térmico humano

O conforto térmico é um conceito que varia de indivíduo para indivíduo, e mesmo quando existem normas indicativas, estas ainda variam de região para região. O corpo humano possui um conjunto

de mecanismos de regulação térmica, aquecendo o corpo através da sua actividade metabólica e arrefecendo através do suor, controlando esse balanço através do hipotálamo. O nível de actividade metabólica depende fortemente do tipo de actividade física a ser executada; a tabela 2.1 contém alguns valores indicativos (ASHRAE, 1997, [23]).

Actividade	Potência dissipada (W m^{-2})
Dormir	40,7
Em Descanso	58,2
Andar	151,3
Escrever	64,0
Conduzir	69,8
Cozinhar	93,1 - 116,4
Dançar	139,7 - 256,1
Desporto	209,5 - 500,5

Tabela 2.1: Potências dissipadas pelo corpo humano para vários tipos de actividade

Quanto à temperatura de conforto em si, [23] fornece uma formulação para calcular uma temperatura de referência através de

$$T_r = \frac{\alpha_r \bar{T}_s + \alpha_c T_a}{\alpha_r + \alpha_c} \tag{2.1}$$

onde α_r = 4,9 W m^{-2°C é o coeficiente de radiação, α_c = 2,9 W $m^{-2\circ}$C é o coeficiente de conveção, T_a é a temperatura ambiente e $\bar{T}_s$ é a temperatura média radiante, calculada através de

$$\bar{T}_s^4 = \sum_{i=1}^{N} T_i^4 \cdot F_{P-i} \tag{2.2}$$

onde T_i é a temperatura da superfície i e F_{P-i} o factor de forma entre a pessoa e a superfície i. Estas temperaturas deverão ser corrigidas pela actividade metabólica e pelo isolamento térmico da roupa em uso, resultando numa expressão corrigida (Silva, 2010, [21]):

$$T_{rcorr} = T_r - (1 + clo) \cdot (met - 1,2) \tag{2.3}$$

onde clo mede a resistência térmica da roupa e met o nível de actividade metabólica.

Com base nestas equações, o RCCTE indica valores de referência de 20 °C no Inverno e 25 °C no Verão como sendo temperaturas de conforto. Estas temperaturas variam de pessoa para pessoa, como já notado, servindo apenas de referência para a avaliação de projectos de edifícios para certificação dentro do RCCTE.

2.1.2 Balanço térmico dos edifícios

De forma semelhante ao corpo humano, um edifício também está constantemente a trocar calor com o seu ambiente circundante, sendo crucial quantificar estas trocas para a avaliação da qualidade do isolamento térmico disponível. Tipicamente consideram-se quatro fontes de calor no cálculo do balanço térmico de um edifício:

- Ganhos por **condução** através da envolvente opaca, compondo tipicamente cerca de 80% do total;
- Ganhos **solares** através dos envidraçados;
- Ganhos por **renovação** do ar;
- Ganhos **internos** ou de utilização, fruto da ocupação humana.

Em termos físicos, o calor transfere-se através das paredes da casa por três mecanismos de transferência de calor: por condução, convecção e radiação.

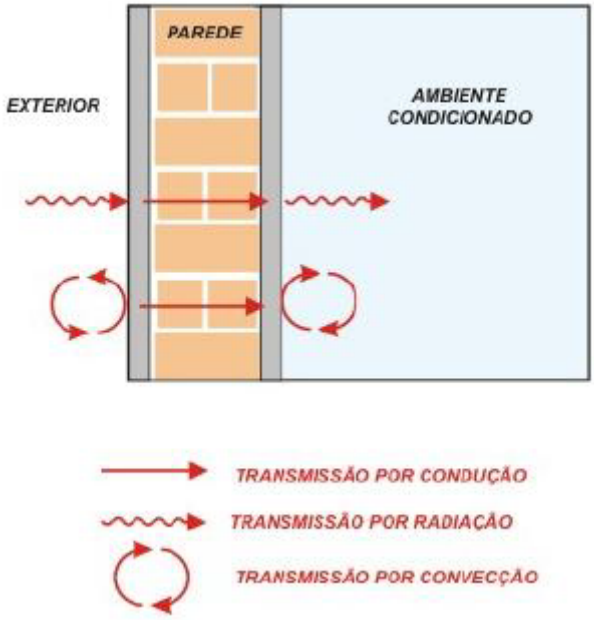


Figura 2.1: Diagramas dos mecanismos de transferência de calor

Condução

A transferência por condução dá-se sempre que exista uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior da casa, constituindo o processo de transmissão de calor mais significativo no balanço energético de edifícios (Barros, 2009, [22]). O fluxo de calor por condução processa-se através da

envolvente exterior da casa e depende da condutividade térmica dos materiais, da espessura da parede e do diferencial de temperatura entre o interior e o exterior, sendo dado pela equação de Fourier:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -k \oint_S \vec{\nabla} T \cdot \overrightarrow{dA} \tag{2.4}$$

onde Q é o calor transmitido, t é o tempo, k a condutividade do material e A a área da parede (ou outro elemento da envolvente) a considerar. Para casos de edifícios esta equação pode ser simplificada para

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -U A \Delta T \tag{2.5}$$

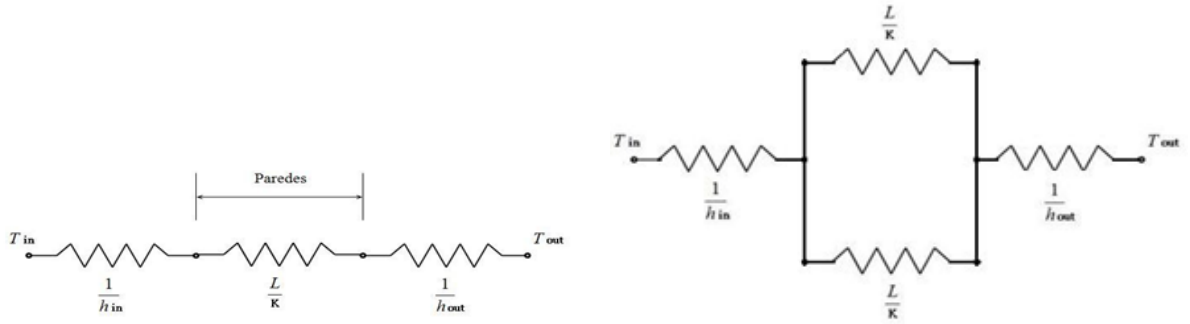
onde U é o coeficiente global de transmissão de calor, um dos parâmetros mais importantes no RCCTE ([4]) e que é definido como o inverso da resistência térmica de um dado elemento da envolvente, ou seja,

$$R_{cond} = \frac{L}{k} \tag{2.6}$$

$$U = \frac{1}{R_{cond}} \tag{2.7}$$

sendo A a área da parede, ΔT a diferença de temperaturas entre o interior e o exterior da casa e L a espessura da casa. A transferência de calor dá-se sempre da temperatura mais alta para a mais baixa.

Em termos reais, uma parede raramente é composta de apenas um material – tipicamente são várias camadas de tijolo, reboco, isolante e uma caixa de ar. Para o cálculo do valor de U numa parede dessas faz-se uma analogia simples com um conjunto de resistências em série, onde tipicamente também se incluem os efeitos da convecção à superfície das paredes (figura 2.2(a)). Para além disso, quando existem diferentes superfícies numa mesma parede – por exemplo quando existe uma janela, ou uma porta – faz-se a analogia com resistências em paralelo, como apresentado na figura 2.2(b).



(a) Configuração de camadas sobrepostas – analogia de resistências em série

(b) Configuração de elementos adjacentes na parede – analogia de resistências em paralelo

Figura 2.2: Representação esquemática da condução térmica em série e em paralelo

Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre quando existe um fluído – neste caso o ar – em movimento na vizinhança de uma superfície sólida, neste caso a parede da casa, e o fluxo de calor assim gerado é tanto maior quanto maior for a velocidade de escoamento do fluído. Caso o regime de escoamento seja imposto através de meios externos o fluxo de calor designa-se convecção forçada, sendo chamado de livre se for devido a gradientes de temperatura ou densidade.

O coeficiente de transmissão de calor por convecção, h, depende principalmente de quatro parâmetros: a geometria da superficie, o tipo de escoamento do fluído, as propriedades físicas do fuído (e.g., ρ, C_p, k) e finalmente da diferença de temperatura entre a parede e o fluído. O fluxo de calor por convecção é definido pela lei de arrefecimento de Newton:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = hA(T_S - T_\infty)) = -hA\Delta T(t) \tag{2.8}$$

onde T_S é a temperatura da superfície, T_∞ é a do fluído em regime livre e h é o coeficiente de transmissão de calor por convecção. A resistência de convecção é dada por $R_{conv} = \frac{1}{h}$ em m^2 °C W^{-1}.

Radiação

A transferência de energia por radiação ocorre apenas através de vácuo ou de um meio transparente – por exemplo, janelas. A energia emitida por um dado corpo é definida por

$$E_b = \epsilon\sigma T_s^4 \tag{2.9}$$

onde ϵ é o coefficiente de emissividade do corpo e σ a constante de Stefan-Boltzmann. O fluxo de calor por unidade de tempo pode-se então calcular através de

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz})^4 \tag{2.10}$$

onde T_{viz} é a temperatura da vizinhança da superficie radiante.

2.1.3 Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE)

Em Portugal, os valores de necessidades térmicas, seja de aquecimento ou arrefecimento, estão definidos no RCCTE ([4]), prevendo o regulamento uma fórmula de cálculo de referência – os chamados valores limite das necessidades de aquecimento – que dependem do factor de forma da casa e do número de graus-dia de aquecimento, sendo dados por (em kWh / m^2 ano):

$$N_{ic} = \begin{cases} 4,5 + 0,0395GD & \text{para FF } \leq 0,5 \\ 4,5 + (0,021 + 0,037FF)GD & \text{para } 0,5 < \text{ FF } \leq 1 \\ (4,5 + (0,021 + 0,037FF)GD) \times (1,2 - 0,2FF) & \text{para } 1 < \text{ FF } \leq 1,5 \\ 4,05 + 0,06885GD & \text{para FF } > 1,5 \end{cases} \tag{2.11}$$

onde GD é o número de graus-dia tabelado em [4] e FF é o factor de forma que relaciona o volume da casa com a área de pavimento dado por

$$FF = \frac{A_{env} + \sum^{i}(\tau A_{pis})_i}{V} \tag{2.12}$$

$$\tau = \frac{T_i - T_a}{T_i - T_e} \tag{2.13}$$

em que T_i é a temperatura interior alvo, T_a a temperatura dos espaços interiores não aquecidos, T_e a temperatura exterior, A_{env} é a área da envolvente exterior, A_{pis} é a área do piso da casa e V é o volume da casa.

Este valor de N_{ic} deverá ser multiplicado pela área das divisões de casa a aquecer, considerando-se a restante área útil da casa como espaços interiores não aquecidos.

2.2 Irradiação solar

Em termos fisicos, o Sol comporta-se como um corpo negro a 5777 K em termos de potência radiada e um outro a 6300 K em termos do comprimento de onda onde esse pico se encontra. A actividade solar resulta num fluxo de energia em direcção aos planetas do sistema solar; no caso da Terra, definiu-se uma constante solar I_{SC} = 1367 W m^{-2}, que representa a radiação solar total incidente numa placa perpendicular aos raios do Sol fora da atmosfera terrestre e à distância média entre o Sol e a Terra. A excentricidade da órbita terrestre leva a uma oscilação de $\pm$ 3%, resultando na seguinte expressão para o cálculo da potência solar incidente:

$$I_{ON} = I_{SC}\left(1 + 0,033cos\frac{2\pi n}{365,25}\right) \tag{2.14}$$

onde n é o dia do ano contado a partir de 1 de Janeiro.

Do ponto de vista da Terra, no entanto, esta potência não incide sempre da mesma forma ao longo do dia, devido ao movimento aparente do Sol no céu. Para se lidar com isso, nas próximas secções serão introduzidos alguns conceitos geométricos para descrever o movimento do Sol no firmamento e para calcular a potência incidente de forma adequada.

2.2.1 Geometria solar - ângulos e definições

O primeiro conceito a introduzir é o de hora solar. Define-se o meio dia solar como o momento em que o Sol atravessa o meridiano do observador; no caso de Portugal, isso implica o Sol passar directamente a sul do observador. Este meio dia solar não alinha com o meio dia civil; a expressão para converter hora solar em hora civil (e vice versa) é a seguinte (Duffie e Beckman, 1980, [6]):

$$T_{Solar} - T_{Civil} = 4(L_{St} - L_{Loc}) + E \tag{2.15}$$

onde L_{St} é a longitude do meridiano de referência do tempo civil, L_{Loc} é a longitude local e

$$\begin{aligned} E &= 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B) \\ B &= (n-1)\frac{2\pi}{365,25} \end{aligned}$$

Em seguida, é necessário definir o conjunto de ângulos que serão utilizados para descrever a incidência do Sol no sistema proposto:

- l **Latitude**: o deslocamento angular à superfície da Terra em relação ao equador, para Norte ou para Sul;
- d **Declinação solar**: a posição angular do Sol ao meio dia solar em relação ao plano do equador (-23,45° $\leq \delta \leq$ 23,45°);
- β **Altitude solar**: o ângulo entre a horizontal e a linha do Sol, ou a altura angular do Sol no céu;
- ψ **Zénite**: o ângulo entre a vertical e a linha do Sol, igual ao ângulo de incidência do Sol numa placa horizontal;
- γ **Azimute solar**: a deslocação angular em relação a Sul da projecção da linha do Sol no plano horizontal;
- h **Ângulo horário solar**: o deslocamento angular do Sol para Este ou Oeste do meridiano local devido à rotação da Terra no seu eixo ($\approx$ 15° por hora, negativo de manhã, positivo à tarde);
- Σ **Inclinação da superfície**: o ângulo do colector com o plano horizontal;
- α **Azimute da superfície**: desvio angular entre a normal da superfície projectada no plano horizontal e o Sul;
- θ **Ângulo de incidência**: o ângulo entre a linha do Sol e a normal da superfície do colector.

Graficamente, estes ângulos estão representados nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

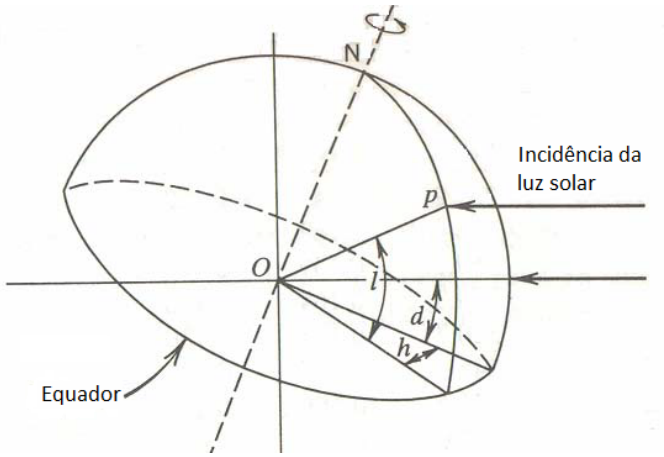


Figura 2.3: Definição de latitude, declinação e ângulo horário solar

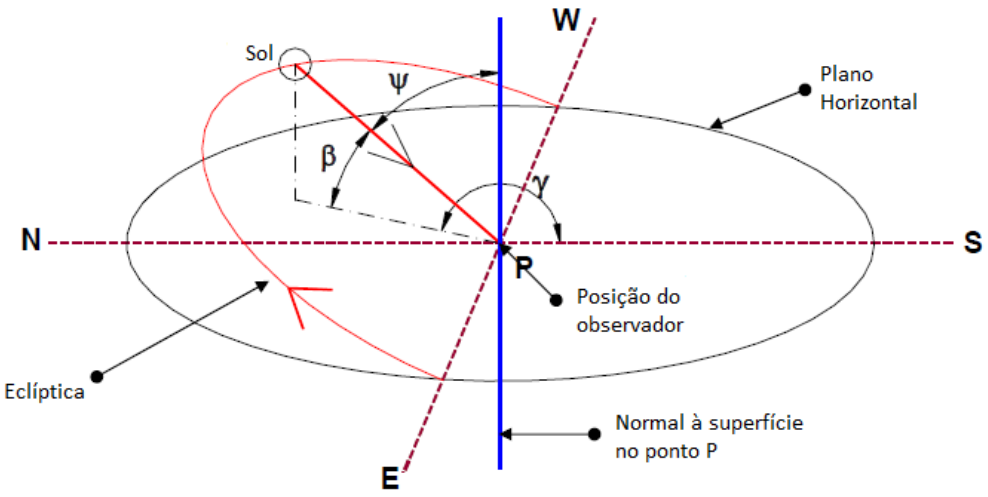


Figura 2.4: Definição de altitude solar, zénite e azimute solar

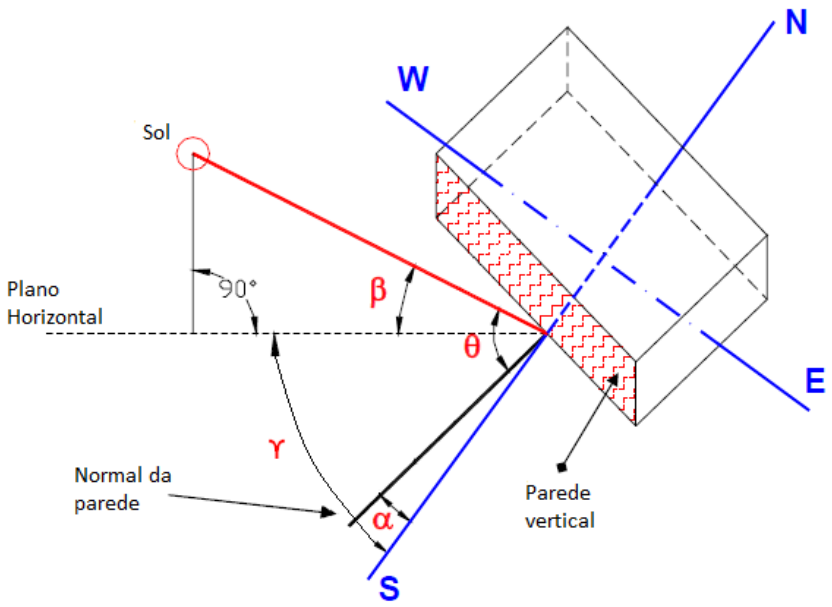


Figura 2.5: Definição de azimute de superfície e ângulo de incidência

2.2.2 Potência solar incidente

Para calcular a potência total solar incidente é preciso ter em conta três componentes:

- Radiação **directa** solar, I_{DN};

- Radiação **difusa**, I_d;

- Radiação **reflectida**, I_r.

O método escolhido para calcular estas potências foi o método ASHRAE *Clear Sky Model* ([23]), onde a potência total I_T e as suas três componentes são calculadas através de:

$$I_T = I_{DN} \cdot \cos\theta + I_d + I_r \tag{2.16}$$

$$I_{DN} = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{\sin\beta}\right) \tag{2.17}$$

$$I_d = C \cdot I_{DN} \cdot F_{ws} \tag{2.18}$$

$$I_r = (I_{DN} + I_d) \cdot \rho \cdot F_{wg} \tag{2.19}$$

$$F_{ws} = \frac{1 + \cos\Sigma}{2} \tag{2.20}$$

$$F_{wg} = \frac{1 - \cos\Sigma}{2} \tag{2.21}$$

onde θ é o ângulo de incidência dos raios solares com a normal do painel, A, B e C são parâmetros numéricos do modelo ASHRAE (tabela 2.2, Wong e Chow, 2001 [1]), ρ é a reflectividade do chão em frente ao colector, F_{ws} e F_{wg} são parâmetros geométricos relacionados com a inclinação do colector e Σ é o ângulo do colector com a superfície da Terra, ou seja, um colector horizontal teria $\Sigma = 0^\circ$ e um vertical $\Sigma = 90^\circ$.

Data	A [W m^{-2}]	B [W m^{-2}]	C [W m^{-2}]
21 Jan	1230	0,142	0,058
21 Fev	1215	0,144	0,060
21 Mar	1186	0,156	0,071
21 Abr	1136	0,180	0,097
21 Mai	1104	0,196	0,121
21 Jun	1088	0,205	0,134
21 Jul	1085	0,207	0,136
21 Ago	1107	0,201	0,122
21 Set	1152	0,177	0,092
21 Out	1193	0,160	0,073
21 Nov	1221	0,149	0,063
21 Dez	1234	0,142	0,057

Tabela 2.2: Parâmetros numéricos do modelo ASHRAE *Clear Sky Model*

Tendo-se uma expressão para o cálculo da potência incidente, em W m^{-2}, a energia total incidente num dia por m^2 é dada por

$$H_0 = \int_{-h_s}^{h_s} I_T dh \tag{2.22}$$

onde -h_s e h_s são respectivamente a hora de nascer e pôr do Sol. Esta será a base de cálculo utilizada para a análise experimental dos dados obtidos no capítulo 4.

Considerações climatéricas

Os cálculos feitos na secção 2.2 até agora assumiram sempre que a radiação solar atravessa a atmosfera terrestre sem obstruções. Esta aproximação é conveniente mas, como é óbvio, não é completamente correcta, sendo a radiação real à superfície da Terra diminuída por um conjunto de factores (e.g., nuvens e poluição atmosférica). Define-se então um índice de transparência da atmosfera $\bar{K}_h$ como a média mensal da razão entre a radiação experimentalmente medida à superfície da Terra, no plano horizontal, e a radiação total incidente, calculada a partir das relações definidas na secção 2.2.2. Este índice é utilizado para determinar a energia média incidente num dado ponto da Terra, sendo sobretudo útil para dimensionar sistemas que terão de funcionar ao longo do ano sob diversas condições atmosféricas. Na zona de Lisboa este índice tem um valor médio anual de 0,65, implicando que em média mais de um terço da radiação solar em Lisboa é perdida ao atravessar a atmosfera. Vai-se tomar este valor como válido para a zona de Sesimbra devido à falta de dados históricos específicos desse concelho.

2.3 Potência e rendimento de colectores solares

A potência injectada (P_H) pelo colector é calculada através de

$$P_H = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \tag{2.23}$$

onde $\dot{m}$ é o fluxo de ar, c_p é o calor específico do ar a pressão constante e T_{out} e T_{in} são as temperaturas respectivamente à saída do colector e no interior da casa. Num sistema solar térmico normal, em que o fluído de trabalho está constantemente a absorver calor da placa de absorção e a armazenar esse calor num reservatório, pode-se considerar que a parte da potência incidente que é absorvida pela placa é toda transmitida ao fluído e, então, o rendimento instantâneo do colector é dado por

$$\eta = \frac{P_H}{I_T} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{A I_{col}} \tag{2.24}$$

onde A é a área do colector e I_{col} é a potência incidente do colector. Para estes colectores, calculam-se ainda coeficientes F' η_0, que representa a eficiência óptica do colector, e F' U, ou coeficiente de perdas térmicas do colector, tipicamente medidos experimentalmente, e que são utilizados para comparar colectores entre si.

No caso de colectores a ar, no entanto, este tipo de cálculo não faz sentido, porque o colector pode estar a injectar calor para dentro de casa após o Sol se pôr devido à inércia térmica da superficie de absorção, o que nessa expressão daria um rendimento $\eta \to \infty$. Este comportamento é desejável neste colector – corresponde a uma reserva de calor que é injectada durante a noite para dentro de casa, altura em que o interior da casa está mais frio – mas que é bastante diferente do comportamento de um colector solar térmico a água com reservatório de calor, que procura transmitir toda a energia solar que recebe ao fluído que circula no seu interior o mais depressa possível. Para resolver isto, seria necessário determinar o atraso médio entre a absorção de uma dada quantidade de energia e a sua introdução dentro de casa, o que não é trivial devido aos múltiplos factores que influenciam o próprio funcionamento do colector (começando pela temperatura interior da casa) e a influência da temperatura exterior sobre a temperatura do ar dentro do próprio colector.

Assim sendo, torna-se mais correcto e útil avaliar o desempenho do colector em termos do seu *Coefficient of Performance*, ou COP. Este índice é tipicamente utilizado para comparar a eficiência de bombas de calor, especialmente em sistemas de climatização – quer para aquecimento como para arrefecimento – sendo dado por:

$$COP = \frac{P_H + P_V}{P_V} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) + P_V}{P_V} \tag{2.25}$$

onde P_H é a potência de aquecimento injectada pelo colector para dentro de casa como calculada acima e P_V é a potência eléctrica consumida pelo colector quando em funcionamento. Esta potência é incluída no numerador do COP porque contribui para o aquecimento da casa, quer por via das perdas que existam no sistema – que são todas térmicas e interiores à casa – quer pela energia cinética fornecida ao ar injectado na casa, que pela experiência de Joule sabemos que se converte em energia térmica uma vez que o fluxo de ar se disperse dentro de casa. Este índice permite aferir melhor a eficiência do colector do ponto de vista do utilizador final e permite ainda comparar o sistema descrito com outros equipamentos de climatização por ar condicionado, pelo que será utilizado no capítulo 4 para o cálculo do rendimento do colector.

Também serão calculados os parâmetros F' η_0 e F' U , de forma a se ter um termo de comparação com os colectores solares térmicos a água, apesar das diferenças de funcionamento. Para determinar

estes parâmetros torna-se necessário definir F', η_0 e F'U:

$$F'_{fluido} = \frac{R_{pa}}{R_{pa}+R_{pf}} \approx 1 \quad (2.26)$$

$$F'_{ar} = \frac{R_{pa}}{R_{pa}+R_{pa}} = 0,5 \quad (2.27)$$

$$\eta_0 = \tau\alpha \quad (2.28)$$

onde τ é a transmitância do vidro utilizado no colector e α é a absorptância da placa do colector, e

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{out}-T_{in})}{AI_{col}} \quad (2.29)$$

$$= F'\eta_0 - F'U(T_{col})\frac{\Delta T}{I_{col}} \Leftrightarrow \quad (2.30)$$

$$F'U(T_{col}) = -\frac{I_{col}}{\Delta T}\left(\frac{\dot{m}c_p(T_{out}-T_{in})}{AI_{col}} - F'\eta_0\right) \quad (2.31)$$

onde $\Delta T = \frac{T_{in}+Tout}{2} - T_{amb}$ representa a diferença entre a temperatura média do fluído no colector e a temperatura ambiente ([6]). A equação 2.31 será utilizada para estimar um valor médio de F'U apenas, e não será contemplada a sua dependência com a temperatura do colector.

Capítulo 3

Desenho e Construção do Colector Solar

3.1 Localização da casa e implicações para o colector

Nesta secção será descrito o processo de desenho e construção do colector solar, cujo resultado final se apresenta na figura 3.1.

Figura 3.1: Parede sul da casa com colector solar finalizado e em funcionamento

A casa utilizada para a instalação encontra-se nos arredores de Sesimbra, perto da costa Atlântica, a

38,442278 °N, 9,149082 °W. É uma pequena moradia de paredes brancas e telhado de telha, ladeada a Norte e a Sul por outras moradias semelhantes, a Nascente por uma estrada e um descampado, e a Poente outro descampado. A moradia a Sul não chega a fazer sombra para a casa, dado que está directamente a Sul a cerca de 12 metros de distância e os lados Nascente e Poente não estão obstruídos. A figura 3.2 mostra a casa vista através do *Google Earth*.

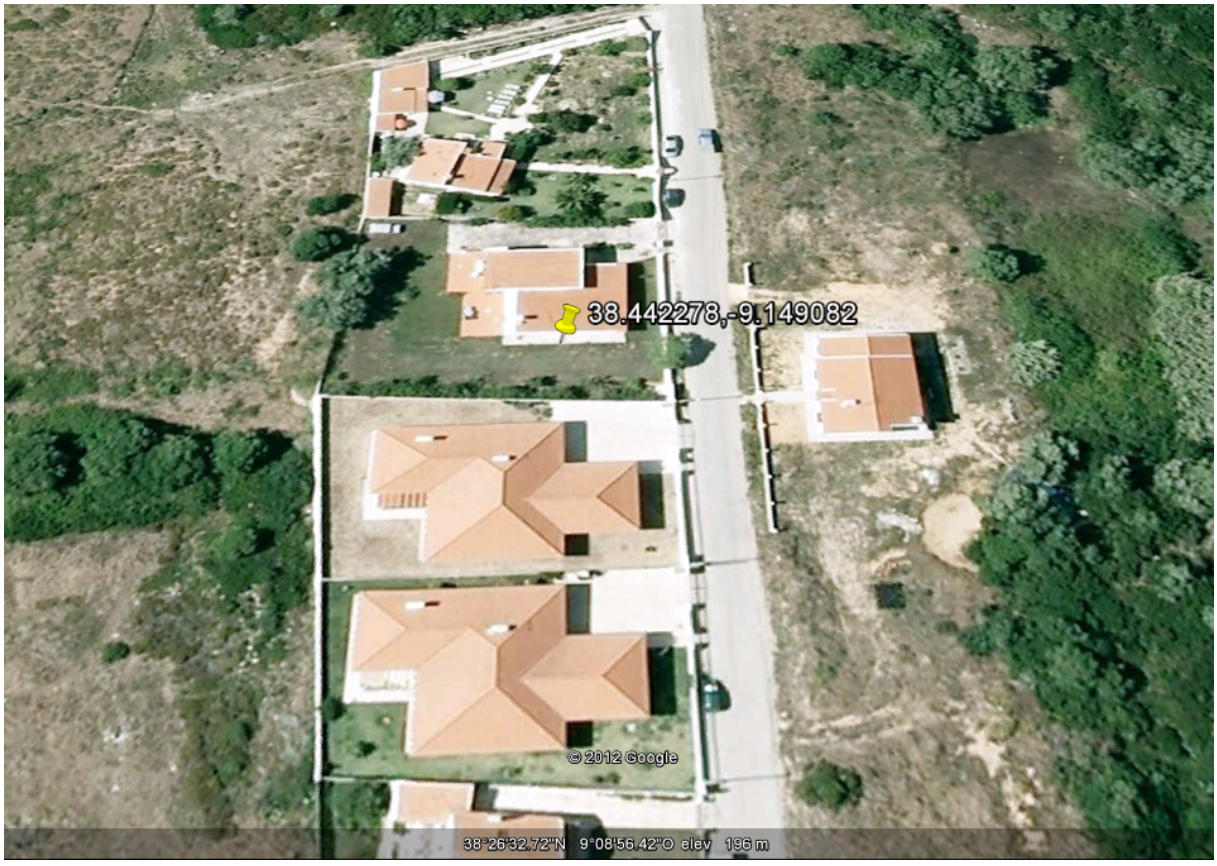


Figura 3.2: Localização da casa e zona circundante – demonstração de inexistência de obstáculos à incidência do Sol no colector

Esta casa foi escolhida pela facilidade de acesso, construção e acompanhamento do desempenho do colector. Para além disto, como mencionado na secção 1.1, o proprietário da casa sofria de graves problemas de conforto térmico, o que permitiria avaliar melhor o impacto real do colector sobre os ocupantes da casa. Para além disso, a casa foi construída com paredes duplas em tijolo (11cm) e reboco, com uma caixa de ar de 7cm, com uma espessura total de 30cm, e com um isolamento térmico (Roofmate) de 4cm na caixa de ar, o que faz da casa um candidato ideal para um projecto desta natureza.

Avaliou-se ainda um outro local para instalação do colector, na Curia, no concelho da Anadia. Esta outra casa era também uma moradia com graves problemas de conforto térmico, sobretudo no Inverno; no entanto, o facto de estar rodeada de outras construções a curtas distâncias e de a parede não ser

termicamente isolada levou a que se preterisse essa casa em favor da moradia em Sesimbra.

3.1.1 Localização e orientação do colector

Tendo-se escolhido o local para o projecto, torna-se importante decidir a orientação que se quer dar ao colector. Dada a amplitude da variação da altitude solar ao longo do ano explorada na secção 2.2, a orientação do colector reveste-se de enorme importância para a optimização da energia colectada. No entanto, um sistema de *tracking* de dois eixos - que permitiria ajustar a orientação do colector para minimizar o ângulo de incidência em cada momento - introduziria uma complexidade e um custo acrescido ao colector a ser desenhado que não estariam de acordo com os objectivos do projecto. Assim sendo, tomou-se a decisão de construir um colector fixo orientado a Sul e, de forma a explorar melhor a inclinação do colector em relação ao plano horizontal, calculou-se a variação da energia diária colectada ao longo do ano para um colector fixo com três inclinações diferentes:

- **Vertical**: inclinação de 90°, por exemplo um colector solar montado numa parede de uma casa;
- **Horizontal**: inclinação de 0°, representando o caso simples de um colector à superfície da Terra;
- **Inclinado**: inclinação de 45°, simulando um telhado[1].

O cálculo foi feito recorrendo ao modelo ASHRAE *Clear Sky Model*, apresentado na secção 2.2.2 tendo-se obtido a figura 3.3. Este modelo assume que o dia está sempre limpo, não levando em conta nebulosidade nem outras perturbações climatéricas; no entanto, estas afectariam o colector da mesma forma independentemente da sua orientação, pelo que se podem ignorar para efeitos desta discussão. Para além disso, este modelo sub-estima a radiação incidente face aos dados experimentais (Duffie e Beckman, 1980, [6]), mas o erro não é substancial, pelo que será utilizado ao longo deste trabalho.

Os resultados desta simulação demonstram que a orientação mais eficiente para o objectivo declarado é na vertical, dado que nos meses de Inverno - onde queremos maximizar o aquecimento da casa - a potência incidente é superior num painel vertical face a um horizontal, ao passo que no Verão, onde não se quer aquecer a casa, o painel vertical tem uma potência incidente inferior às outras duas inclinações. A isto ainda há que adicionar a reflexão do vidro do painel; entre os meses de Maio e Agosto, a elevação aparente do Sol no céu excede os 70° ao meio dia solar com frequência, ângulos a partir dos quais a transmissividade do vidro cai fortemente (Furler 1991, [2]), cortando ainda mais a potência incidente no colector.

[1] A inclinação real de um telhado depende fortemente do clima local, da zona circundante e dos materiais disponíveis; neste momento esta inclinação serve apenas para termo de comparação para guiar o desenho.

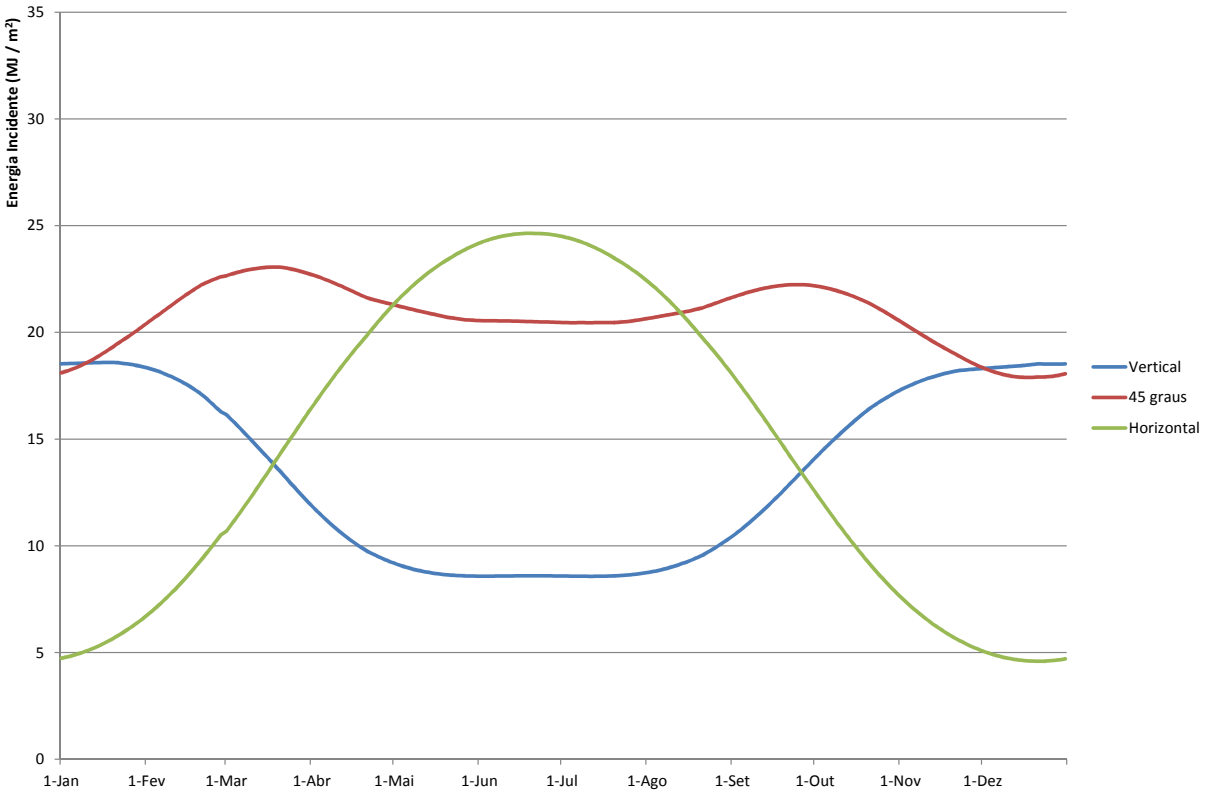


Figura 3.3: Energia incidente ao longo do ano para inclinações de 0°, 45° e 90° (modelo ASHRAE)

Convém ainda assinalar a curva dos 45° de inclinação, que na Primavera e no Outono se revela a mais eficiente das três orientações testadas. Infelizmente, durante o Verão apresenta um desempenho demasiado eficaz, correndo-se o risco de aquecer a casa inadvertidamente, e no pico do Inverno é menos eficaz do que o painel vertical. Para além disto, a casa onde será instalado o painel não dispõe de nenhuma superficie a 45°, o que encareceria a instalação, pelo que não é a melhor opção para o nosso propósito. Este cenário é facilmente verificado também na maioria dos prédios de habitação urbanos, que apresentam uma larga oferta de superfícies verticais mas poucas inclinadas; para propósitos de aquecimento, então, a orientação vertical é claramente a opção mais indicada.

De forma a confirmar esta simulação obtiveram-se dados de irradiação solar fornecidos pelo LNEG, onde a medição da radiação incidente já inclui os efeitos de nebulosidade (e outros efeitos climatéricos) na potência incidente, apresentando-se na figura 3.4. Note-se que o LNEG apenas tem dados disponíveis para a orientação vertical e horizontal, o que é suficiente para validar a simulação e, como tal, para justificar a opção pela superfície vertical.

Como já mencionado ([6]) verifica-se que o modelo utilizado subestima a radiação incidente: a potência máxima estimada para a superfície vertical pelo modelo ASHRAE é cerca de 12% inferior ao máximo medido pelo LNEG. No entanto, a decisão de colocar o colector numa superfície vertical verifica-se correcta, dado que o objectivo deste colector será aquecer uma casa e que esta necessidade

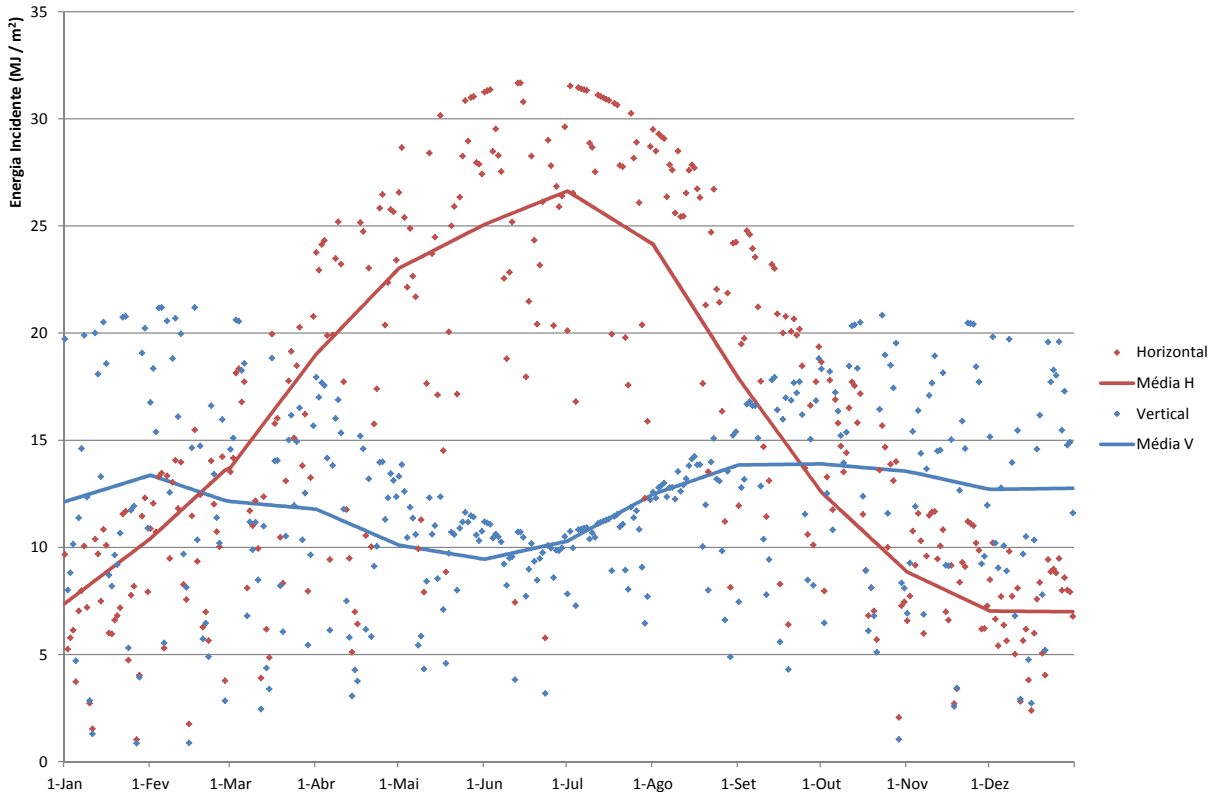


Figura 3.4: Energia incidente ao longo do ano para para inclinações de 0° e 90° com média diária para cada mês (dados LNEG)

de aquecimento assume especial importância no Inverno.

Para a instalação do colector aproveitou-se a existência de uma parede termicamente bem isolada, voltada a Sul e sem obstruções significativas à frente. A figura 3.5 mostra a alçada sul da casa, onde o painel será instalado; a área por cima da janela do lado esquerdo oferece cerca de 14 m^2 de área livre facilmente acessível onde instalar todo o sistema, facilitando ainda o acesso às divisões a aquecer dentro da casa dado que é a parede de um dos quartos e os restantes estão imediatamente por detrás deste (figura 3.6).

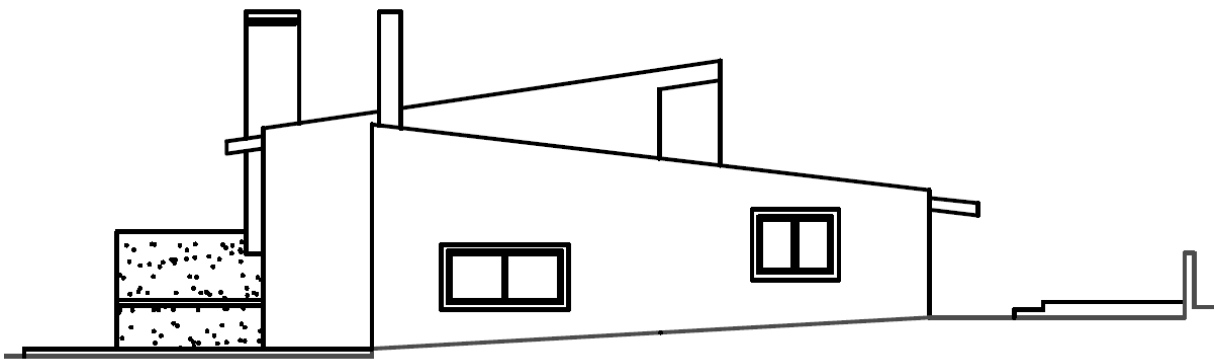


Figura 3.5: Alçada Sul da casa

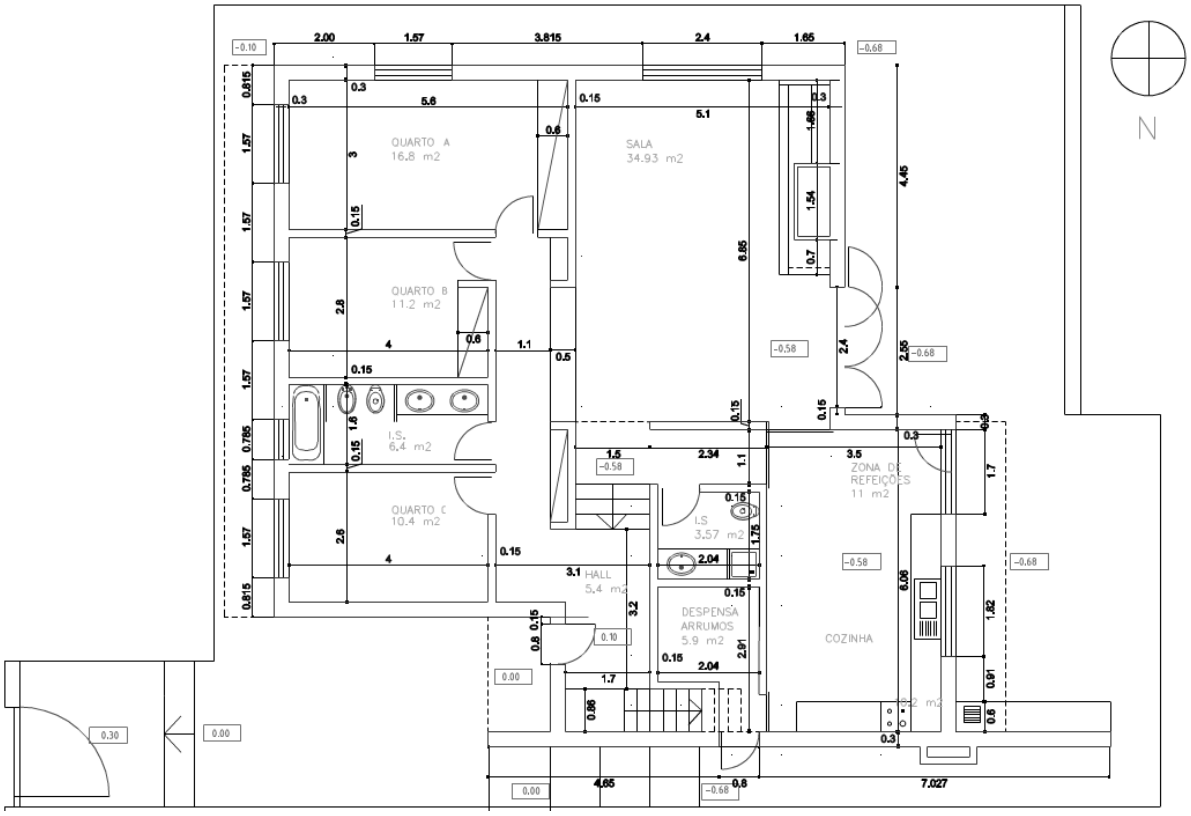


Figura 3.6: Planta do piso térreo da casa. As zonas a aquecer são os quartos A, B e C e as instalações sanitárias adjacentes (área total de 44,8 m^2)

3.1.2 Necessidades térmicas da casa

Como explorado na secção 2.1.3, de acordo com o RCCTE ([4]), os valores limite das necessidades de aquecimento dependem do factor de forma da casa e do número de graus-dia de aquecimento de acordo com a equação 2.11. Para a casa utilizada neste trabalho, os parâmetros a considerar terão os valores apresentados na tabela 3.1.

Parâmtero	Valor	
$A_{envolvente}$	338,8	m^2
A_{piso}	186,7	m^2
V	518,2	m^3
T_i	21,0	°C
T_a	16,0	°C
T_{amb}	10,9	°C
GD (Sesimbra)	1190	°C dia
τ	0,50	
FF	0,83	m^{-1}

Tabela 3.1: Valores de referência da casa – dimensões, temperaturas alvo e parâmetros do RCCTE

Note-se que o valor utilizado para T_i é um grau acima da temperatura de referência do RCCTE (o regulamento define a temperatura de aquecimento no Inverno como 20 °C e de arrefecimento no

Verão como 25 °C), e que para T_{amb} se considerou a temperatura média dos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (de acordo com o Instituto de Metereologia, [5]) de forma a minorar este parâmetro e assim garantir que o colector é dimensionado para a pior altura do Inverno. Quanto a T_a, o cálculo preciso desse parâmetro é uma tarefa de enorme complexidade que o próprio RCCTE recomenda não fazer e usar em vez disso uma temperatura estimada entre a interna e a externa. Estimou-se esse parâmetro através da média destas duas temperaturas, resultando num valor de 16 °C; felizmente, essa temperatura está em linha com a experiência do dono da casa para os espaços não aquecidos, pelo que se aceita a estimativa como adequada.

Para o factor de forma determinado para a casa, $N_{ic} = 4,5 + (0,021 + 0,037FF)GD = 66,2$ kWh m^{-2} por ano. A área que se deseja aquecer é a dos quartos e da casa de banho junto aos quartos, com uma área total de 44,8 m^2, o que implica uma necessidade de 2966 kWh anuais de aquecimento, valor que terá de ser verificado experimentalmente.

3.2 Construção do colector

Tomada a decisão de construir o colector na vertical e orientado a sul avaliou-se o espaço disponível na parede sul da casa (figura 3.5) para comportar o colector. Deixando uma certa margem em torno do colector (por razões estéticas e aquitectónicas) foi delineada uma área da parede com cerca de 12 m^2, com a forma de um trapézio de bases de 2,2 m e 1,1 m e altura 7,3 m de acordo com a figura 3.7. Em seguida serão discutidos os materiais utilizados e a configuração do colector.

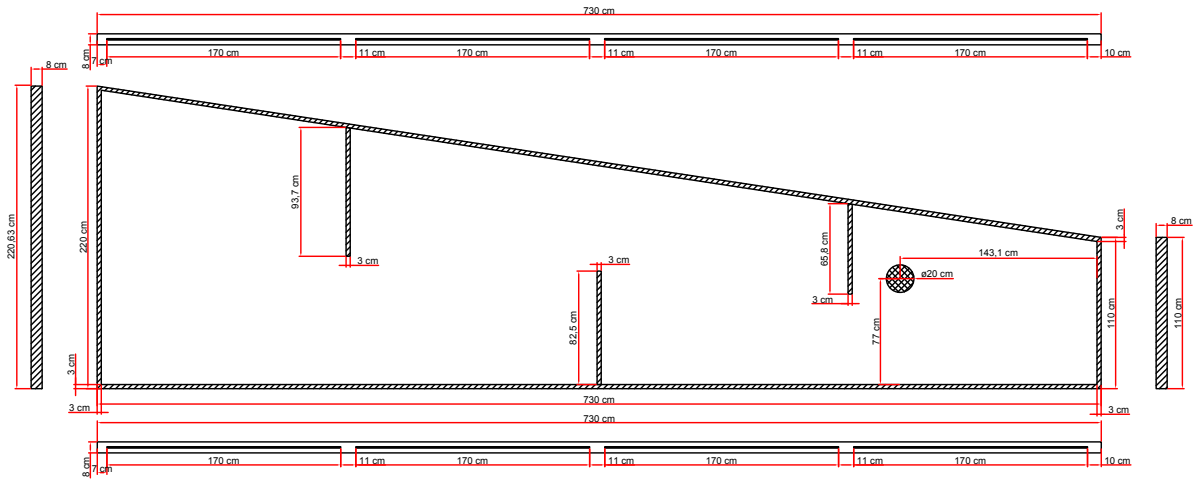


Figura 3.7: Desenho técnico do colector; visões frontal e laterais

3.2.1 Superficie de absorção, caixa de ar e ventilação

Tipicamente um colector solar plano seria construído sobre uma placa termicamente isolada com grande capacidade de absorção - cobre, alumínio, aço temperado - coberta de um revestimento selectivo com vista a maximizar a absorção de energia solar. No entanto, dado o objectivo declarado de minimizar os custos do colector, foi tomada a decisão de usar a própria parede da casa como placa de absorção. Esta decisão tem impactos significativos no desempenho do colector, resultando numa absortância mais baixa, num maior coeficiente de perdas e no risco de transmissão de calor através da parede no pico do Verão, o que seria contrário ao objectivo de aquecer apenas no Inverno. Estes impactos deverão ser medidos no capítulo 4, em paralelo com o desempenho do colector.

Assim sendo, cobriu-se uma área de cerca de 12 m^2 da parede de tinta preta CIN Vinylmatt (referência 10-250.9005). Esta é uma tinta não elastomérica preta extra-mate, com o maior índice de absortância do catálogo de tintas de interiores da CIN, e deverá ter um valor de absortância de $\alpha \approx$ 0,91 – inferior ao de um revestimento selectivo de topo (que pode chegar a ir acima dos 0,98) – mas já permitindo um bom nível de absorção da potência incidente.

Após o desenho da superfície de absorção construiu-se uma caixa de ar sobre a superficie com dois objectivos: primeiro, reduzir as perdas por radiação da placa, e em seguida para conter o fluxo de ar que servirá de fluído do colector. Escolheu-se o ar como fluído de trabalho do colector devido à facilidade em construir e operar um colector baseado em ar, dado que não é necessário ter reservatórios de fluído, e em caso de algum precalço, quaisquer fugas que existam são pouco preocupantes. Para além disto, o ar aquecido no colector pode depois ser injectado para dentro de casa directamente, aquecendo o seu interior sem ser necessário nenhum sistema de tubagens para retornar o fluído ao reservatório.

Seguindo então as dimensões definidas na secção 3.2, foi construído um caixilho de alumínio a toda a volta da superficie de absorção, com um perfil de 30 $\times$ 80 mm, sobre o qual foi colocado um vidro simples de 6mm de espessura. Na caixilharia foram também abertos ventiladores, de 10mm de largura, com o intuito de ventilar o colector se, durante o Verão, este estiver a aquecer a casa indevidamente, comportando-se aí o colector como uma parede de Trombe.

Convém ainda mencionar o papel do vidro no funcionamento do colector ao longo do ano. Em primeiro lugar, limita as perdas radiativas, dado que o vidro é opaco aos comprimentos de onda infravermelhos que compõem estas perdas. Para além disso, e como já mencionado na secção 3.1.1, para ângulos mais elevados o vidro reflecte a maioria da radiação incidente, ajudando a limitar o aquecimento do colector durante o Verão (Furler 1991, [2]).

Para finalizar, o fluxo de ar através do colector é imposto por um ventilador Soler & Palau TD-

800/200 EcoWatt, com um diâmetro de 200mm e capaz de trabalhar em temperaturas até 60 °C. Este ventilador tem um caudal nominal de 800 m^3 h^{-1} e um modo de operação de baixo ruído e baixo consumo que reduz o caudal para 80% do valor nominal, ou 640 m^3 h^{-1}. A curva característica deste ventilador encontra-se na figura 3.8, de onde se retira que a potência de operação do ventilador é de aproximadamente 92 W.

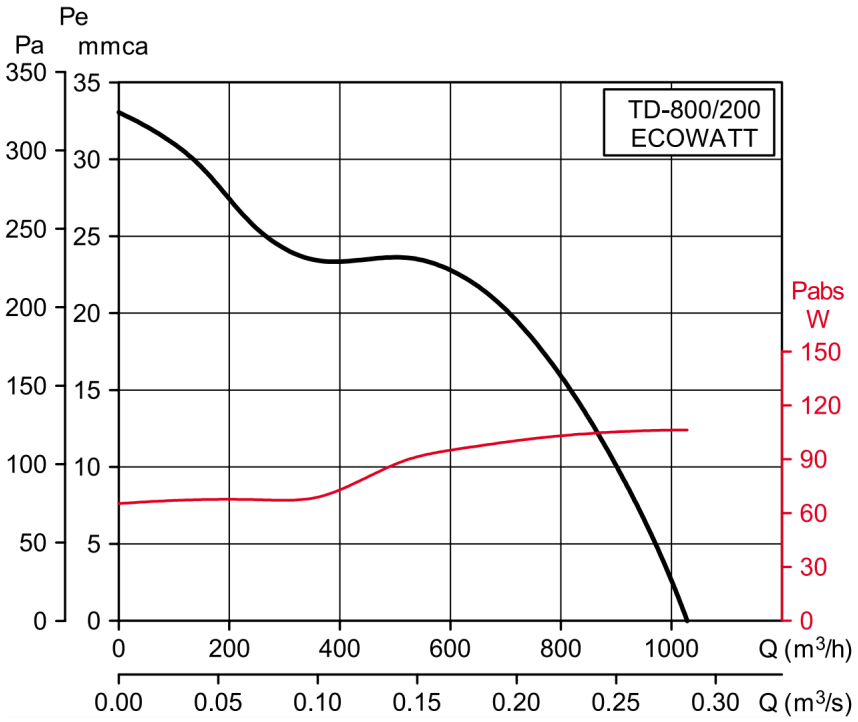


Figura 3.8: Curva de caudal contra potência consumida do ventilador

A injecção de calor é feita através do ventilador, que está montado no lado direito do colector (figura 3.1) e ligado a tubagens que distribuem o calor gerado pelos quartos e pela casa de banho junto deles através de grelhas por onde entra o ar quente. A montagem do ventilador apresenta-se na imagem 3.9, ainda sem o silenciador que mais tarde foi instalado para supressão do ruído de funcionamento.

3.2.2 Sistema de controlo e parâmetros escolhidos

O sistema desenhado para controlar o funcionamento do colector baseia-se em dois princípios:

1. O intervalo de temperaturas-alvo para a casa é entre os 21 °C e os 24 °C;
2. A potência injectada pelo colector deve compensar largamente a potência eléctrica gasta pelo sistema de controlo e de ventilação.

Para cumprir estes princípios foi desenhado um sistema com dois relés; o primeiro activa sempre que a temperatura da casa desce abaixo de 21 °C e corta sempre que sobe acima dos 24 °C, com um

Figura 3.9: Montagem do ventilador no interior da casa antes da montagem do silenciador

pequeno ciclo de histerese de 3 °C. O segundo está activo apenas quando a diferença de temperaturas entre o colector e o interior da casa é igual ou superior a 5 °C. Da união destes dois relés sai o sinal que liga o ventilador quando a casa está fria (princípio 1) e existe calor dentro do colector suficiente para compensar o gasto de electricidade (princípio 2). O circuito está esquematizado na figura 3.10, tendo sido implementado recorrendo a um controlador AKO-14220, que já inclui os relés, sensores de temperatura e circuitos lógicos programáveis para definição dos parâmetros desejados. As especificações técnicas deste controlador estão na tabela 3.2.

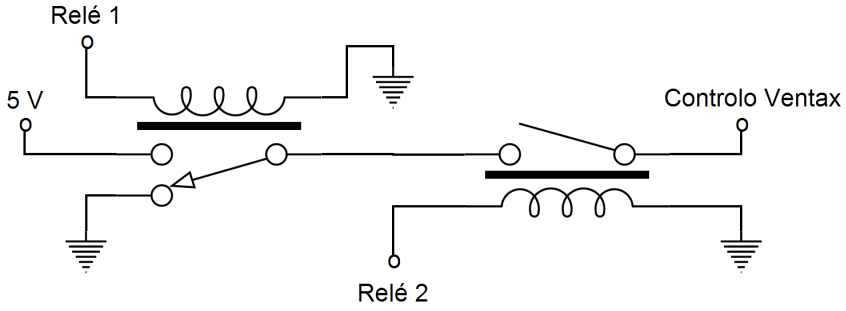


Figura 3.10: Circuito de controlo do funcionamento do colector, incluindo os dois relés actuados independentemente pelo controlador AKO-14220

Parâmetro	Valor
Gama de temperaturas	-50,0 °C a +99,9°C
Resolução	0,1 °
Precisao	± 1 °C
Potência consumida máx.	3 W

Tabela 3.2: Especificações técnicas do controlador utilizado (AKO-14220)

O intervalo de 21 °C - 24 °C foi definido com base nas preferências do dono da casa e o intervalo de 5 °C baseou-se na estimativa da potência que seria injectada com essa diferença de temperatura, procurando-se um COP superior a 10 para garantir um ganho energético substancial. Na secção **??** será calculada a potência e o COP esperados para este limiar e confirmada a estimativa.

3.2.3 Custos de construção e operação

Na avaliação dos custos associados ao colector é necessário separar o custo de instalação do custo de operação. Tipicamente os sistemas de energia solar têm um custo de montagem elevado e um custo de operação reduzido; este não é excepção. O custo da armação, vidro e montagem do colector, incluindo tinta e pintura da parede de absorção, foi de 2.100€+ IVA (à altura apenas 21%). O ventilador, tubagens associadas, silenciador, termostato e sistema de controlo custou 600€+ IVA. O custo total de instalação foi de 3.267€.

O custo de operação do colector reduz-se à operação do sistema de controlo e ventilação. Da secção 3.2.2 sabemos que o sistema como um todo consome 95 W de potência, ou 95 Wh de energia por hora de operação. A tarifa actualmente em vigor na EDP, na categoria de mercado regulado simples com potência instalada superior a 2,3 kVA e inferior a 10,35 kVA é de 0,1393 €/kWh (Site EDP, 2011, [3]). Assim sendo, o custo de operação do colector será de 1,3 cêntimos por hora. Assumindo um *duty cycle* médio de 20%, traduzindo-se em 144 horas de funcionamento por mês, o custo mensal de operação do sistema seria de €1,87, ou €22,46 por ano.

3.3 Desempenho esperado

3.3.1 Potência e Rendimento esperados

Para o cálculo da potência do colector será considerado o calor específico do ar à pressão constante de 215 Pa imposta pelo ventilador quando o colector está em funcionamento (figura 3.8); a este nível de pressão o c_p do ar é de 1.004 J kg^{-1} K^{-1}. Para além disso, de forma a converter o caudal de ar tabelado do ventilador (640 m^3 h^{-1}) para kg h^{-1} considerou-se uma densidade média do ar de 1,217 kg m^{-3}, correspondente à densidade do ar a uma temperatura média de 17 ° à temperatura ambiente e desprezando humidade. Este valor de temperatura foi escolhido porque é o valor médio da temperatura exterior ao longo dos 14 meses de aquisições, dando assim o melhor valor de referência para os cálculos a fazer. Assim sendo, para o limiar mínimo de 5 ° definido, a potência injectada será de 1.180,7 W, já incluindo a potência consumida pelo sistema de ventilação e controlo, que é transmitida ao ar sob a forma de energia cinética e perdas térmicas. Nestas condições, o COP será de 12,4;

na secção 4.3.2 este intervalo será analisado de forma mais crítica para avaliar a possibilidade de o estreitar sem prejudicar o funcionamento do colector.

A potência calorífica escala linearmente com a diferença de temperatura, pelo que uma diferença de temperatura de 10 °C levaria a 2.266,4 W de potência total injectada; assim, estimar a potência média depende de estimar as diferenças de temperatura entre a casa e o colector, um parâmetro imprevisível à partida. De qualquer forma, sabendo que o limite inferior é fixo e assumindo que ΔT nunca excede 10 °C - o que, tendo em conta que nessas condições o colector provavelmente estaria a funcionar em pleno já há agum tempo, é razoável - podemos estimar uma potência de $\approx$ 1-2 kW durante o tempo de operação. Esta potência terá, no entanto, de ser medida experimentalmente na secção 4.2.3. Face ao consumo de 95W do sistema de controlo e ventilação, esta gama de potências esperadas levaria a valores de COP entre 12,4 e 23,9, sendo este rendimento medido experimentalmente na secção 4.2.4.

3.3.2 Desempenho térmico da casa

Devido à inexistência de uma medida de referência da temperatura da casa antes da instalação do painel e à dificuldade em obter esses dados em tempo útil, procurou-se calcular esse *baseline* de temperatura com base na teoria explorada na secção 2.1.2. Para isto, construiu-se um modelo simples de térmica de edifícios e simulou-se a evolução da temperatura da casa se esta estivesse apenas sujeita a trocas de calor com o exterior através das suas paredes, respondendo a um dado perfil de temperaturas exteriores. Esta simulação depende de algumas aproximações:

- Assumiu-se que a temperatura interna da casa é homogénea, ou seja, que em cada iteração da simulação a temperatura estabiliza o suficiente para não existirem gradientes;
- Consideraram-se apenas trocas de calor por condução, dado que a casa passou largos períodos de tempo desocupada durante as medições e com as janelas fechadas pelo que os ganhos de utilização e de radiação seriam pouco significativos;
- Desprezaram-se as paredes interiores da casa e a chaminé de forma a simplificar os cálculos;
- Assumiu-se que não existem perdas por pontes térmicas nem por renovação do ar.

Com base nestas aproximações e no modelo descrito em [22] calculou-se o coeficiente de transmissão térmica médio da envolvente com o valor de U = 0,25 W / m^2K para uma parede de 30cm de espessura total distribuídos de acordo com a tabela 3.3, onde λ é a condutibilidade térmica de cada camada em W / m °C. Dado que as janelas representam apenas 10% da superfície total da envolvente, são de vidro duplo com caixa de ar de 6mm e tinham as portadas fechadas durante a maior parte dos

períodos considerados – eliminando portanto os ganhos por radiação – assumiu-se que seriam pouco influentes no valor médio de U.

Camada	Espessura	λ
Tijolo	11 cm	0,16
Caixa de ar	3 cm	0,02
Isolamento	4 cm	0,04
Tijolo	11 cm	0,16
Reboco	1 cm	0,40

Tabela 3.3: Composição das paredes externas da casa por camada

Em termos de dimensões da casa, a área total da envolvente é de 338,8 m^2, o volume total da casa é de 518,2 m^3 e o calor específico do ar a volume constante é de 1210 J / m^3°C.

Aplicou-se então este modelo a quatro perfis de temperatura, um por cada estação do ano, tendo-se obtido os resultados das figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14. Os perfis foram escolhidos de forma a abranger os maiores períodos de tempo contínuo possível em cada estação de forma a maximizar a estatística da simulação.

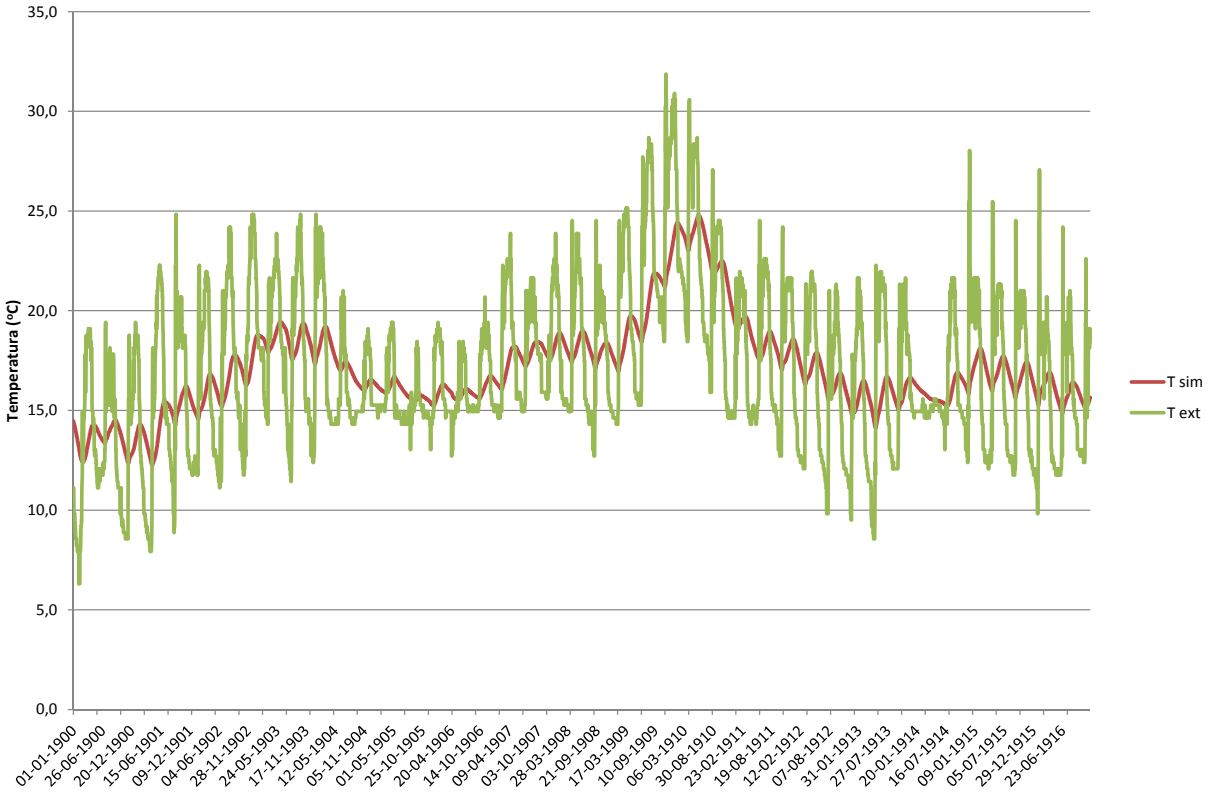


Figura 3.11: Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 2 de Abril e 15 de Maio de 2010

Estes resultados permitem esperar um comportamento térmico da casa adequado às necessidades deste trabalho; apesar da temperatura exterior variar fortemente ao longo dos períodos estudados, a inércia térmica da casa assegura uma amplitude de variação da temperatura no interior bastante mais

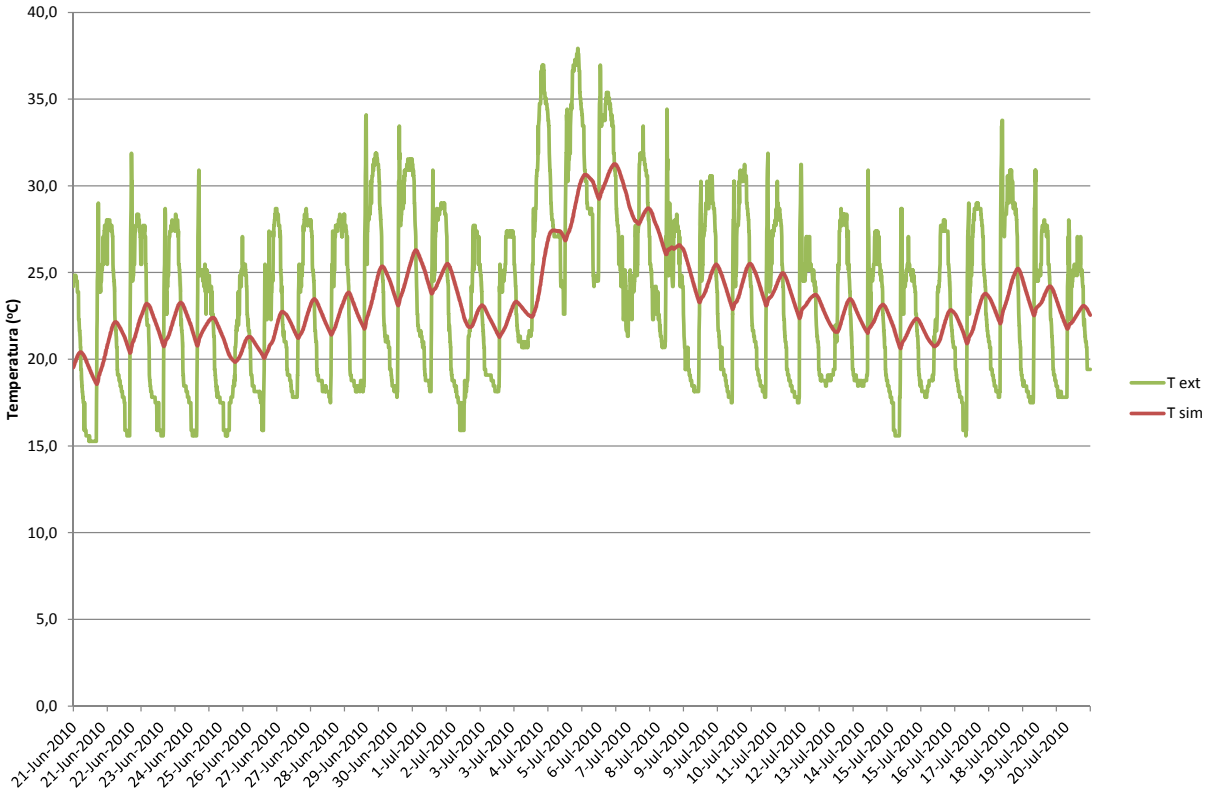


Figura 3.12: Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 21 de Junho e 20 de Julho de 2010

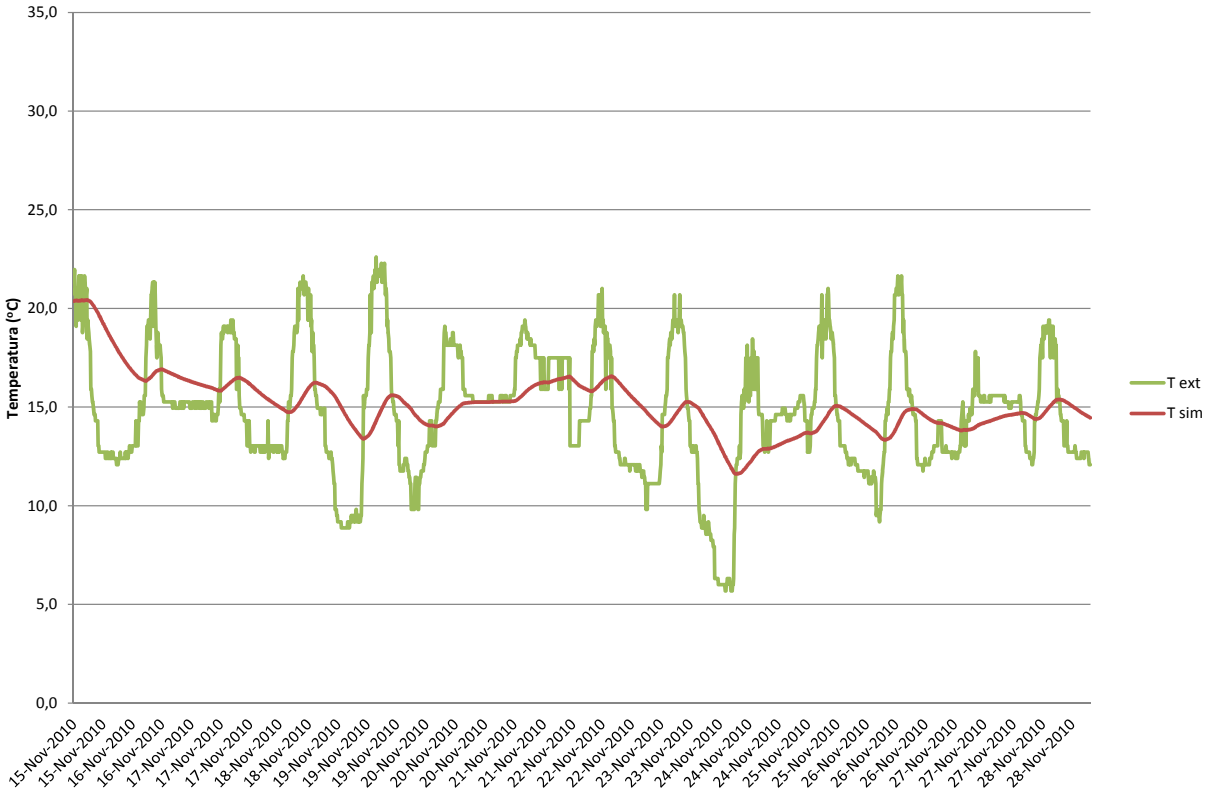


Figura 3.13: Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 15 e 28 de Outubro de 2010

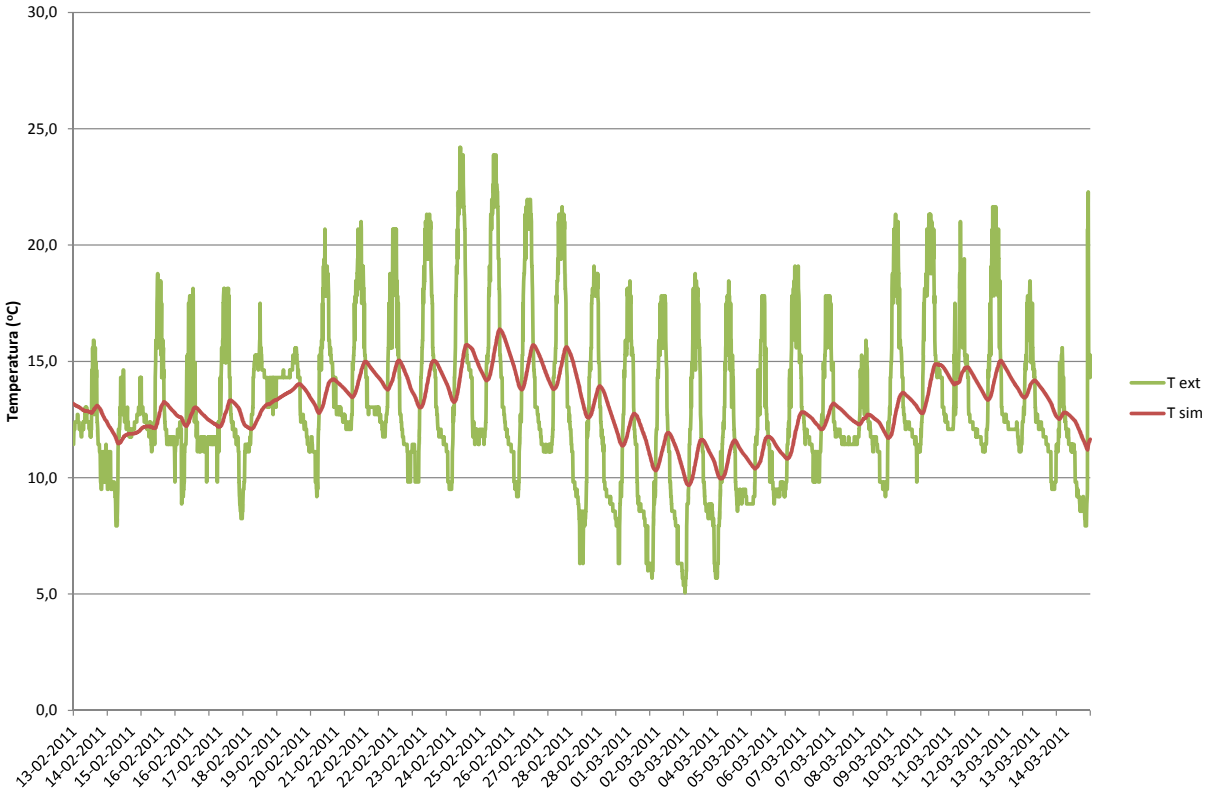


Figura 3.14: Evolução da temperatura interior simulada de acordo com a temperatura exterior medida entre 13 de Fevereiro e 14 de Março de 2011

reduzida. Este comportamento é característico de uma construção termicamente bem isolada, o que irá potenciar a eficácia do sistema de aquecimento instalado.

Capítulo 4

Análise Experimental

4.1 Dados recolhidos

A aquisição de dados para a avaliação experimental do desempenho do colector fez-se através da medição de três temperaturas diferentes ao longo do tempo:

- **Temperatura interior** (T_i): medida da temperatura dentro de casa, num dos quartos aquecidos pelo colector; dado que os quartos são todos na mesma zona da casa, de tamanho semelhante, de construção igual (incluindo as grelhas de aquecimento) e padrões de utilização humana similares, assumiu-se que a temperatura num deles seria igual à dos outros;

- **Temperatura do colector** (T_c): medida da temperatura dentro do colector, tomada como indicativa da energia armazenada no colector e disponível para aquecimento da casa;

- **Temperatura exterior** (T_e): medida da temperatura medida no exterior da casa.

Foram recolhidas séries de dados destas três temperaturas entre 20 de Fevereiro de 2010 e 16 de Abril de 2011 com intervalos de 10 minutos. Infelizmente, não foi possível recolher uma série de *baseline* antes da instalação do colector, dado que este trabalho apenas foi iniciado após a sua colocação e nessa altura desactivar o colector implicaria um desconforto significativo para os habitantes da casa. Ainda assim foi possivel recolher 38.514 medidas (cada uma com as três temperaturas acima descritas) ao longo de 280 dias, dos quais 252 completos (com os 144 pontos necessários para abranger 24h). Crucialmente, obtiveram-se séries completas de medidas em vários pontos diferentes do ano, possibilitando assim uma medição da performance do colector em diferentes condições climatéricas.

Neste capítulo será descrita toda a montagem experimental feita e serão analisados os dados recolhidos de forma a sustentar as conclusões retiradas no capítulo 5, tendo-se como foco principal a aferição do impacto do colector na temperatura interior da casa (T_i) de forma a se poder avaliar a melhoria de conforto dos residentes da casa devido ao colector.

4.1.1 Montagem experimental e calibração

Para se medirem estas temperaturas utilizaram-se três sensores de temperatura LM335 da National Semiconductors ligados a um *data logger* MultiLog DB-526 da Fourier Systems programado para adquirir as três temperaturas acima descritas, estando as suas características descritas na tabela 4.1.

Característica dos sensores	Valor
Tensão de alimentação	5 V
Corrente de operação	1 mA
Impedância dinâmica	0,6 Ω
Gama de temperaturas (em operação contínua)	-40 a +100 °C
Precisão	± 1 °C
Coeficiente de resposta	10 mv / °C

Tabela 4.1: Especificações técnicas dos sensores de temperatura utilizados (LM335)

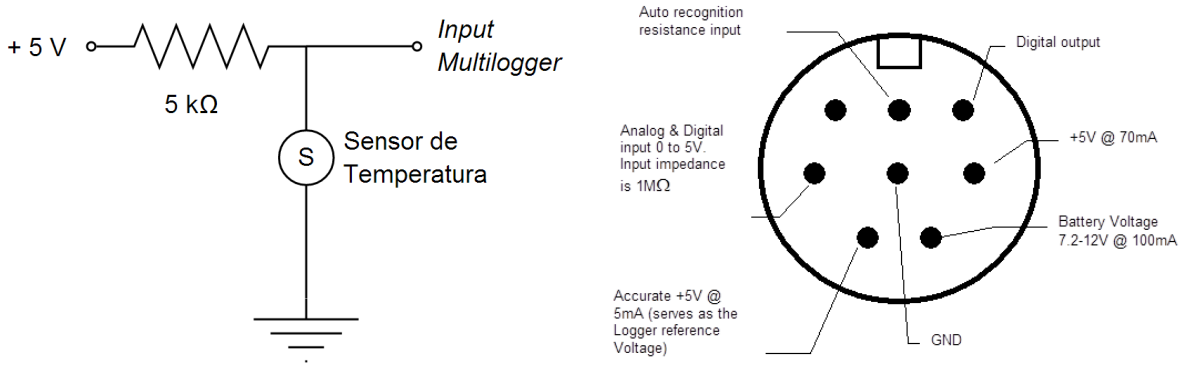
Os sensores foram montados em cabos coaxiais de 5m de comprimento com malha de protecção, para minimizar interferências e assegurar a qualidade do sinal, e ligados ao MultiLog através de fichas DIN de 8 pinos com uma resistência de 5kΩ entre os +5V e o pino de Terra para garantir a corrente operacional de 1 mA, conforme apresentado nas figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4.1: Teclado e *inputs* do MultiLog

A montagem experimental completa (incluindo a resposta do MultiLog) foi calibrada com recurso a um NTC de alta precisão, resultando na curva de calibração apresentada na figura 4.3. O ajuste feito (com R^2 = 0,9754) resulta na seguinte equação para calibração das medidas:

$$T = 0.32X_{ML} - 259.99 \tag{4.1}$$

com um erro associado de ± 1,1 °C e onde X_{ML} é o valor de saída do MultiLog.



(a) Diagrama eléctrico dos sensores

(b) *Pin-out* do MultiLog

Figura 4.2: Diagrama dos sensores e *pin-out* do MultiLog

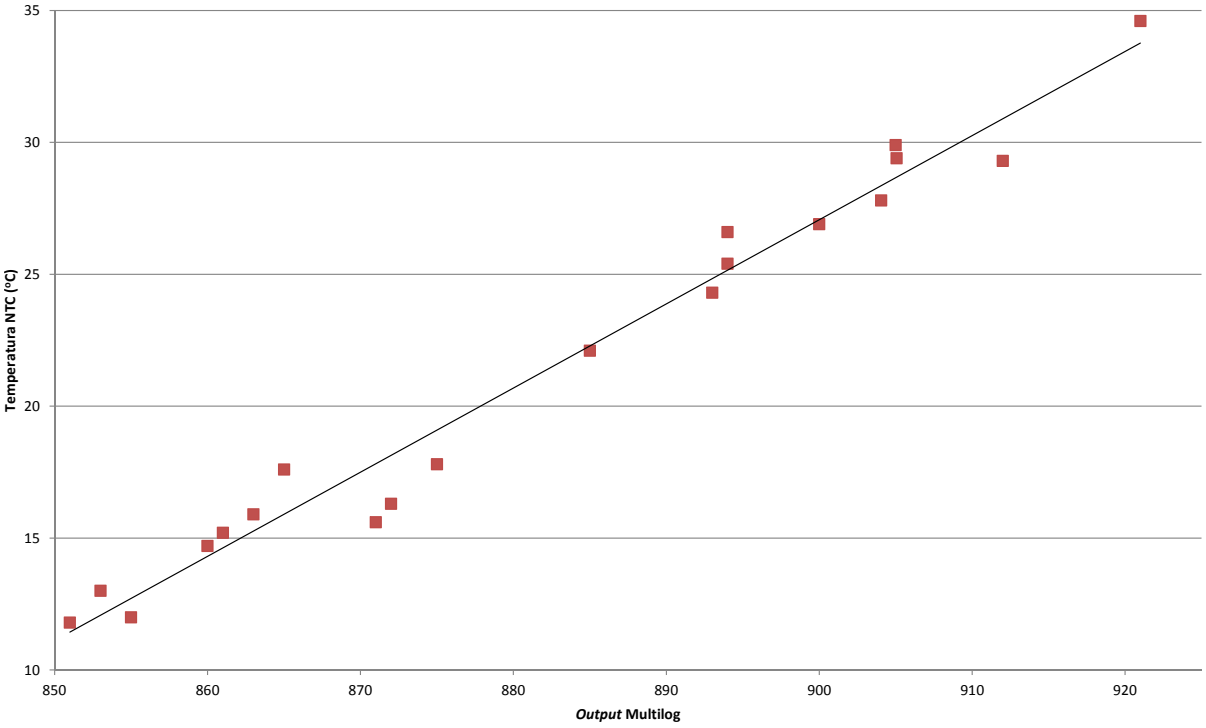


Figura 4.3: Curva de calibração da montagem experimental (R^2 = 0,9754)

4.1.2 Erros de medição

O erro calculado para a calibração efectuada é de 1,1 °C, sendo este o valor considerado para todas as medições de temperatura nesta análise. Este erro é pouco superior ao tabelado para os sensores, sugerindo que o MultiLog não introduz um erro significativo – apenas 10% do erro tabelado do sensor. Em termos de resolução temporal, o MultiLog não apresenta erros significativos no seu relógio, sobretudo tendo em conta o período de 10 minutos entre amostras, acertando-se a data e a hora automaticamente quando ligado a um computador, pelo não será considerado nenhum erro experimental na medição dos tempos.

4.1.3 Propagação de erros no cálculo da potência injectada

O erro associado à medição da potência injectada é calculado através de

$$\Delta P = \left|\frac{\partial P}{\partial \dot{m}}\right| \Delta \dot{m} + \left|\frac{\partial P}{\partial c_p}\right| \Delta c_p + \left|\frac{\partial P}{\partial T_{col}}\right| \Delta T + \left|\frac{\partial P}{\partial T_{in}}\right| \Delta T \tag{4.2}$$

onde se pode desprezar o erro associado ao c_p, reduzindo-se a expressão a

$$\Delta P = c_p(T_{col} - T_{in})\Delta \dot{m} + 2\dot{m}c_p\Delta T \tag{4.3}$$

Analisando a expressão, torna-se então necessário estimar o erro associado à medida do fluxo de ar no ventilador. Este parâmetro não se encontra tabelado pelo fabricante, pelo que se recorreu a uma medição da velocidade do ar à saída do colector para se estimar um erro de cerca de 10% no fluxo. Esta estimativa é uma majoração do erro, necessária devido às limitações na documentação do fabricante; no entanto, para diferenças de temperatura perto do limiar mínimo este termo terá uma expressividade reduzida devido ao peso do erro associado à temperatura.

4.2 Análise dos dados

4.2.1 Evolução das temperaturas

Das aquisições feitas em 2010 e 2011 apresentamos aqui apenas um conjunto representativo de forma a demonstrar os resultados obtidos e as condições de operação do colector ao longo do tempo de aquisição, estando o restante em anexo. Para cada série apresentam-se quatro medições:

- As **temperaturas interna** (T_i), **do colector** (T_c) **e externa** (T_e), como descritas na secção 4.1;
- O **tempo de funcionamento** do colector, assinalando-se os períodos de tempo em que o colector esteve em operação de acordo com os parâmetros explorados no capítulo 3.

O impacto do colector deveria então ser avaliado comparando a temperatura registada com e sem colector em funcionamento. Infelizmente não foi possível fazer uma aquisição de uma temperatura de referência, pelo que será necessário estimar este impacto através da evolução da temperatura exterior comparada com a evolução da temperatura interior. Esta aproximação assume que a temperatura interior sem colector estaria fortemente correlacionada com a temperatura exterior; partindo da teoria explorada na secção 2.1.2, esta suposição é perfeitamente razoável, sobretudo tendo em conta que a casa esteve vazia e fechada durante quase todas as aquisições, pelo que os ganhos por radiação e utilização são desprezáveis. Assim sendo toma-se esta aproximação como válida e aplica-se às aquisições que se seguem.

As 6 aquisições apresentadas em seguida abrangem as quatro estações climatéricas do ano, com especial atenção ao Inverno, e servirão de base às restantes análises deste trabalho.

20 a 27 de Fevereiro de 2010 - Inverno

A primeira aquisição a explorar foi retirada entre o início da tarde de 20 de Fevereiro de 2010 e a mesma hora do dia 27 do mesmo mês, em pleno Inverno, e está representada na figura 4.4. Estes dados foram recolhidos pouco depois do colector entrar em funcionamento mas já é possivel apreciar o seu impacto na temperatura interna da casa, que sobe cerca de 1,9 °C entre o início e o final da semana comparado com um aumento da temperatura exterior de apenas 1,0 °C. Neste período, a temperatura média interior foi de 12,2 °C, comparado com uma temperatura exterior média de 13,1 °C.

No entanto, a temperatura interior não ultrapassa os 13,0 °C, apesar da temperatura exterior chegar aos 17,0 °C e a do colector aos 20,7 °C. Para além disso, a temperatura exterior média foi 0,9 °C superior, o que demonstra uma tendência positiva da temperatura interior mas ainda assim a casa estava mais fria do que o exterior. Mais tarde será apresentada outra aquisição na mesma semana mas no ano de 2011, após um ano de funcionamento do colector e em condições climatéricas mais favoráveis, tirando-se daí algumas conclusões sobre o estado térmico da casa e a influência do colector.

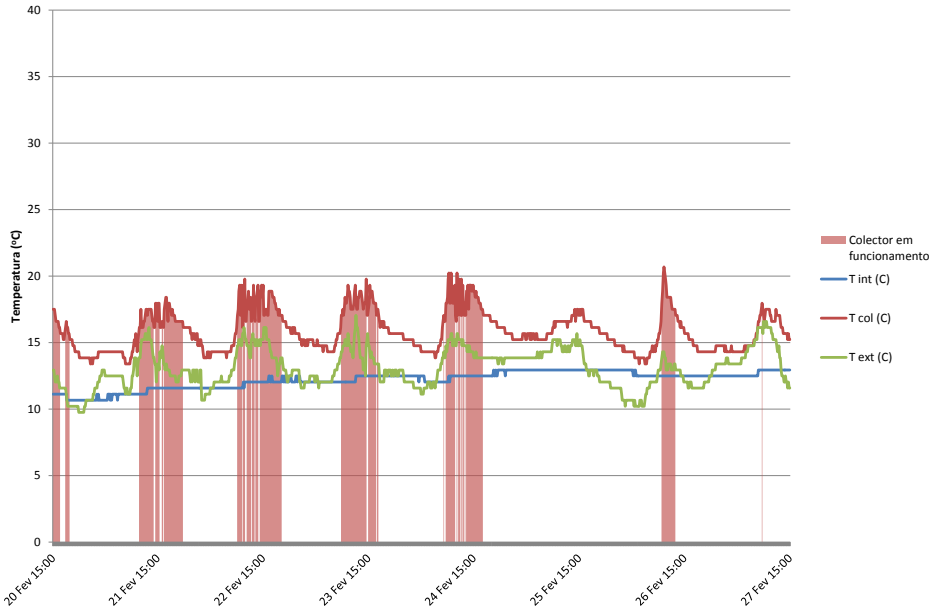


Figura 4.4: Primeira aquisição experimental (20 a 27 de Fevereiro de 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector

°C	min.	méd.	máx.
T_i	10,7	12,2	12,9
T_c	13,4	15,9	20,7
T_e	9,8	13,1	17,0
t_c		39,5 horas	

Tabela 4.2: Temperaturas e tempo de operação do colector entre 20 e 27 de Fevereiro de 2010

3 a 10 de Abril de 2010 - Primavera

A segunda aquisição foi retirada entre 3 e 10 de Abril de 2010, na Primavera (figura 4.5). A temperatura interna da casa continua a subir, oscilando entre os 14,9 °C de temperatura mínima e os 18,1 °C de

máxima com uma média de 16,0 °C, registando um aumento de cerca de 2,4 °C ao longo da semana. No entanto, a temperatura exterior subiu cerca de 3,6 °C; isto poderia sugerir um mau funcionamento do colector, mas a temperatura média exterior foi de apenas 15,3 °C, ou seja, a casa manteve-se em média mais quente do que o exterior em cerca de 0,7 °C apesar da subida ser menos pronunciada do que a do exterior, pelo que este resultado não implica um mau funcionamento do colector.

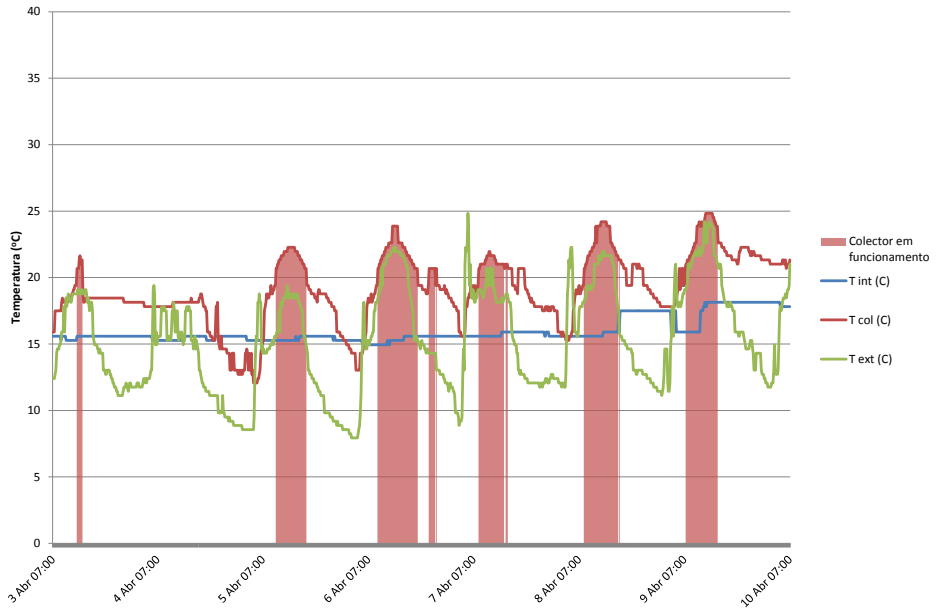


Figura 4.5: Segunda aquisição experimental (3 a 10 de Abril de 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector

°C	min.	méd.	máx.
T_i	14,9	16,0	18,1
T_c	12,1	19,2	24,8
T_e	7,9	15,3	24,8
t_c	40,8 horas		

Tabela 4.3: Temperaturas e tempo de operação do colector entre 3 e 10 de Abril de 2010

3 a 10 de Julho de 2010 - Verão

A terceira aquisição foi feita no pico do Verão, entre 3 e 10 de Julho de 2010, pouco depois do solstício de Verão (figura 4.6). Como esperado, o colector nunca esteve activo ao longo desta semana, dado que a casa já estava quente o suficiente, nunca descendo abaixo dos 21,0 °C como seria necessário para o sistema de ventilação activar. Ainda assim, a amplitude de variação de temperaturas é substancialmente menor dentro de casa (5,4 °C) do que fora, onde a amplitude é de 20,4 °C, comprovando a qualidade do isolamento das paredes da casa como esperado após o estudo da secção 3.3.2.

9 a 16 de Outubro de 2010 - Outono

A aquisição seguinte é do Outono de 2010, entre 9 e 16 de Outubro. Nesta série temos o maior número de horas de trabalho do colector das séries apresentadas, chegando às 81,5 horas de operação durante a semana, quase 50% do tempo total da semana. Esta actividade reflecte-se na temperatura interna registada (entre 18,5 °C e 21,0 °C) que é marcadamente superior à registada em Abril (figura 4.5) apesar das temperaturas externas não serem muito diferentes (12,4 °C - 25,5 °C nesta série, 7,9

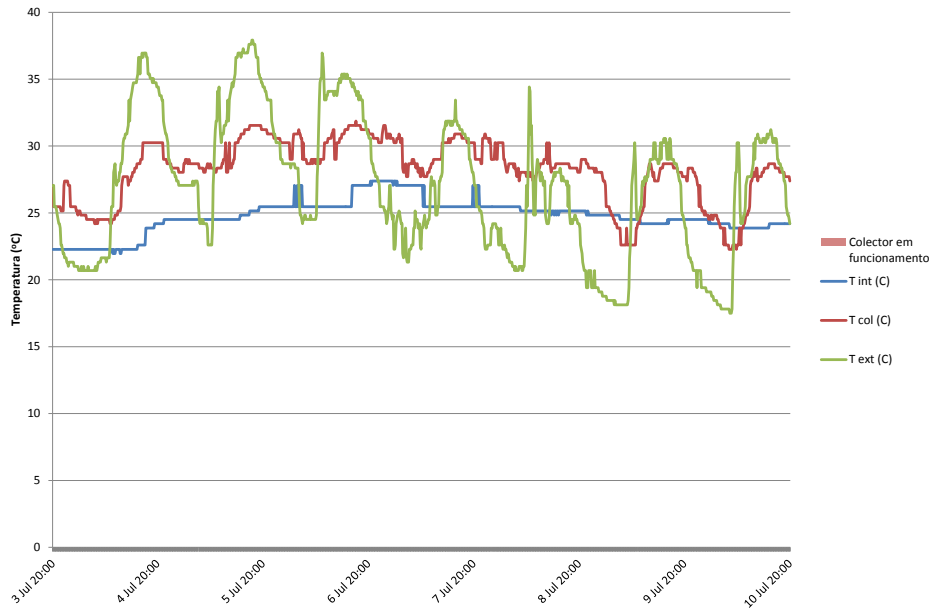


Figura 4.6: Terceira aquisição experimental (3 a 10 de Julho 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector

°C	min.	méd.	máx.
T_i	22,0	24,8	27,4
T_c	22,3	28,2	31,9
T_e	17,5	26,9	37,9
t_c		0 horas	

Tabela 4.4: Temperaturas e tempo de operação do colector entre 3 e 10 de Julho de 2010

°C - 24,8 °C em Abril). A diferença na actividade espelha-se bem nas temperaturas do próprio colector, que atingem os 28,4 °C contra apenas 24,8 °C em Abril.

Comparando as duas temperaturas, no interior registou-se uma média de 19,7 °C contra 18,2 °C da temperatura exterior, com uma variação de 1,3 °C para ambas. À semelhança de Abril a casa consegue manter uma temperatura média superior à exterior, com uma temperatura mínima 3,6 °C superior à de Abril apesar da temperatura exterior registar uma diferença de apenas 0,3 °C entre as duas aquisições. Este resultado sugere que o colector tem realmente influência na temperatura média da casa, permitindo um ganho de conforto para os seus ocupantes, superando finalmente a margem de erro, podendo agora tomar-se este resultado como significativo. Grande parte deste ganho extra será devido ao facto de o colector ter estado em operação durante 81,5 horas nesta semana, por contraste com as 40,8 de Abril, injectando mais calor para dentro de casa e contribuindo para o alargamento da diferença entre a temperatura interior e exterior.

17 a 24 de Janeiro de 2011 - Inverno

A quinta aquisição apresentada é de novo do Inverno, de Janeiro de 2011 (figura 4.6). Nesta aquisição, cerca de um ano após a entrada em funcionamento do colector, mostra os ganhos substanciais em termos de conforto térmico que este sistema traz à casa. Numa semana em que a temperatura exterior chegou aos 6,0 °C, a temperatura interior da casa nunca foi abaixo dos 13,0 °C, cerca de 2,3 °C superior ao mínimo registado em Fevereiro de 2010 (4.4) e 0,1 °C superior ao máximo registado nesse mesmo período, onde o mínimo exterior registado foi 3,8 °C superior. Comparando a tempera-

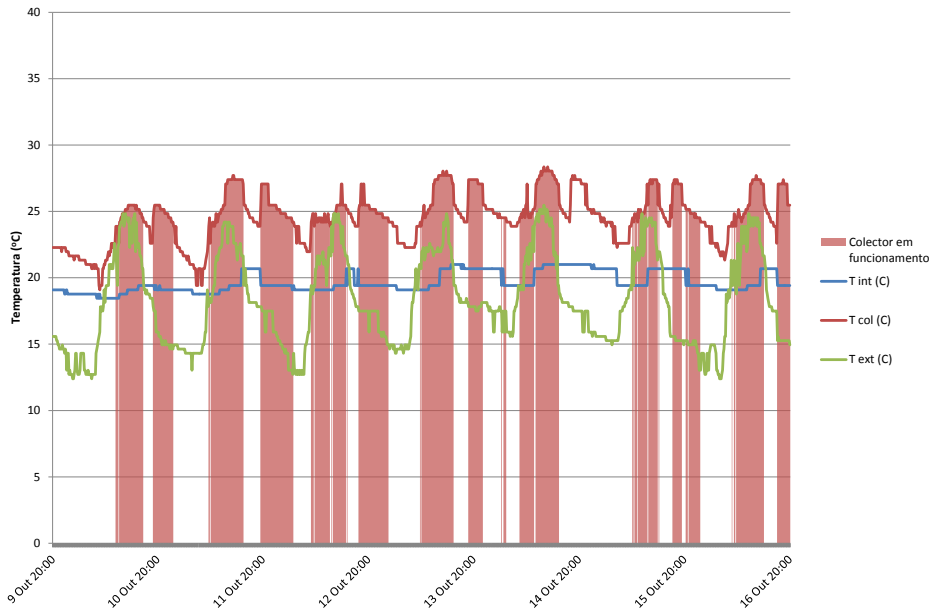


Figura 4.7: Quarta aquisição experimental (9 a 16 de Outubro 2010) com temperaturas e períodos de operação do colector

°C	min.	méd.	máx.
T_i	18,5	19,7	21,0
T_c	19,1	24,6	28,4
T_e	12,4	18,2	25,5
t_c	81,5 horas		

Tabela 4.5: Temperaturas e tempo de operação do colector entre 9 e 16 de Outubro de 2010

tura interior e exterior, a média dentro de casa foi de 14,6 °C e fora de 12,4 °C, um ganho de 2,2 °C bem acima da margem de erro, reforçando a conclusão de que a acção do colector tem uma influência positiva assinalável no conforto da casa.

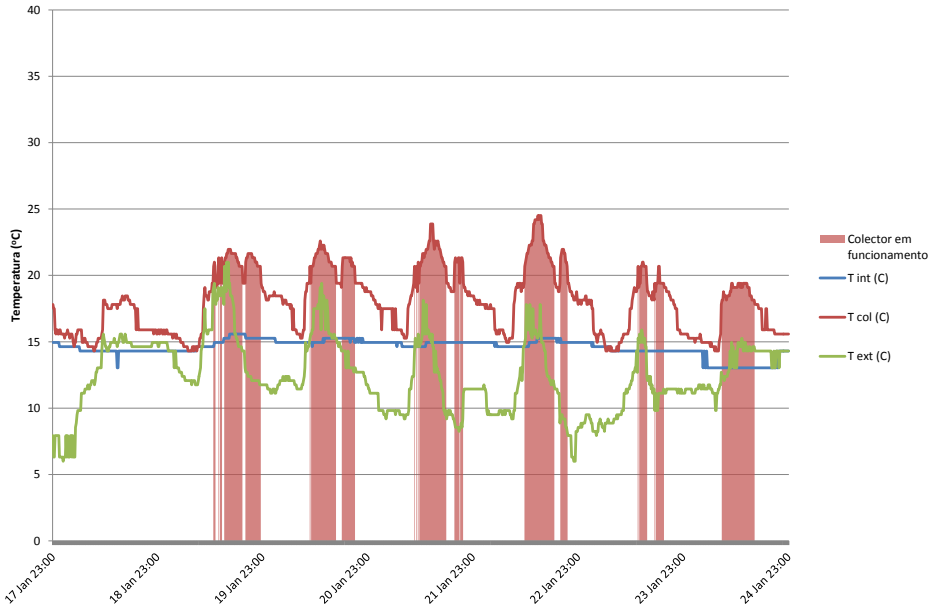


Figura 4.8: Quinta aquisição experimental (17 a 24 de Janeiro 2011) com temperaturas e períodos de operação do colector

°C	min.	méd.	máx.
T_i	13,0	14,6	15,6
T_c	14,3	18,0	24,5
T_e	6,0	12,4	21,0
t_c	46,2 horas		

Tabela 4.6: Temperaturas e tempo de operação do colector entre 17 e 24 de Janeiro 2011

20 a 27 de Fevereiro de 2011 - Inverno

Para finalizar, apresentamos uma aquisição de 20 a 27 de Fevereiro de 2011 (figura 4.9), o mesmo período da figura 4.4 mas após um ano completo de funcionamento do colector. Ainda que o clima não

funcione em ciclos alinhados com o ano civil, esta aquisição permite-nos completar o ciclo iniciado com a figura 4.4 e reforçar algumas observações feitas anteriormente.

Comparando com o período homólogo de 2010, observa-se que o colector operou durante quase o dobro do tempo, num total de 76,8 horas. Este trabalho extra reflecte-se em valores de temperatura interna muito mais agradáveis – 13,0 °C - 17,5 °C, contra 10,7 °C - 12,9 °C em 2010. Apesar da temperatura exterior ter atingido valores semelhantes nas duas séries – 9,2 °C contra 9,8 °C de mínimo e 14,7 °C contra 13,1 °C de média – a temperatura mínima da casa nesta aquisição é superior à máxima da mesma semana em 2010, mostrando o impacto das horas extra de funcionamento do colector.

Analisando a evolução das temperaturas ao longo da semana, a temperatura externa registou uma média de 14,7 °C enquanto que a interior atingiu os 15,2 °C, ou 0,5 °C acima da exterior, o que volta a estar dentro da margem de erro. Em termos evolutivos, o interior da casa registou um aumento de 1,9 °C enquanto o exterior apenas ganhou 1,2 °C na temperatura média; esta diferença de 0,7 °C deve-se ao impacto do colector.

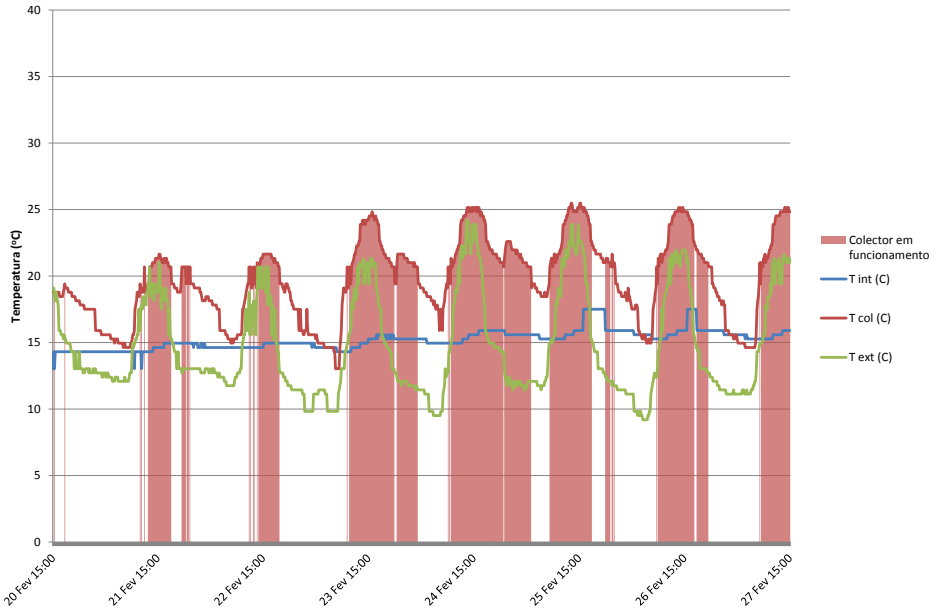


Figura 4.9: Quinta aquisição experimental (20 a 27 de Fevereiro 2011) com temperaturas e períodos de operação do colector

°C	min.	méd.	máx.
T_i	13,0	15,2	17,5
T_c	13,0	19,7	25,5
T_e	9,2	14,7	24,2
t_c	76,8 horas		

Tabela 4.7: Temperaturas e tempo de operação do colector entre 20 e 27 de Fevereiro 2011

4.2.2 Resumo dos resultados obtidos

Como é visível na tabela 4.8, o colector teve resultados francamente positivos; apenas em duas aquisições apresentou uma temperatura média inferior à do exterior. Ambos os casos são *outliers*; no primeiro o colector tinha sido ligado há muito pouco tempo, não tendo tido oportunidade para aquecer adequadamente e daí injectar calor dentro de casa da melhor forma, registando-se também o menor tempo de operação do colector do conjunto. No segundo caso o colector não entra em operação de

todo, sendo no pico do Verão, explicando-se a temperatura interior inferior à da exterior através do bom isolamento térmico da casa.

Excluindo estes dois casos atípicos – mas informativos – o ganho médio da temperatura interna face à externa é de 1,23 °C, excedendo a margem de erro estimada na secção 4.1.2.

Aquisição	Estação	$\overline{T_i}$ °C	ΔT_i °C	$\overline{T_e}$ °C	ΔT_e °C	Δ °C	Horas Colector	Figura
1 – Fev. 2010	Inverno	12,2	1,9	13,1	1,0	-0,9	39,5	4.4
2 – Abr. 2010	Primavera	16,0	2,4	15,3	3,6	0,7	40,8	4.5
3 – Jul. 2010	Verão	24,8	1,0	26,9	-5,4	-2,1	0,0	4.6
4 – Out. 2010	Outono	19,7	1,3	18,2	1,3	1,5	81,5	4.7
5 – Jan. 2011	Inverno	14,6	-0,9	12,4	-1,5	2,2	46,2	4.8
6 – Fev. 2011	Inverno	15,2	1,9	14,7	1,2	0,5	76,8	4.9

Tabela 4.8: Resultados das medições experimentais – demonstração do aumento de temperatura por acção do colector face à evolução da temperatura exterior

4.2.3 Potência injectada

A potência máxima registada ao longo dos 14 meses de medições efectuadas foi de 2.242 $\pm$ 692 W, atingida a 24 de Fevereiro de 2011 (figura 4.9), dia da maior diferença de temperatura entre o colector e o ar exterior (de 9,9 °C). Em princípio deverá ser possível atingir diferenças de temperaturas mais elevadas, e daí maiores potências de aquecimento, mas um limite máximo para essa diferença de temperatura não é fácil de encontrar (secção 3.3.1). A potência mínima corresponde ao intervalo mínimo medido de 5,01 °C e foi de 1.183 $\pm$ 587 W; note-se que é marginalmente superior aos 1.180,7 W calculados em 3.3.1, devido à resolução dos sensores utilizados para medição das temperaturas, que levam a que o colector não active imediatamente nos 5,0 °C mas sim apenas aos 5,01 °C. Este erro tem muito pouca influência nos resultados – face ao erro calibrado de 1,1°C – pelo que se poderá desprezar. Para finalizar, a potência média medida quando o colector estava em funcionamento, ao longo de todos os pontos adquiridos, foi de 1.445 $\pm$ 622 W.

Esta potência é comparável aos aquecedores de pequeno porte apresentados na secção 1.4, estando ligeiramente acima do aquecedor eléctrico e ligeiramente abaixo do aquecedor a gás. No entanto, a comparação entre os dois deve ser feita em termos de kWh de energia calorífica injectada dado que as necessidades definidas pelo RCCTE são determinadas nessa unidade, pelo que as diferências de potência não serão relevantes.

4.2.4 Rendimento do colector

Como discutido na secção 4.2.3, o rendimento do colector será calculada pela expressão **??**. O rendimento do colector depende então da diferença entre a temperatura do colector e a temperatura do

interior da casa. Para explorar melhor esta relação, escolheu-se o dia 24 de Fevereiro de 2011 (parte da aquisição 4.9), para a qual se calculou o rendimento instantâneo ao longo do período. Os resultados apresentam-se na figura 4.10, onde se pode observar que o COP varia entre 12,7 e 23,6 com uma média de 17,4.

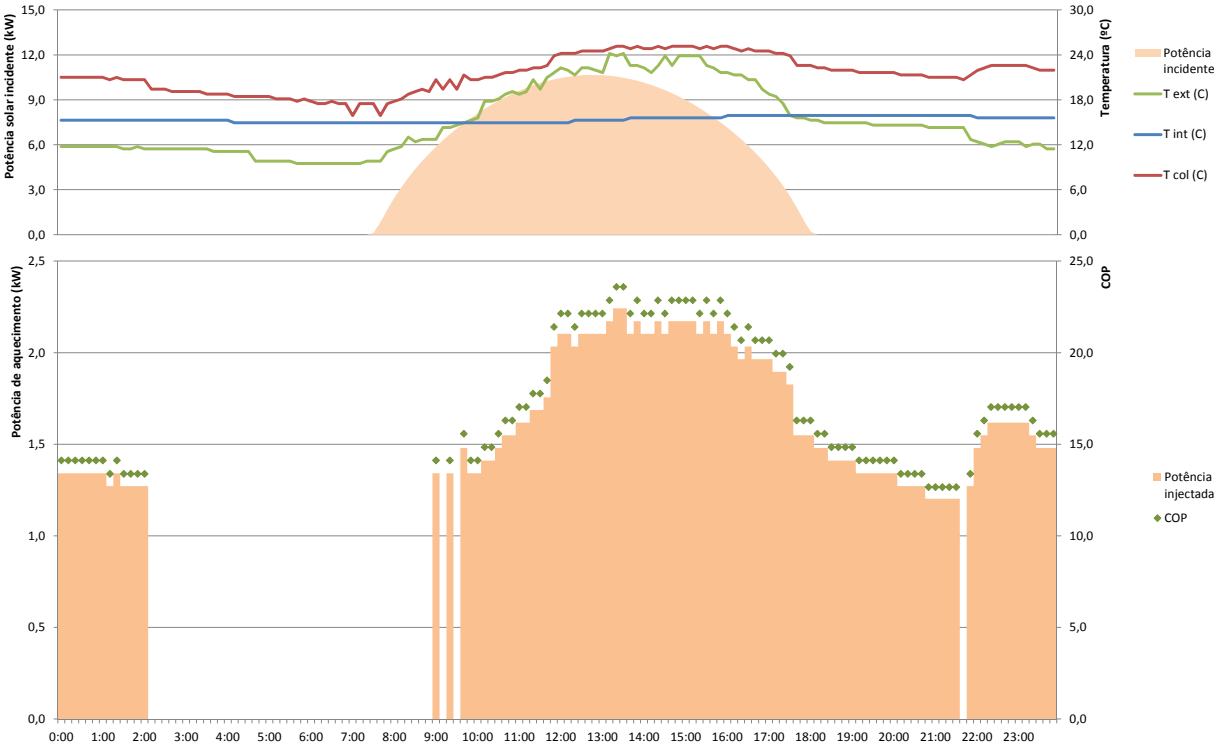


Figura 4.10: Acima: potência solar incidente e evolução das temperaturas ao longo do dia. Abaixo: Potência injectada pelo colector ao longo desse mesmo dia e COP do colector.

Nesta aquisição podemos observar alguns fenómenos interessantes. Primeiro, o colector injecta calor dentro de casa muito depois do Sol se pôr, tanto no final do dia quanto no início, com calor do dia anterior. Este comportamento de inércia térmica do colector é essencial ao seu funcionamento, porque permite aquecer a casa durante a noite e evitar que a temperatura interior caia de tão abruptamente como a exterior. Em seguida, o nível de potência injectada varia ao longo do dia de forma análoga à incidência solar mas com um certo atraso, explicado pela necessidade do colector de aquecer antes de cumprir as condições para injectar ar quente na casa. Finalmente, há três pontos do dia – dois de manhã e um à noite – onde o colector se desliga momentaneamente. Nos primeiros dois pontos é simplesmente uma questão do colector estar ainda a aquecer e do diferencial de temperatura cair por momentos. O ponto da noite é mais complicado: a temperatura do ar no colector vinha a cair já há várias horas e, precisamente quando baixa dos 5 °C e o ventilador desliga, regista-se um aumento súbito que volta a ligar o ventilador. Este comportamento deve-se ao facto de a temperatura da placa de absorção em si ser muito superior à temperatura do ar que sobre ela circula, sendo esta última a

utilizada para controlar o funcionamento do colector. Assim sendo, o que ocorreu neste ponto – e que acontece com alguma frequência, como se pode apreciar nas aquisições da secção 4.2.1 – foi que a temperatura do ar a ser injectado caiu abaixo do limiar mínimo, cortando o funcionamento do ventilador. Ao ficar parada sobre a placa de absorção, que estava a uma temperatura muito superior, o ar dentro do colector aqueceu até que ultrapassou o limiar mínimo de novo e ligou o colector, e daí em diante seguiu com o comportamento normal do sistema após este salto inicial devido a esta massa de ar que ficou estacionária sobre a placa durante um certo tempo.

Existem também outros parâmetros de rendimento para além do COP – como discutido na secção 2.3 – sendo os mais importantes o rendimento óptico, cujos valores se resumem na tabela 4.9, e o factor de perdas. Este último, em particular, depende da temperatura de operação do colector; o seu valor médio ao longo do período analisado foi de F' U_L = 13,5 J m^{-2} K^{-1}. Este valor é substancialmente mais elevado do que o normal num colector plano (tipicamente 8 J m^{-2} K^{-1}, 41% mais baixo). No entanto, tendo em conta que o fluído utilizado é o ar e que o colector foi construído com a própria parede da casa, sem uma placa colectora termicamente isolada dedicada, considera-se aceitável. O rendimento óptico F' η_0 teve um valor de 0,36, em linha com o dos colectores solares normais disponíveis no mercado.

Parâmetro	Valor
F'$_{ar}$	0,50
τ	0,80
α	0,90
η_0	0,72
F' η_0	0,36

Tabela 4.9: Valores dos parâmetros de rendimento óptico do colector

4.2.5 Temperatura de estagnação do colector

Outro parâmetro importante de aferir para caracterizar o colector é a sua temperatura de estagnação. Da lei de Stefan-Boltzmann,

$$P_{radiada} = \varepsilon \sigma A (T_c^4 - T_e^4) \tag{4.4}$$

onde ε = 0,95 é a emissividade da tinta preta utilizada no colector, σ = 5,67 x 10^{-8} J s^{-1} m^{-2} K^{-4} é a constante de Boltzmann, A = 12,05 m^2 é a área do colector, T_c é a temperatura do colector e T_e a temperatura exterior. Assumindo uma temperatura exterior de 25 °C, a figura 4.11 apresenta as temperaturas às quais o colector emitiria a mesma potência que recebe. Estas temperaturas vão desde os 111,4 °C para os 100 W / m^2 de potência incidente até aos 198,1 °C para 1000 W / m^2 de potência.

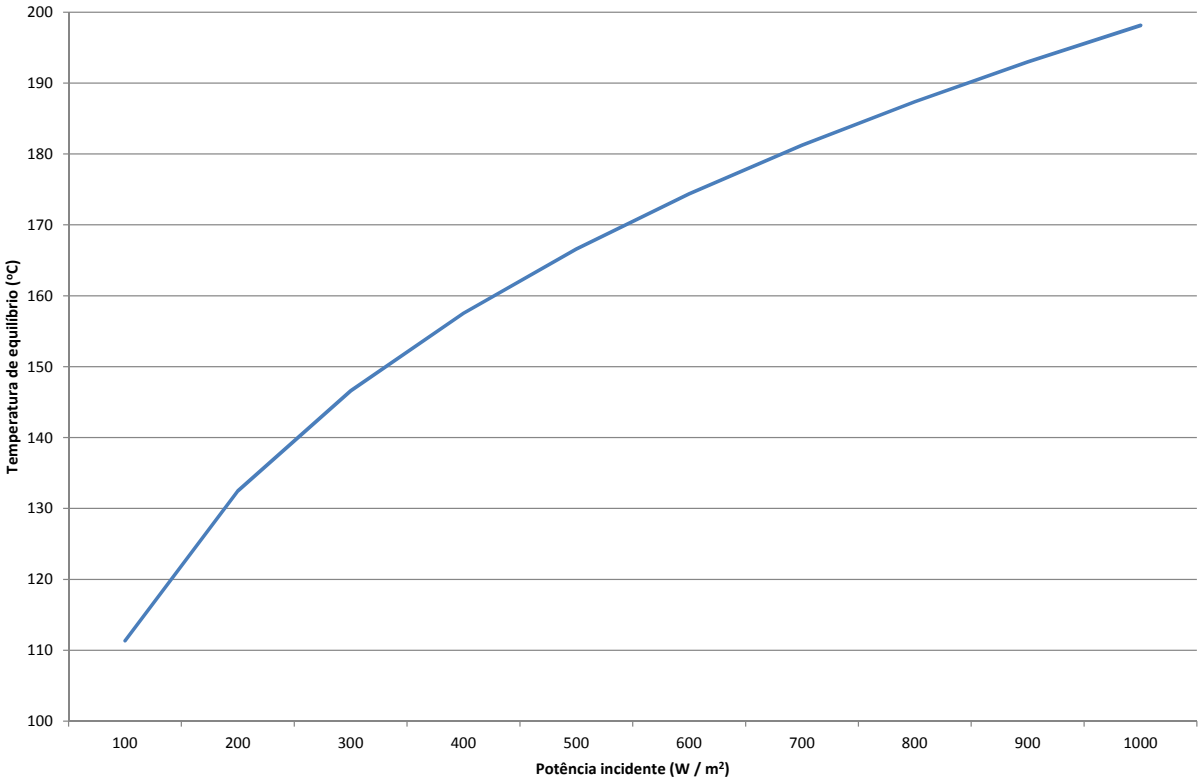


Figura 4.11: Temperaturas de estagnação da superfície de absorção em função da potência incidente

Quanto ao desempenho do colector em si, a temperatura da superfície de absorção – diferente da temperatura do ar dentro do colector – foi medida durante o decorrer da experiência, tendo-se registado uma temperatura máxima da placa (com o colector em funcionamento) de 55 °C no dia 24 de Fevereiro de 2011, ou cerca de 3,6 vezes inferior ao valor determinado para uma potência incidente de 1000 W / m^2. Olhando para o modelo ASHRAE, para um colector vertical orientado a Sul, a potência máxima esperada é de 853,4 W / m^2, o que se traduziria numa temperatura de equiliíbrio de 190,4 °C, ou cerca de 3,5 vezes o máximo medido, pelo que não se espera que o colector alguma vez atinja esta temperatura. Para isto muito contribui o facto de que a altura do ano em que o colector recebe mais potência incidente – no Inverno – é também a altura em que a casa precisa de mais aquecimento, levando a que o calor acumulado na parede seja injectado para dentro de casa sempre que possível e evitando que o colector sature energeticamente.

Este resultado sugere que com uma superfície de absorção melhorada seria possível recolher mais energia e por conseguinte injectar mais energia para dentro de casa. O ideal seria ter uma placa de absorção metálica dedicada, coberta de um revestimento selectivo, o que maximizaria o calor absorvido e posteriormente transmitido ao ar. No entanto, uma placa e um revestimento deste tipo encareceriam substancialmente o colector, pelo que esta alteração deve ser cuidadosamente considerada tendo em conta os custos envolvidos.

4.3 Análise dos resultados

4.3.1 Cumprimento das necessidades térmicas da casa

De acordo com o RCCTE ([4]), o valor limite das necessidades térmicas da casa é de 2966,0 kWh de aquecimento por ano, como calculado na secção 3.1.2. Experimentalmente mediu-se um *duty-cycle* de 21,1% para o sistema instalado e uma potência média de 1.445 $\pm$ 622 W quando em funcionamento, o que ao longo de um ano se traduz em 1851,2 horas de funcionamento e num total de 2675,3 kWh de aquecimento injectado para dentro de casa, correspondendo a 90,2% do limite nominal determinado pelo RCCTE. Este nível de cumprimento das necessidades da casa reflecte-se no ganho de 3 °C na temperatura média da casa entre as semanas de Fevereiro de 2010 e de 2011 apresentadas na secção 4.2.1 e no conforto reportado pelos ocupantes da casa.

No entanto, mesmo com este ganho a temperatura média da casa na época de aquecimento foi de 16,4 °C durante o período de aquisição de dados. Com efeito, apesar de ter atingido médias de 20 °C em algumas semanas do ano – por exemplo entre 9 e 16 de Outubro de 2010 – na maior parte do tempo esteve entre os 16 e os 17 °C de média semanal, chegando aos 15 °C no pico do Inverno. Quando comparado com um nível de cumprimento das necessidades limite de 90% do definido no RCCTE seria de esperar temperaturas médias da ordem dos 19 °C, correspondentes a 90% dos 21 °C utilizados nesse cálculo. Levanta-se assim uma questão sobre a adequação do modelo descrito no RCCTE para a determinação das reais necessidades de aquecimento de uma casa; no entanto, este tema não será explorado em maior detalhe neste trabalho devido ao facto de que sai bastante fora do âmbito desta tese, onde o RCCTE é apenas utilizado como referência indicativa.

Para além disso, nas zonas não aquecidas da casa ainda se verificam temperaturas bastante baixas, e dada a potência disponível não seria viável utilizar este colector para as aquecer; para além disso, apesar do bom nível de desempenho do colector, não se conseguiu cumprir a totalidade das necessidades de aquecimento, pelo que seria desejável melhorar tanto o seu funcionamento como a sua construção. No caso do funcionamento, este pode ser facilmente ajustado alterando os parâmetros descritos na secção 3.2.2, sendo esse um dos objectivos declarados deste trabalho; possíveis ajustes serão explorados na secção 4.3.2. Possíveis alterações na construção, no entanto, necessitariam de um trabalho mais detalhado, abrangendo desde os materiais utilizados até à optimização do fluxo de ar no colector, pelo que neste trabalho serão aproximados apenas de forma leve e deixados para investigação futura.

4.3.2 Análise crítica dos parâmetros de funcionamento

A optimização dos parâmetros de funcionamento poderá ser suficiente para assegurar o cumprimento total das necessidades de aquecimento previstas pelo RCCTE ([4]) e atingir o conforto óptimo para os ocupantes da casa assegurando sempre um valor de COP positivo, e de preferência superior a 10. Este limite serve para garantir que o custo de operação do colector é substancialmente inferior ao dos sistemas disponíveis no mercado para garantir que tem retorno financeiro, pelo que servirá de referência constante.

Tendo então em conta o consumo estimado de 95 W do sistema de ventilação e controlo (secção 3.2.3), o COP mínimo que o sistema apresenta actualmente é de 12,5, correspondente ao valor mínimo de potência injectada de 1183 $\pm$ 587 W. Este resultado sugere que os parâmetros de operação (em particular a diferença mínima de temperatura necessária para injectar calor na casa) poderiam ser relaxados, melhorando o desempenho do colector nos dias mais frios – que, tendencialmente, serão também os dias com menor insolação e por conseguinte menor aquecimento do colector. Considerando-se necessária uma margem de temperaturas suficiente para garantir que o colector não esgota a sua reserva de calor demasiado depressa, um valor possivelmente mais interessante seria da ordem dos 3 ou 4 °C em vez dos 5 °C actualmente utilizados.

Com base nas aquisições efectuadas, activar o colector com uma diferença de 4 °C resultaria numa subida do *duty cycle* do colector dos actuais 21,1% para 30,9%, aumentando o tempo de operação do colector e por conseguinte o calor injectado. No entanto, activar o colector mais cedo implica um menor tempo de acumulação de energia antes de este entrar em funcionamento, resultando numa menor reserva de energia, menores períodos de funcionamento e daí possivelmente um *duty cycle* mais baixo do que o estimado. Para além disto, activando a potências mais baixas levaria a uma potência média mais baixa; um limiar mínimo de 4 °C resultaria numa potência injectada mínima de 964 W, o que ainda resulta num COP de 10,1 – respeitando o limite definido e compensando a potência consumida no sistema de ventilação e controlo.

De forma a ganhar alguma sensibilidade sobre os resultados de uma possível descida do limiar para 4 °C desenharam-se três cenários simples com vista a avaliar o grau de cumprimento das necessidades térmicas da casa sob várias condições. Dois destes cenários representam os extremos (um em que se mantém a potência média mas o *duty cycle* sofre uma queda forte e outro onde acontece o inverso) e o terceiro representa um cenário equiibrado tido como mais provável. Os resultados destes cenários resumem-se na tabela 4.10.

Em qualquer dos cenários as necessidades de aquecimento seriam cumpridas total ou quase to-

Cenário	1	2	3
Potência média	1445 W	1100 W	1273 W
Δ	0,0%	-23,9%	-11,9%
Duty cycle	23,0%	30,9%	26,9%
Δ	-25,5%	0,0%	-12,7%
% N_{ic}	98,2%	100,3%	101,2%

Tabela 4.10: Cenários possíveis de cumprimento das necessidades de aquecimento da casa para limiar mínimo de 4 °C

talmente, o que leva à conclusão de que uma redução do limiar mínimo de temperatura levaria a um aquecimento mais eficaz da casa sem sacrificar o rendimento energético do sistema. Este resultado não é surpreendente dado que uma diferença de 4 °C é substancial, permitindo um impacto imediato no conforto da casa e um ganho térmico assinalável sem sacrificar o valor económico do colector.

4.3.3 Avaliação económica do desempenho do colector

Estando já estabelecido nas secções 4.2.1 e 4.3.1 que o colector aqui proposto tem um impacto substancial na temperatura da casa e no conforto dos seus ocupantes, torna-se necessário avaliar o retorno financeiro associado de forma a determinar se se justifica a instalação do colector e a que prazo. Para isto o sistema terá de ser comparado com as alternativas descritas na secção 1.4 em termos do tempo que demora até compensar o custo do colector; os resultados estão apresentados na tabela 4.11. O tempo de retorno do colector proposto foi calculado tomando como referência as necessidades de aquecimento anuais calculadas de acordo com o RCCTE (secção 3.1.2). Considerando que num ano de operação cada sistema teria de fornecer 2966 kWh anuais de aquecimento, calculou-se o custo total de cada sistema ao longo da sua vida útil – incluindo o custo inicial do equipamento e o seu custo de operação – e determinou-se o ponto em que o sistema proposto apresentaria o mesmo custo total e teria fornecido a mesma quantidade de energia calorífica à casa. Apesar do custo inicial ser superior para o sistema proposto, o custo de operação é substancialmente mais baixo do que o das restantes opções pelo que a partir desse ponto o sistema proposto terá um custo total inferior ao das alternativas.

Equipamento	Custo inicial	Custo / kW	Custo / kWh	Tempo de retorno
Sistema proposto	€3.276,00	€2.280,47	€0,009	N/A
Solar Sponge*	€2.390,53	€1.668,67	€0,057	6 anos e 2 meses
Kunft NYL12	€22,00	€18,33	€0,139	8 anos e 5 meses
Galp Hotspot	€126,00	€74,12	€0,165	6 anos e 10 meses

Tabela 4.11: Tempos de retorno médios para o colector proposto comparado com alternativas

É claro então que o sistema proposto tem um retorno bastante razoável face às alternativas não renováveis – entre 6 e 8,5 anos, o que tendo em conta um tempo de vida esperado de 20-30 anos

para o colector, é claramente positivo. Para além disso, o colector aquece 4 divisões ao mesmo tempo e melhora a circulação do ar, tendo efeitos positivos na humidade sentida dentro de casa, coisa que nenhum dos aquecedores clássicos faz. Convém notar que o sistema Solar Sponge foi escalado de forma a apresentar a mesma potência que o sistema proposto, o que implicou um aumento dos custos de instalação e de operação, estes últimos devido à necessidade de instalar mais ventoinhas e daí decorrer um aumento do consumo energético.

Ainda assim, o custo por kW de potência instalado no Solar Sponge é cerca de 27% mais baixo do que o do sistema proposto. Explorando as diferenças entre os sistemas, há três que saltam à vista: primeiro, a existência de uma placa de absorção dedicada no Solar Sponge, permitindo uma melhor eficiência na recolha da luz solar e como tal um sistema mais pequeno e com um custo por kW instalado inferior; em seguida, o sistema de ventilação é substancialmente mais fraco, impondo um caudal muito inferior mas reduzindo os custos de construção mais ainda; e por último, o facto de o Solar Sponge apenas aquecer uma divisão em vez das 4 que o sistema proposto actualmente aquece.

Ao passo que esta última diferença foi controlada na conversão do sistema para esta comparação, as primeiras duas são bastante relevantes. A diferença dos sistemas de ventilação, por si, acaba por funcionar contra o Solar Sponge, dado que a diferença de custos de operação de 0,9 para 5,7 cêntimos – 6,3 vezes superior – acaba por garantir que em pouco mais de 6 anos o sistema proposto é economicamente mais rentável. No entanto, a existência de uma placa de absorção parece ser uma forma simples e barata de baixar o custo de instalação para o mesmo nível de potência, permitindo colectores mais pequenos e mais eficientes.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Resultados obtidos

Os resultados obtidos permitiram confirmar e descrever o funcionamento do colector de uma forma exaustiva e rigorosa. Ao longo do trabalho aqui desenvolvido foi demonstrado o funcionamento do colector, a sua potência injectada e rendimento e foram explorados possíveis ajustes aos seus parâmetros de funcionamento, tendo-se cumprido todos os objectivos propostos. Ao longo das próximas secções, esses objectivos serão revistos e serão retiradas as conclusões adequadas.

Cumprimento dos objectivos

Os três objectivos principais enunciados na secção 1.1 eram:

1. Desenhar um colector solar térmico para aquecimento habitacional e estimar o seu desempenho;
2. Instalar e operar o colector solar;
3. Avaliar o seu funcionamento com vista a:

    Melhorar os parâmetros de operação e o rendimento do colector;

    Equacionar a possibilidade de lançar um produto no mercado baseado neste colector.

Analisemos cada objectivo individualmente.

Desenhar um colector solar térmico para aquecimento habitacional e estimar o seu desempenho

O desenho e a instalação do sistema proposto estão detalhados no capítulo 3, bem como as estimativas de potência injectada e de rendimento. A concepção do colector correu como o previsto, tendo-se determinado a orientação óptima para o objectivo desejado – aquecer a casa nas alturas mais frias do ano – tendo em conta as restrições arquitectónicas existentes. O desenho elaborado ainda conseguiu ser cerca de 72% mais barato de instalar do que um sistema solar térmico a água, por piso radiante,

apresentando o sistema proposto um custo de €3.267 contra €11.552 no cenário mais barato para o sistema solar térmico clássico, e tendo um custo de operação 77% mais barato (1,3 vs 5,6 cêntimos por hora). No entanto, comparando com as alternativas directas – tanto a luz solar como eléctrico e a gás – o custo de instalação é muito superior mas o de operação compara favoravelmente: 0,9 cêntimos por kWh de energia injectada contra 1,9 cêntimos para o Solar Sponge, 13,9 cêntimos para aquecedores eléctricos e 16,5 cêntimos para aquecedores a gás, sendo o sistema proposto claramente mais barato de operar do que os restantes.

A potência e o rendimento estimados estavam também alinhados com os resultados medidos experimentalmente, prevendo-se na secção 3.3.1 uma potência mínima de 1.180,7 W e máxima de 2266,4 W, correspondendo a um rendimento entre 12,4 e 23,9. Esta gama de potências poderia ser melhorada através de uma construção diferente e de um ajuste aos parâmetros de controlo, sem prejuízo grande para o rendimento, mas ainda assim está alinhada com os equipamentos de aquecimento individuais existentes no mercado actualmente.

Instalar e operar o colector solar

Após a descrição da instalação do colector no capítulo 3, na secção 4.1 foram apresentadas algumas aquisições chave para explorar e entender o funcionamento do colector. Essas aquisições foram feitas ao longo de um período de 14 meses, demonstrando-se que o colector opera como esperado e sem falhas em quaisquer condições atmosféricas. Ao longo dessa operação mediu-se uma potência média de 1445 ± 622 W, em linha com as potências de sistemas de aquecimento individuais mas algo abaixo de sistemas normalmente utilizados para aquecimento de uma casa completa. No entanto, dado o baixíssimo custo de operação deste colector e à segurança com que se pode deixá-lo operar sozinho - tem apenas uma parte móvel e não contém nenhum combustível passível de explodir – o colector pode estar ligado o ano todo e a aquecer a casa sempre que possível, pelo que o efeito final sobre a casa acaba por ser comparável a um custo muito mais baixo.

Avaliar o seu funcionamento

Com os actuais parâmetros de funcionamento o sistema proposto conseguiu cumprir 90,2% das necessidades nominais de aquecimento com um custo de operação anual muito reduzido ([4]). Como vimos na secção 4.3.2, uma redução do limiar de aquecimento para 4 °C permitiria cumprir a totalidade das necessidades de aquecimento com um aumento de custos muito reduzido – e sempre abaixo das alternativas clássicas. Outra aternativa, mais dispendiosa mas potencialmente mais eficaz, seria a instalação de uma placa de absorção metálica coberta com um revestimento selectivo de forma a

maximizar a sua absorção de calor; esta alternativa não foi explorada em detalhe devido aos custos implicados e à complexidade da questão, pelo que fica em aberto. A comparação com o Solar Sponge sugere, no entanto, que tem potencial para melhorar significativamente o desempenho do colector proposto.

Quanto às temperaturas definidas como limiares de “casa quente” e “casa fria” (respectivamente 24 e 21 °C), estão um pouco desalinhadas com o RCCTE, que prescreve 25 e 20°C respectivamente. No entanto, isto é uma opção pessoal do proprietário da casa, pelo que não se discutiram ajustes a esses limites.

5.1.1 Conclusões finais

Conclui-se assim que o sistema proposto funcionou de acordo com o esperado, com um ganho médio mensal de 1,2 °C da temperatura média da casa e com um impacto assinalável no conforto térmico dos ocupantes da casa a um custo comparativamente reduzido face às alternativas usuais. O desempenho do sistema pode ainda ser afinado e melhorado, tendo sido proposta uma alteração aos parâmetros operativos que poderia assegurar essa melhoria, esperando-se que essa alteração potencie ainda mais a eficácia do sistema.

Para além disso, determinou-se que o colector tem um retorno financeiro a um prazo razoável – 6 a 8,5 anos dependendo da fonte de energia que substitui.

5.2 Perspectivas futuras

5.2.1 Desenvolvimento do colector

A curto prazo deverá ser desenvolvido um sistema de controlo da velocidade do sistema de ventilação e de alimentação da ventoinha recorrendo a painéis fotovoltaicos. Esta melhoria permitiria reduzir o custo de operação do colector para zero, melhorando ainda mais o tempo de retorno do colector face aos sistemas clássicos e ainda controlar o ruído de operação do colector. Esta melhoria apresenta alguns desafios técnicos devido ao funcionamento interno do ventilador, sendo necessário desenvolver um inversor adaptado às circunstâncias.

No futuro, o desenvolvimento do colector deve passar por uma avaliação mais exaustiva da placa de absorção e do percurso do ar dentro do colector, podendo ambos ser optimizados. No entanto, esta optimização deve obedecer a um controlo de custos apertado dada a facilidade com que os custos de instalação podem aumentar rapidamente com a adição de mais material, pelo que qualquer optimização deve ser simulada numericamente antes de ser implementada. Em paralelo, os parâmetros

de funcionamento do colector deverão ser ajustados de acordo com os propostos na secção 4.3.2; em conjunto, estas duas alterações poderão vir a resultar num sistema bastante competitivo no mercado nacional.

Outra possibilidade de melhoria do sistema proposto passa pela instalação de concentradores, de forma a aumentar a área eficaz de exposição solar e daí o rendimento energético do sistema. Um sistema destes poderá vir a ser necessário para viabilizar a implementação do colector em ambientes urbanos, onde o espaço de parede exposta a Sul é mais exíguo do que na zona de Sesimbra. Tal alteração deve também seguir um controlo apertado de custos, já que um sistema de concentração eficaz não é simples de instalar nem operar.

5.2.2 Lançamento no mercado

Quanto ao lançamento deste sistema no mercado, já desde a sua concepção que ele apresentava um potencial claro de comercialização; agora que o seu funcionamento está documentado, coloca-se então a hipótese de construir um projecto em torno dele para eventualmente lançar uma empresa, ou pelo menos lançar o produto através de uma empresa estabelecida. Para que isto aconteça, será necessário replicar os resultados noutra zona do país para se demonstrar que o sistema funciona em outras situações – ambientes urbanos, por exemplo. Essas situações provavelmente precisarão de ajustes ao posicionamento, dimensionamento e construção do colector, mas nada disso é impeditivo. Para demonstrar esta flexibilidade, vai-se tentar implementar um colector semelhante na casa alternativa mencionada na secção 3.1; os materiais de construção, padrão de utilização e área circundante são bastante diferentes mas a configuração da casa é razoavelmente semelhante, pelo que seria possível testar lá o colector em condições diferentes.

Pensando mais a longo prazo, o sistema aqui descrito pode ser aplicado facilmente em quase qualquer parte do mundo para aquecimento de casas. Para latitudes mais altas – perto do círculo polar Ártico por exemplo – o colector poderia resultar demasiado grande para ser prático, devido à fraca potência incidente, e junto ao Equador não teria muita procura, mas nas latitudes temperadas, tanto no hemisfério Norte como no Sul, seria simples adaptá-lo às necessidades e às possibilidades locais.

Sendo de esperar que no futuro os incentivos fiscais às energias renováveis sejam reintroduzidos – apesar da crise financeira que a Europa actualmente atravessa os acordos de Kyoto ainda estão em vigor e ratificados por 191 países, bem como várias outras metas definidas entretanto – este sistema poderá vir a ter algum sucesso no mercado de aquecimento.

Bibliografia

[1] Wong, L. T. e Chow, W. K, *Solar radiation model*, Applied Energy **69** (2001) 191–224

[2] Furler, R., *Angular dependence of optical properties of homogenous glasses*, ASHRAE Transactions **97 - pt 2** (1991) 191–224

[3] EDP Serviço Universal, *Tarifas Baixa Tensão Normal* - `http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx` (11 de Outubro de 2012)

[4] Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, Decreto-Lei nº 80 / 2006 de 4 de Abril - `http://www.rccte.com` (11 de Outubro de 2012)

[5] Instituto de Metereologia, *Normais Climatológicas 1981-2010* - `http://www.meteo.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/019/` (11 de Outubro de 2012)

[6] Duffie, J. e Beckman, W., *Solar engineering of thermal processes*, 2ª edição (1980), Wiley, ISBN: 978-0-471-69867-8

[7] Instituto Nacional de Estatística e Direcção Gera de Energia e Geologia, *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico* (2010), Lisboa, Portugal, ISBN: 978-989-25-0130-7

[8] ADENE, *Medida Solar Térmico 2010 - Perguntas Frequentes* (2010) - `http://www.paineissolares.gov.pt/faq.html#2r` (12 de Outubro de 2012)

[9] Wondrausch, G., *Solar thermal for space heating*, YouGen (2009) `http://www.yougen.co.uk/blog-entry/1317/Solar+thermal+for+space+heating/` (13 de Outubro de 2012)

[10] European Solar Thermal Industry Federation, *Solar Thermal Markets in Europe – Trends and Market Statistics 2009* (2010), Bruxelas, Bélgica, `http://www.erec.org/renewable-energy/solar-thermal.html` (12 de Outubro de 2012)

[11] European Renewable Energy Council, *Renewable Energy in Europe: Building Markets and Capacity*, James & James (2004), Londres, Reino Unido.

[12] Loja Online Worten, *Irradiador a óleo KUFNT NYL12*, http://www.worten.pt/ProductDetail.aspx?pid=04115445&oid=9|85&c=1700637 (11 de Outubro de 2012)

[13] Galp, *Hotspot - Aquecedor para interiores*, http://www.galpenergia.com/PT/ProdutosServicos/Produtos/EquipamentosGas/Aquecimento/Paginas/Hotspot-para-interiores.aspx (11 de Outubro de 2012)

[14] Lar Térmico, *Energias Renováveis - Energia Solar*, http://www.lartermico.pt/index.php?mod=articles&action=viewArticle&article_id=148&category_id=58 (12 de Outubro de 2012)

[15] Sonnenkraft, *Bomba solar - como funciona*, http://www.sonnenkraft.pt/particulares/as-solucoes/bomba-de-calor-solar/como-funciona/ (14 de Outubro de 2012)

[16] LusoCol, *Tabela comparativa de eficiência de colectores solares com Keymark no mercado Português*, http://www.lusosol.com/efficiency.htm (10 de Outubro de 2012)

[17] Luxmagna, *Catálogo de acumuladores* (2012), http://www.luxmagna.pt/pdfs/LM_acumuladores.pdf (13 de Outubro de 2012)

[18] Ariston, *Catálogo tarifa água quente sanitária* (2012), http://www.aristonheating.com.pt/products/pdf/tarifas/AQS_Portugal_Mar%C3%A7o_2012.pdf (13 de Outubro de 2012)

[19] SaniLuz, *Tabela de preços solar* (2010), http://www.saniluz.pt/uploads/tabela_vulcano_solar_2010.pdf (13 de Outubro de 2012)

[20] Pixmania, http://www.pixmania.com/rega-bombas-e-acessorios-para-bomba/ptpt1_44_2043_11465_0_0_0_00_sg.html?sSortInfo=Prix-ASC (13 de Outubro de 2012)

[21] Silva, P., *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE* (2010), Universidade do Minho

[22] Barros, H., *Estudo e avaliação das componentes térmicas na utilização de energia em edifícios* (2009), Universidade da Madeira

[23] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, ASHRAE (1997), Atlanta, EUA

[24] Hollick, J. C. *Método e aparelho para o pré-aquecimento do ar de ventilação de um edifício* (2005), patente número PT 1596138 E

[25] McCullough et al, *Solar air heater* (1981), patente número US 4262657

[26] McAlaster, R. J., *Solar air collector* (1982), patente número US 4313429

[27] Mohamad, A. A., *High efficiency solar air heater*, Solar Energy **60 - No. 2** (1997) 71–76

[28] LNEG (2005), *Edifício SOLAR XXI - Um edifício energeticamente eficiente em Portugal* - `http://www.lneg.pt/download/4078/BrochuraSolarXXI_Dezembro2005.pdf` (22 de Outubro de 2012), Lisboa, Portugal

[29] Conserval Engineering Inc., *Solar Wall* - `http://solarwall.com/en/home.php` (16 de Novembro de 2012), New York, EUA

[30] Q Solar, *A3A* - `http://www.q-solar.com/services/s-solar-air-heater-q-solar-a3a.html` (16 de Novembro de 2012), Victoria Point, Austrália

[31] SolarSponge - `http://www.solarsponge.com/` (16 de Novembro de 2012), Sydney, Austrália

Anexo A

Aquisições completas

Apresentam-se aqui todas as aquisições válidas feitas ao longo da experiência em formato gráfico.

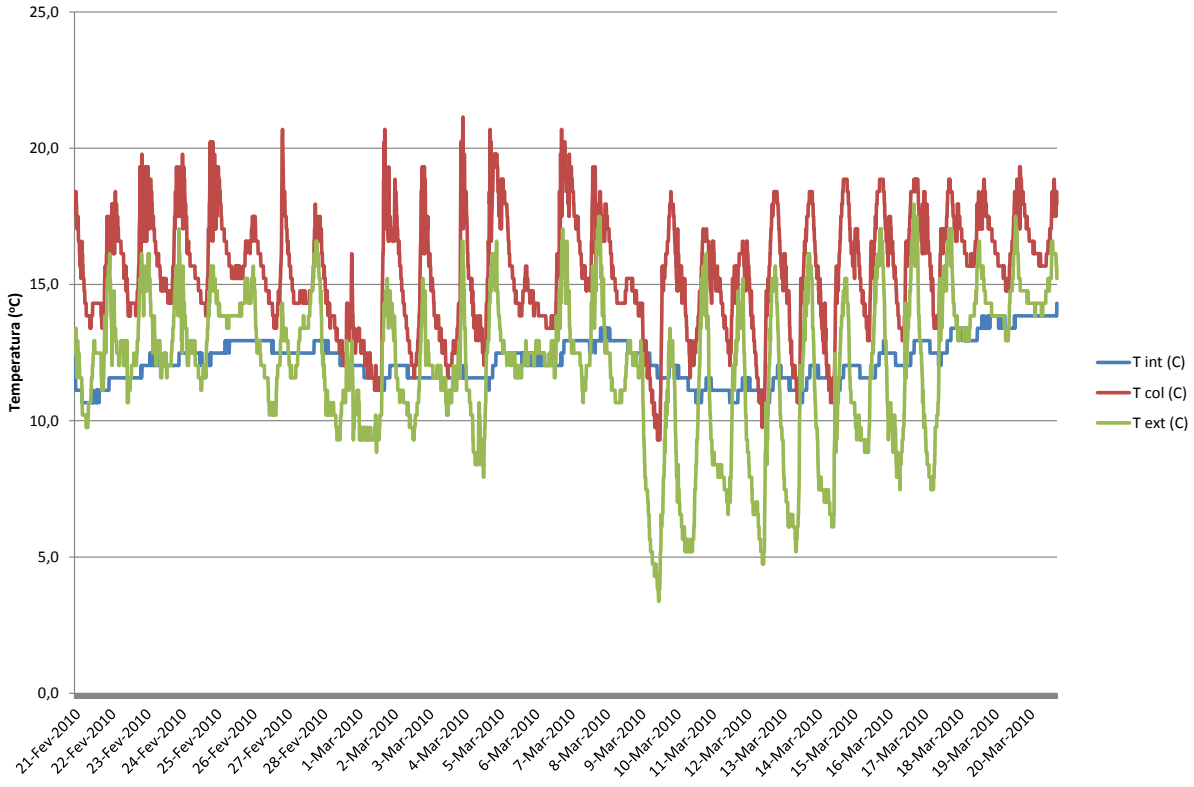


Figura A-1: Aquisição entre 20 Fevereiro e 20 Março 2010

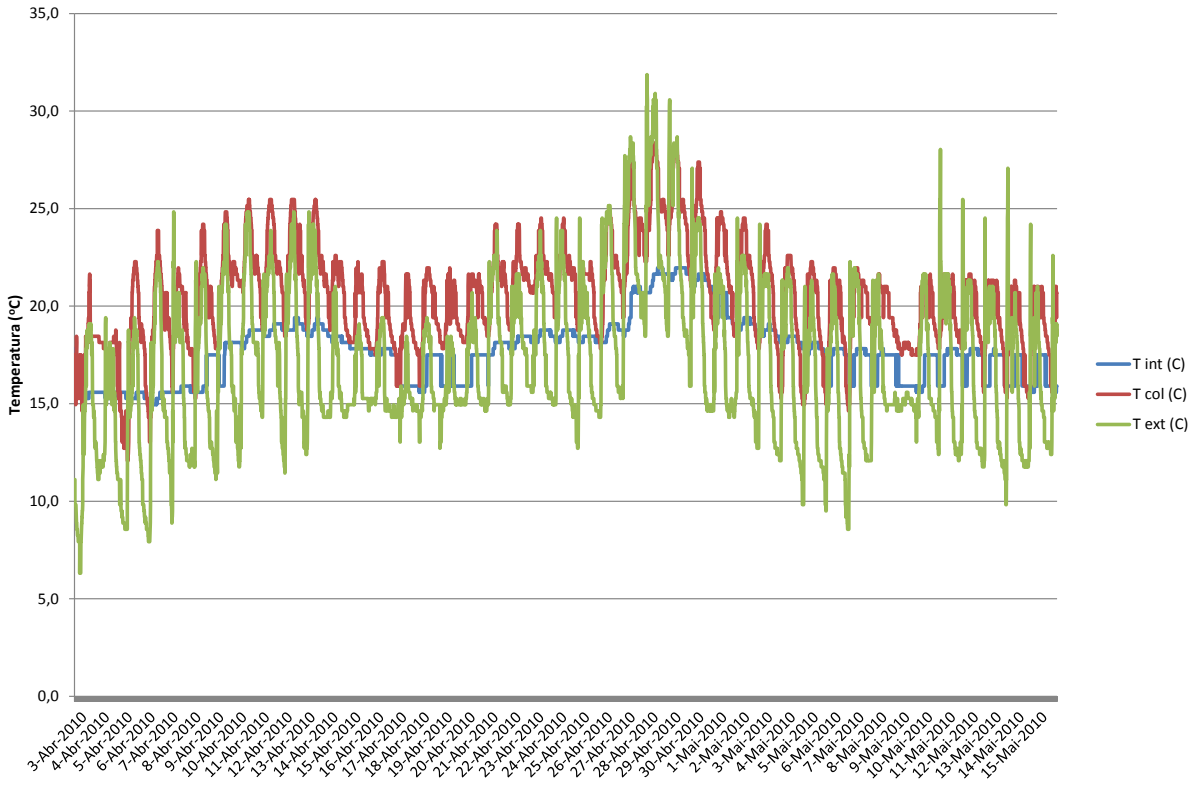


Figura A-2: Aquisição entre 2 Abril e 15 Maio 2010

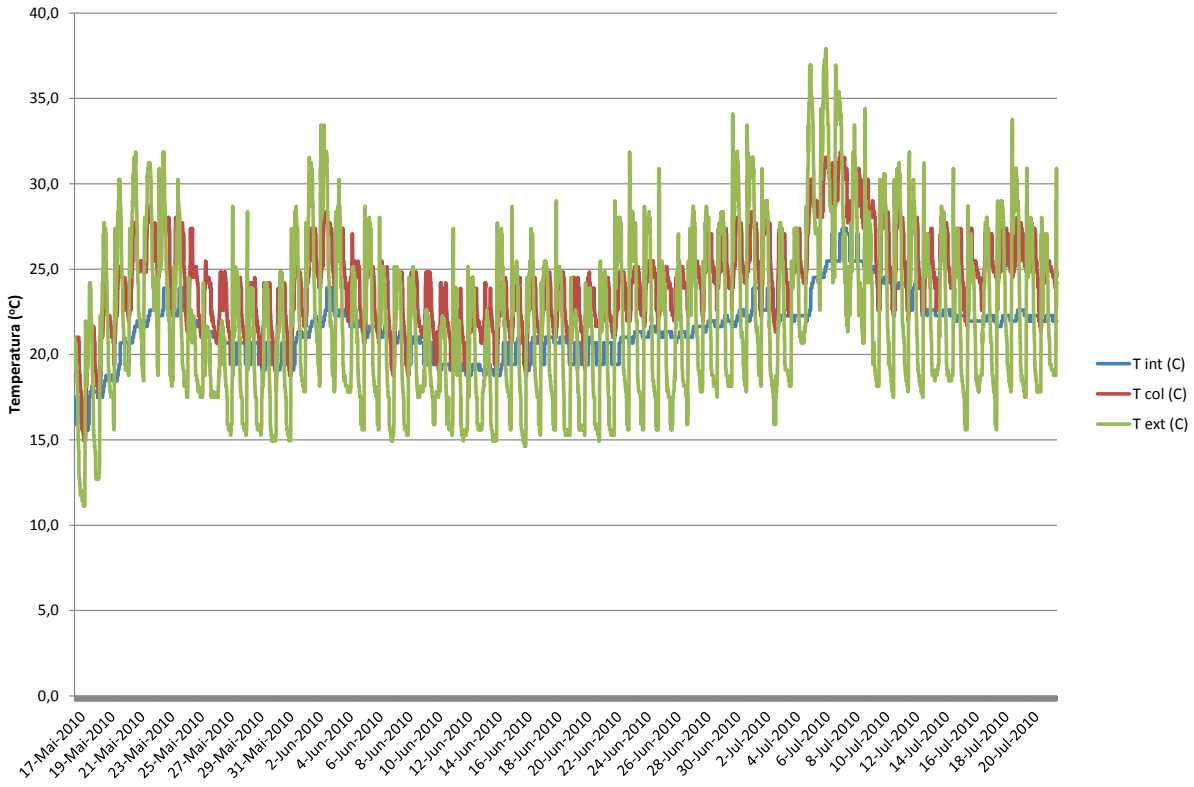


Figura A-3: Aquisição entre 16 Maio e 21 Julho 2010

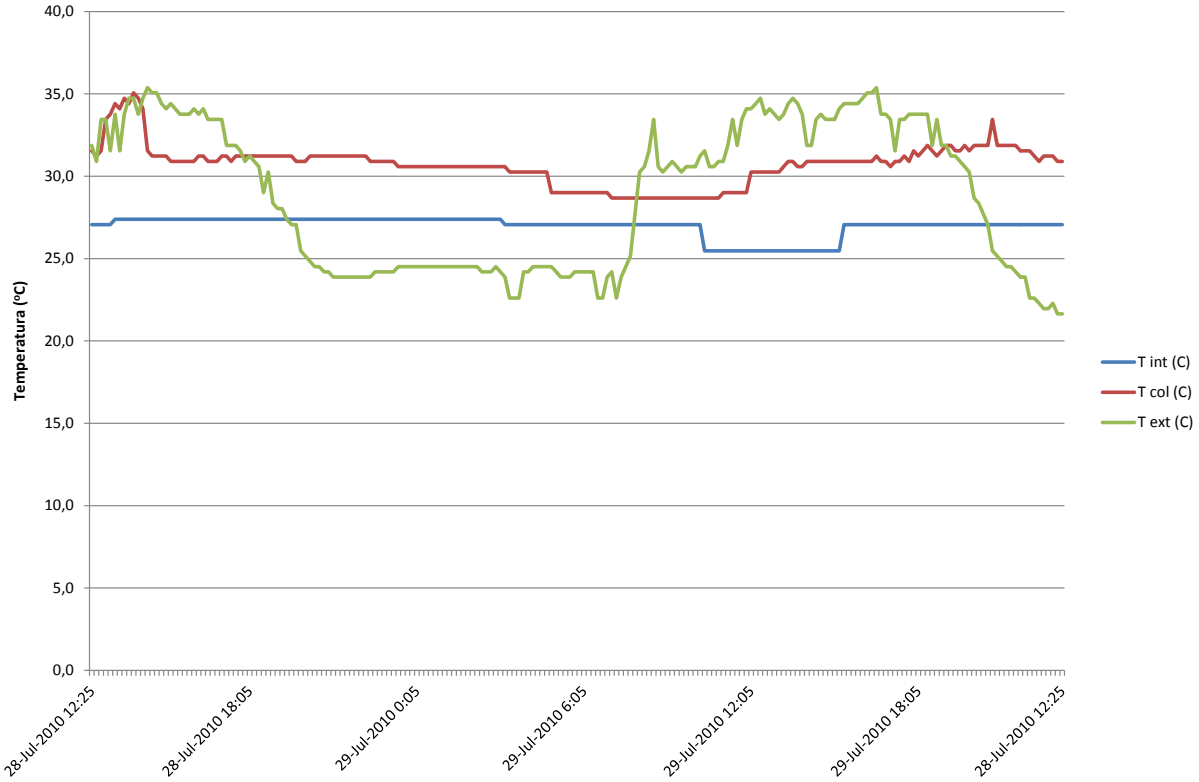


Figura A-4: Aquisição entre 28 Julho e 29 Julho 2010

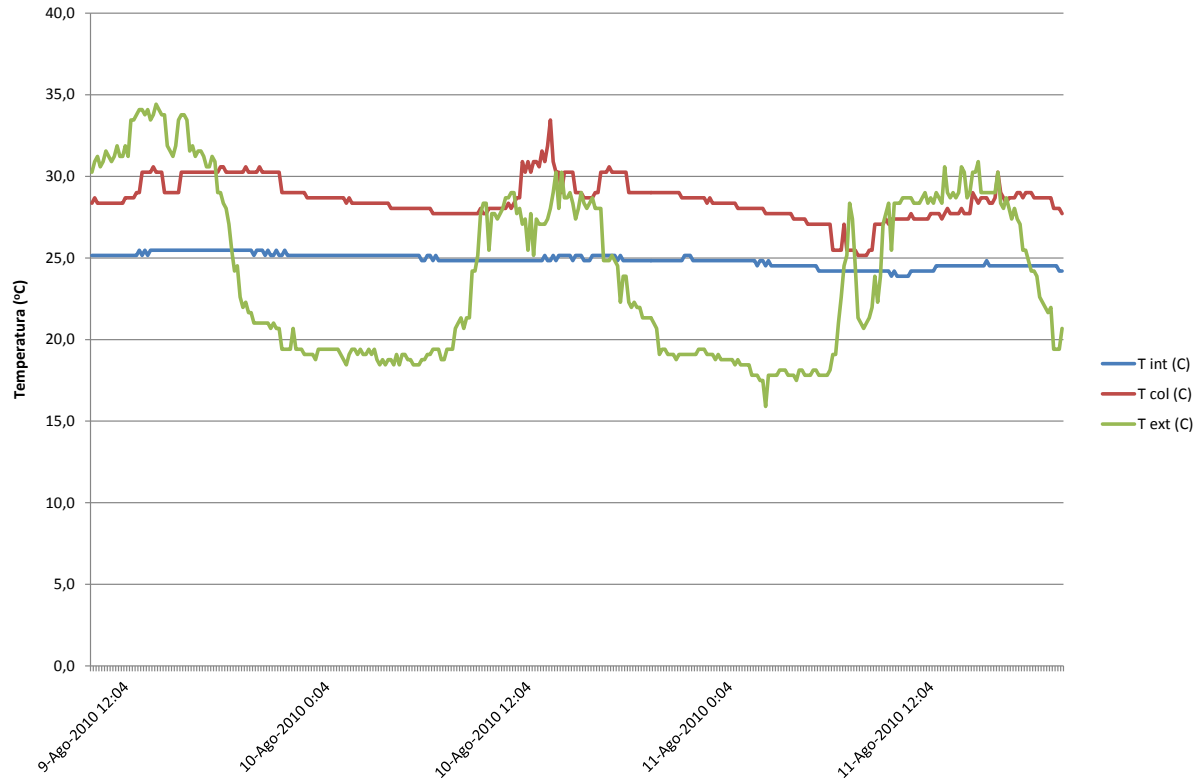


Figura A-5: Aquisição entre 9 Agosto e 11 Agosto 2010

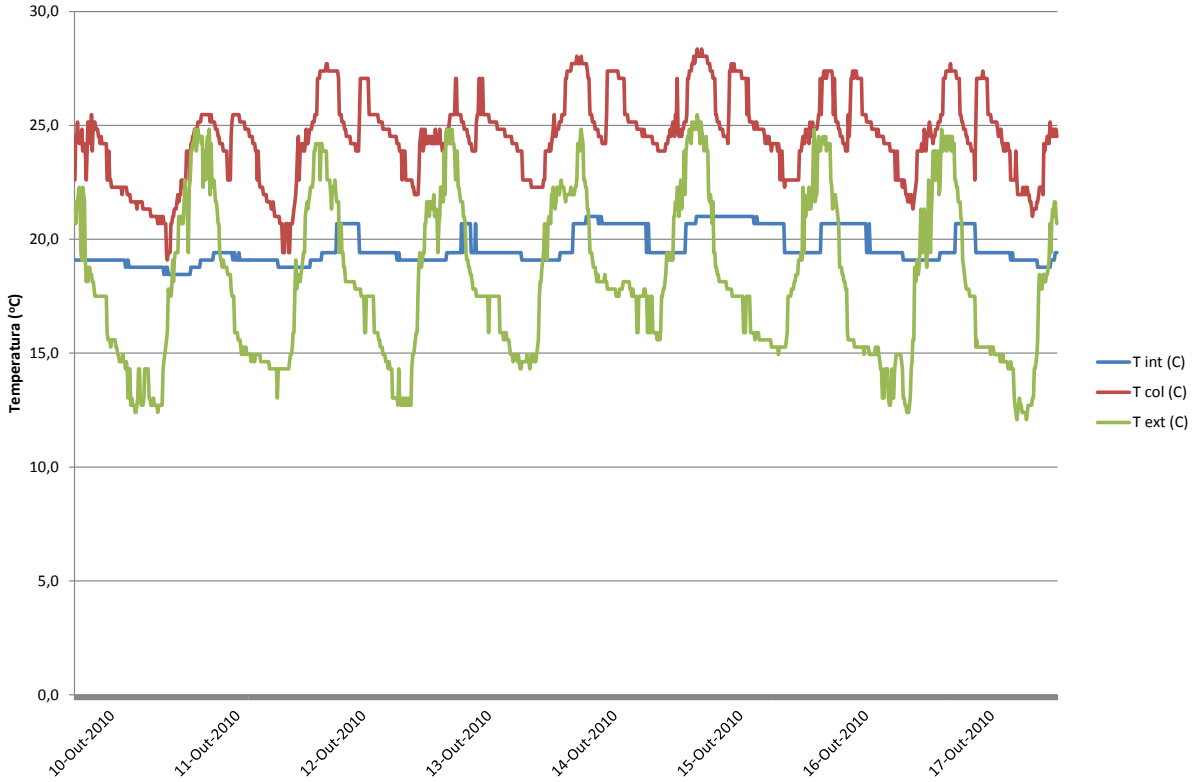


Figura A-6: Aquisição entre 9 Outubro e 17 Outubro 2010

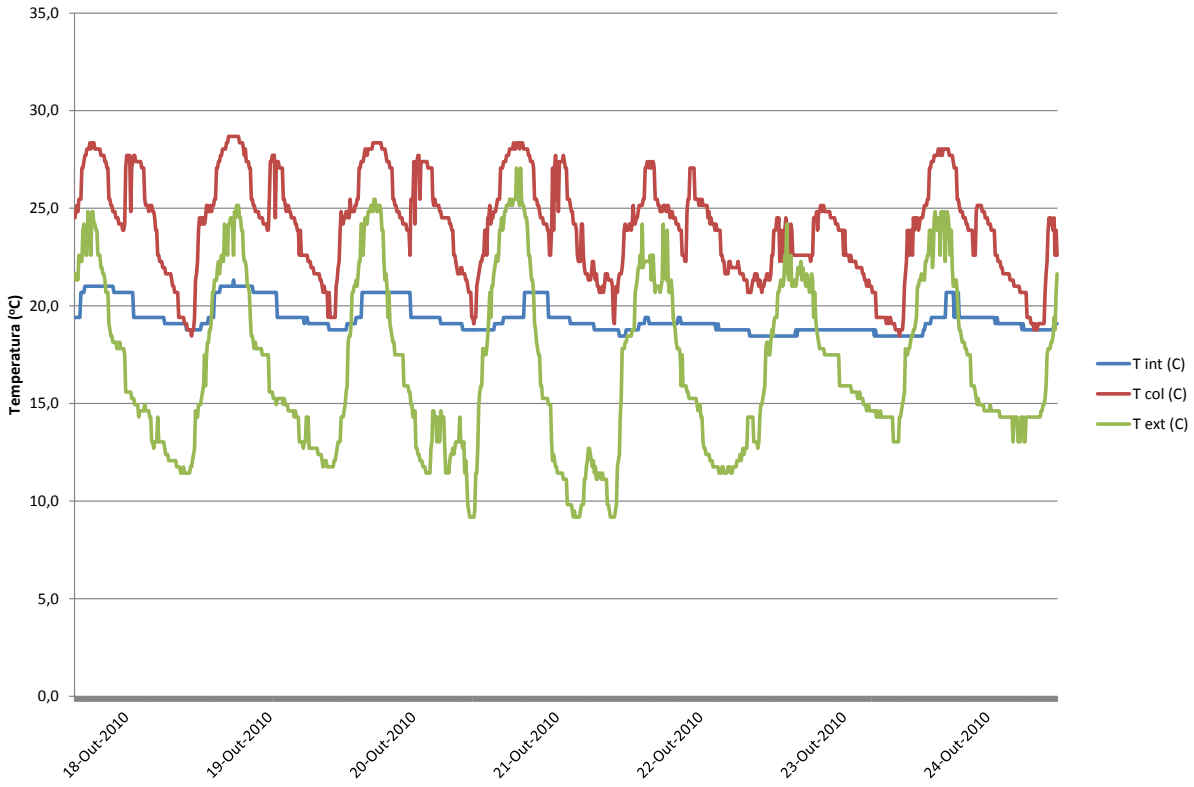


Figura A-7: Aquisição entre 17 Outubro e 24 Outubro 2010

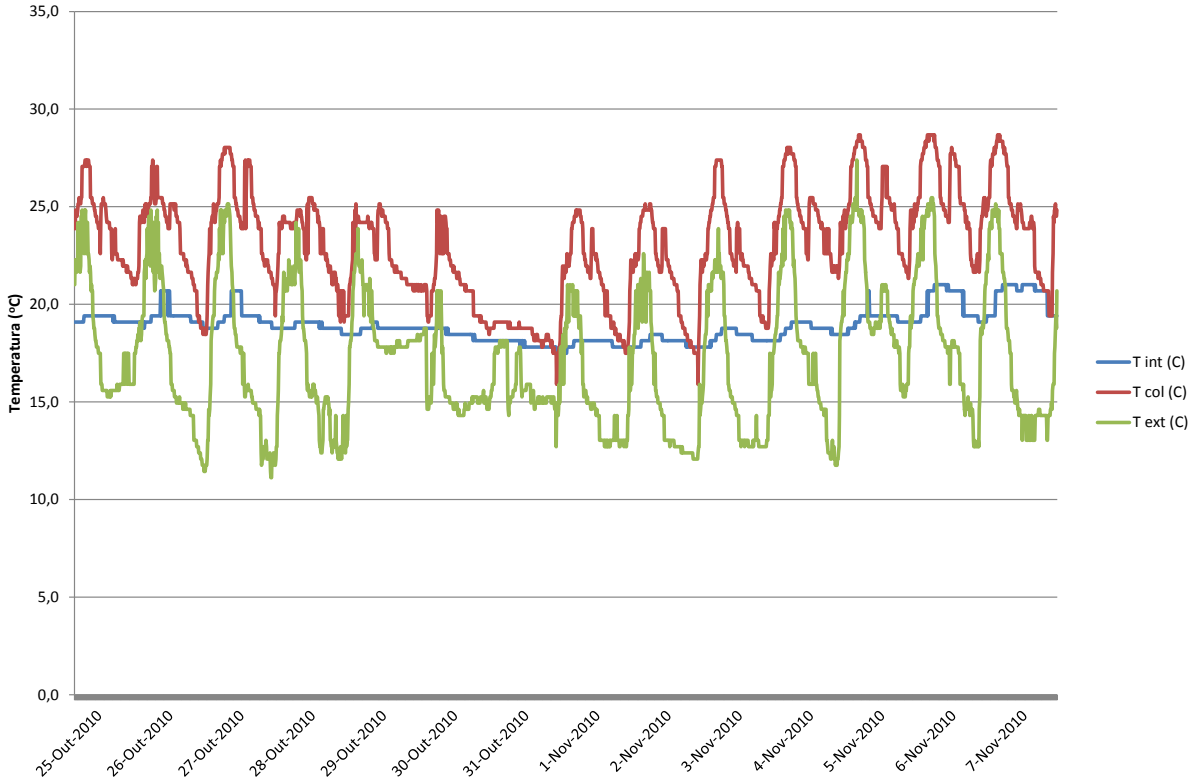


Figura A-8: Aquisição entre 24 Outubro e 7 Novembro 2010

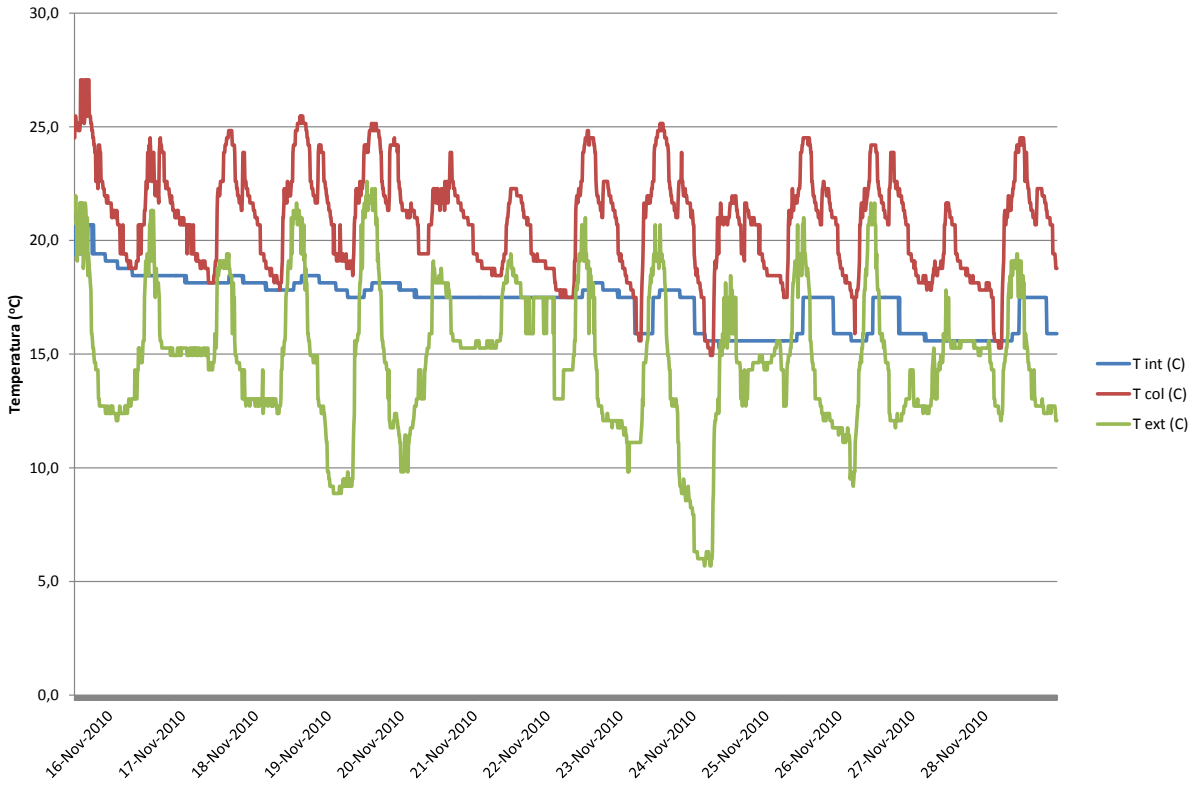


Figura A-9: Aquisição entre 15 Novembro e 28 Novembro 2010

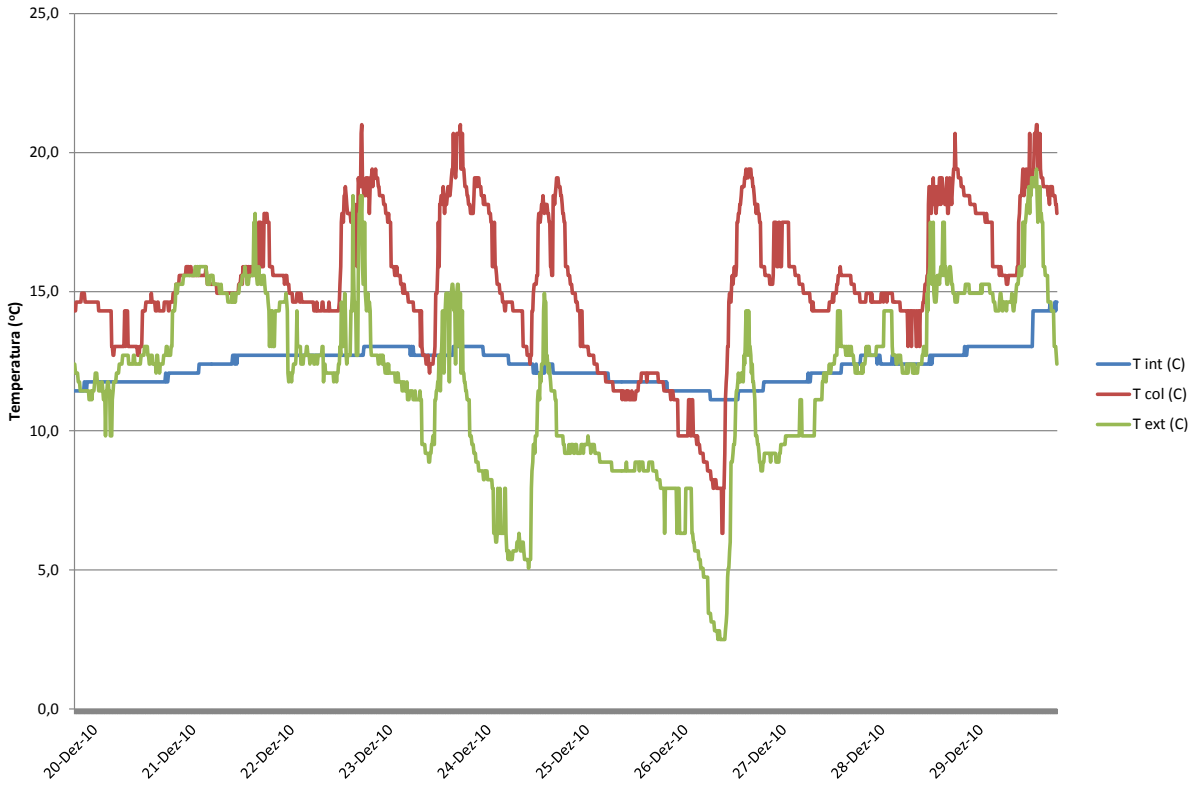


Figura A-10: Aquisição entre 19 Dezembro e 29 Dezembro 2010

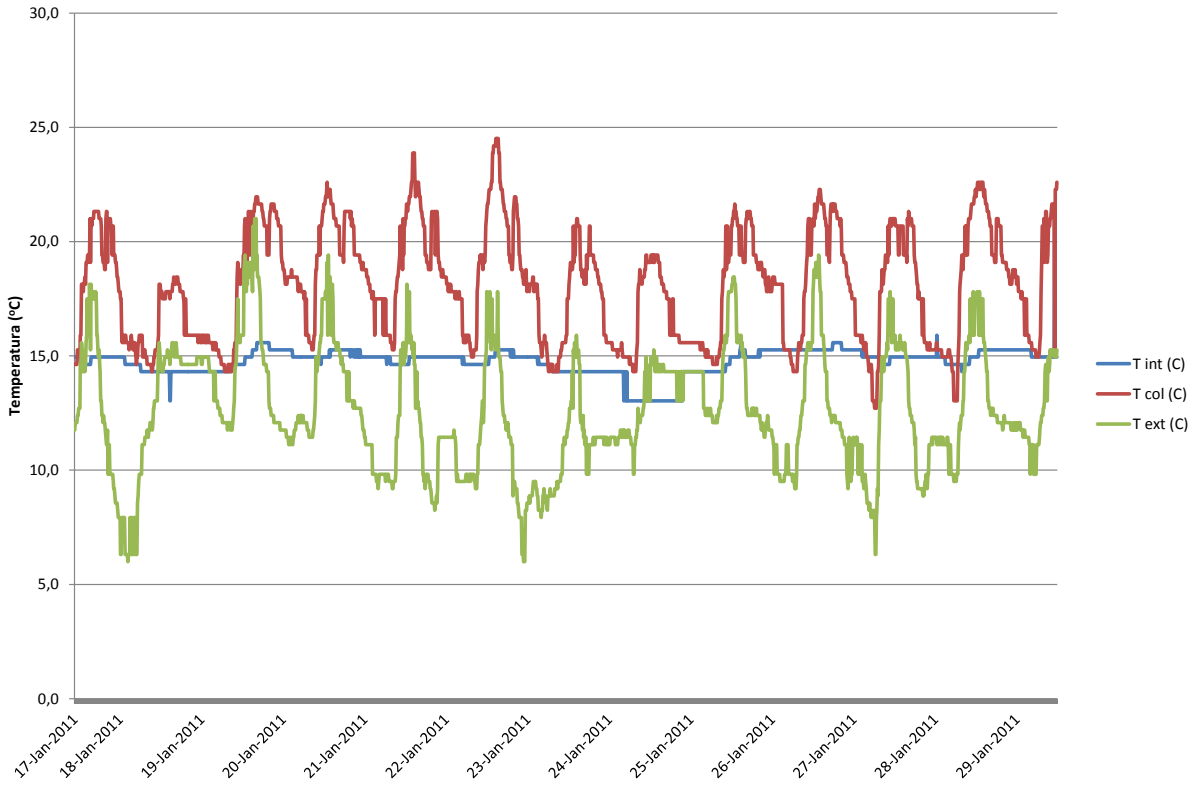


Figura A-11: Aquisição entre 17 Janeiro e 29 Janeiro 2011

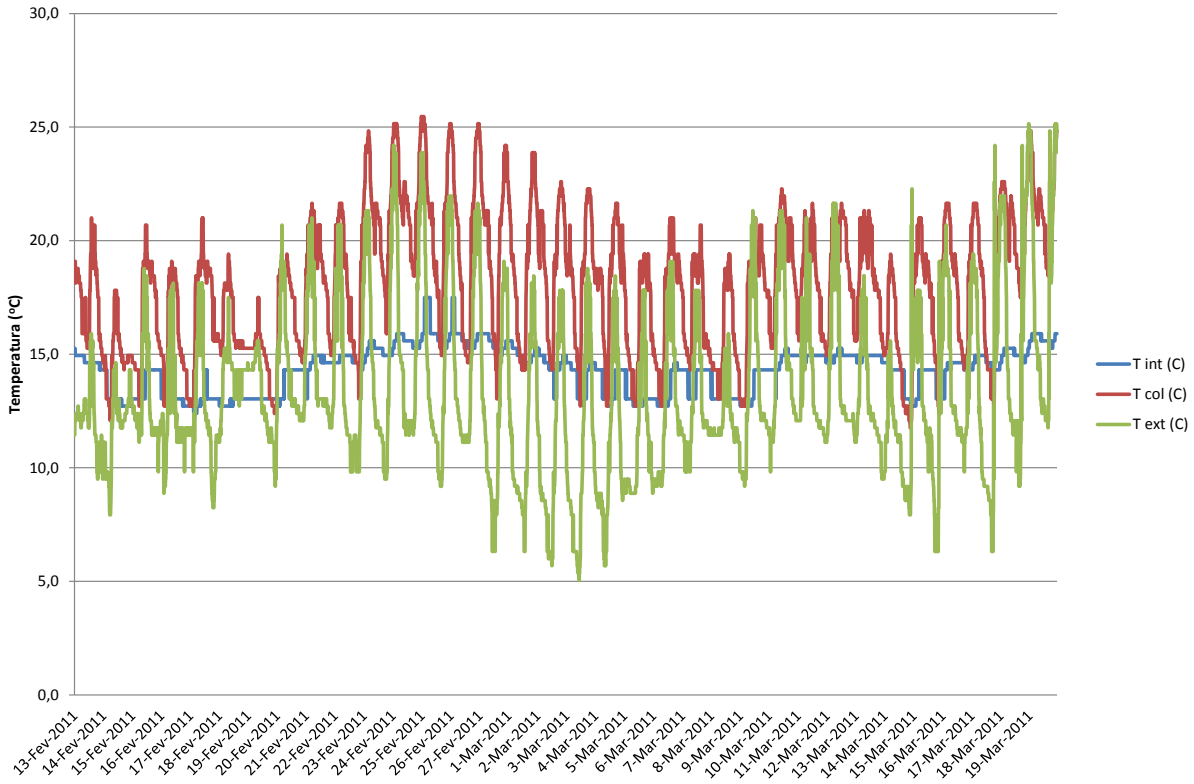


Figura A-12: Aquisição entre 13 Fevereiro e 20 Março 2011

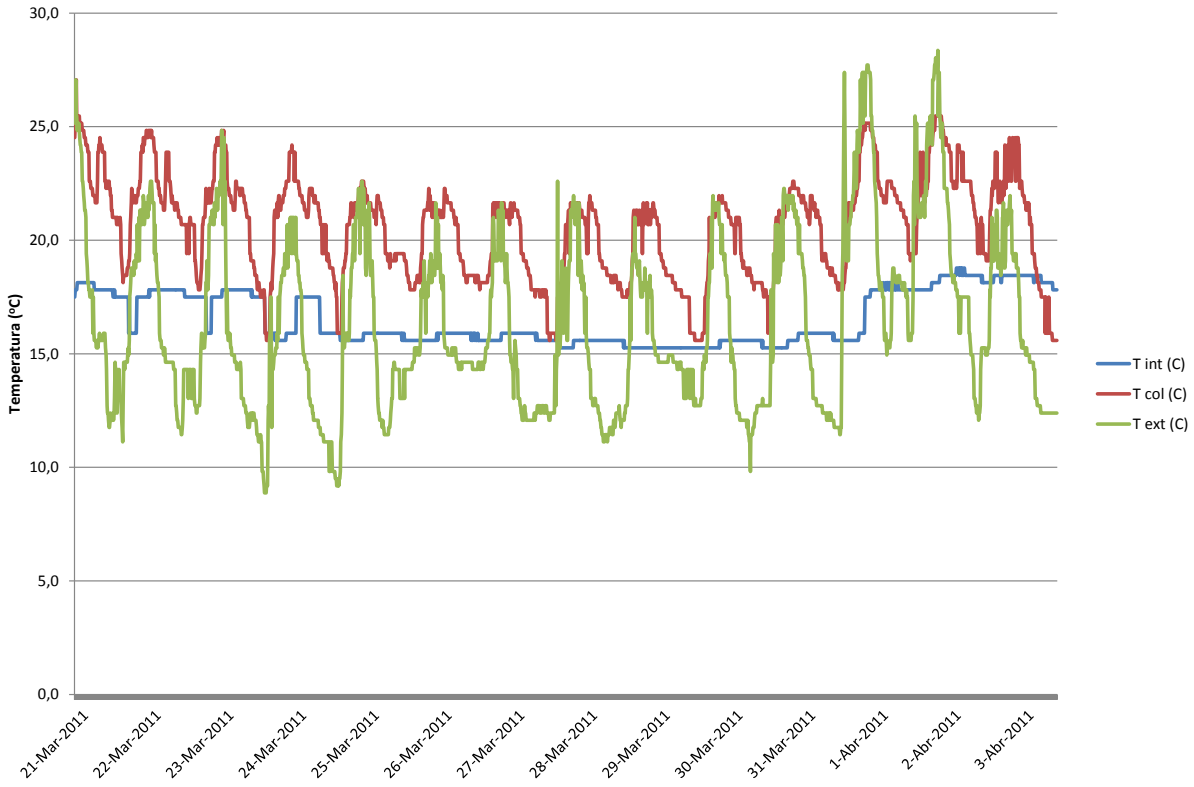


Figura A-13: Aquisição entre 20 Março e 3 Abril 2011

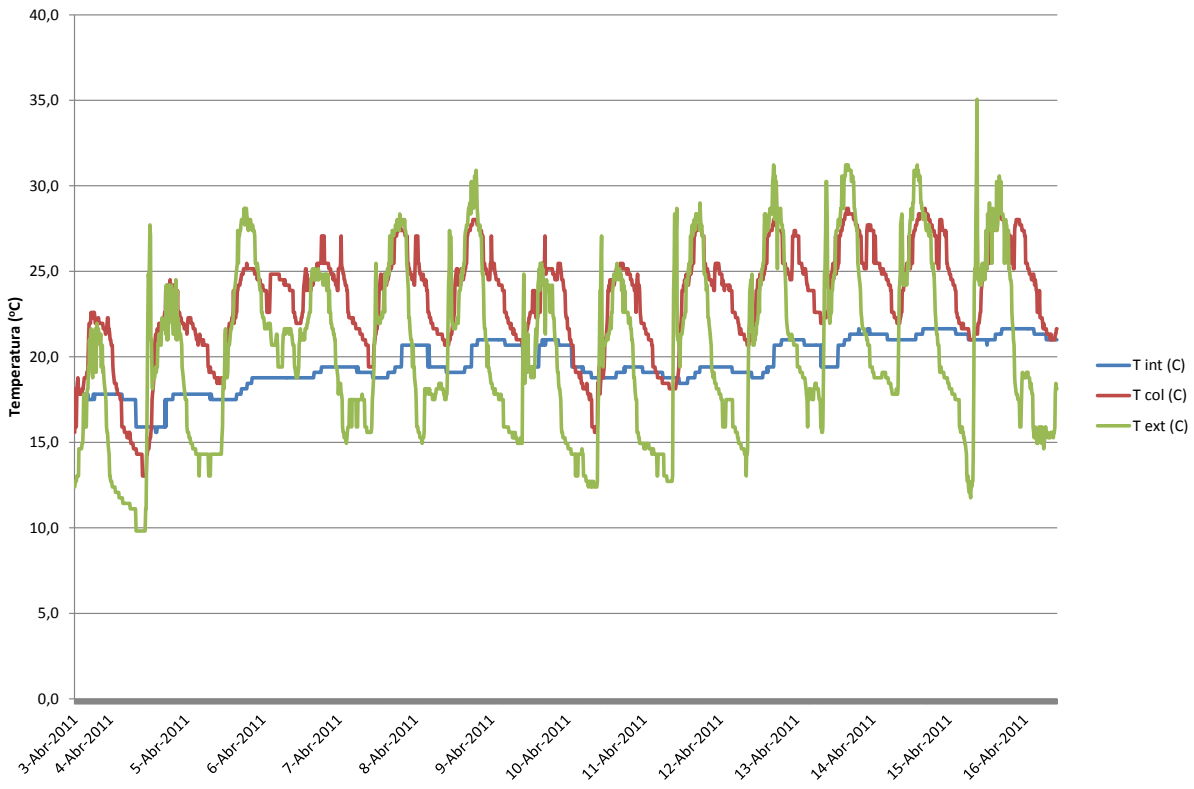


Figura A-14: Aquisição entre 3 Abril e 29 16 Abril 2011