



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da aplicação de um sistema solar térmico para climatização de uma habitação antiga

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente

Autor

Michael Oliveira Gil

Orientador

Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites, Professor da Universidade de Coimbra

Coorientador

Nelson da Silva Brito, Arquiteto

Júri

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Presidente

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador

Professor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2017

Agradecimentos

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o contributo de várias pessoas que me acompanharam ao longo desta jornada e pela qual lhes presto o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador de dissertação, o Professor Gonçalo Brites pela proposta, disponibilidade e muita paciência para me orientar neste último ano de curso. Em segundo, quero agradecer ao coorientador, Arquiteto Nelson Brito pela sua colaboração com ideias e dados da sua estação meteorológica, que foram fundamentais para à realização da dissertação. Em terceiro, agradeço a Eng^a Sara Henriques por me disponibilizar dados da sua simulação referentes a estrutura da casa.

À minha família, em especial aos meus pais, também lhes presto um agradecimento pelo enorme contributo que tiveram na minha formação pessoal e académica.

Por fim, quero prestar o meu agradecimento a todos os meus amigos que fui conhecendo ao longo da vida, em especial aos que conheci na Universidade e que contribuíram para o meu crescimento como pessoa.

Resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar a aplicação de energia solar térmica para aquecimento ambiente de uma habitação situada na zona histórica de Coimbra. Este estudo foi efetuado com recurso ao programa de simulação energética *EnergyPlus* 8.5.

São apresentados resultados para cinco simulações energéticas, correspondendo a cinco diferentes tipos de sistemas de aquecimento ambiente do edifício. Nas três primeiras simulações são usados como solução de aquecimento, painéis radiantes, o piso radiante e os convetores, respetivamente, sendo a energia térmica fornecida exclusivamente por um sistema solar térmico convencional. Estas três simulações são o principal foco do trabalho, pois são as alternativas em estudo que usam energia solar térmica (energia renovável). Na quarta simulação energética são usados dois aquecedores elétricos como fonte de aquecimento e na quinta não é usado qualquer tipo de aquecimento do ambiente (esta simulação serve de comparação para avaliar a eficácia dos sistemas de aquecimento solar). De modo a calibrar o modelo do edifício, foi feita uma validação dos resultados para uma semana em que temos dados reais das temperaturas medidas na casa e no exterior. Foi necessário alterar o ficheiro meteorológico de Coimbra para a respetiva semana, adicionando os dados das medições na semana correspondente. Com este ficheiro alterado correu-se a simulação com um modelo em que a casa está sempre sem ocupação e não é climatizada, comparando-se as temperaturas obtidas na simulação com as temperaturas reais medidas na habitação. Alguns parâmetros do modelo, como os coeficientes da ventilação natural, as propriedades dos materiais construtivos, os envidraçados e as proteções solares foram ajustados de modo a obter uma boa correspondência entre os resultados da simulação e os resultados das medições.

Em termos de resultados finais, são analisados alguns dos parâmetros de conforto térmico como a temperatura do ar interior e número de horas em que o *setpoint* é cumprido para as cinco simulações e para os diferentes pisos da habitação. Também é feita uma análise às temperaturas do reservatório de água quente e aos consumos energéticos. A análise dos

resultados permite-nos tirar conclusões sobre qual a solução de aquecimento solar mais interessante para utilizar no edifício. A solução de aquecimento mais viável para utilizar no edifício são os aquecedores elétricos, mas se tivermos em conta só as soluções com sistema solar térmico o sistema com convetores seria a solução mais interessante.

Palavras-chave: Simulação energética em edifícios, Energia solar térmica, Aquecimento radiante e convectivo hidráulico, EnergyPlus.

Abstract

The main objective of this dissertation is to study the application of solar thermal energy to produce ambient heating in a dwelling located in the Coimbra historic area. This study was carried out using the energy simulation program EnergyPlus 8.5.

Results are presented for five energy simulations, corresponding to five different types of ambient heating systems in buildings. In the first three simulations are used radiant panels, radiant floor and baseboard convectors, respectively, as heating solutions, and the thermal energy is exclusively supplied by a conventional solar thermal system. These three simulations are the main work focus, since they represent the only alternatives simulated that use solar thermal energy (renewable energy). In the fourth energy simulation, two electric baseboard heaters are used as a heating source and in the fifth model there is no heating system (this simulation is used as a comparison, in order to evaluate the effectiveness of the solar heating systems).

The building model was validated for a week for which we have real data on the measured indoor and outdoor air temperatures. It was necessary to adapt the Coimbra meteorological file for this week, adding the data of the measurements in the corresponding places. With this altered file, the simulation was ran with the model of the building with neither occupation nor heating, and the simulated indoor temperatures were compared with the measured temperatures. Some parameters of the model such as the natural ventilation coefficients, the building materials properties, the glazing and the solar protections were adjusted in order to obtain a better match between the simulation results and the measurements results.

The final results include the analysis of some thermal comfort parameters, such as indoor air temperature and number of hours in which the setpoint is fulfilled for the five simulations and different floors of the dwelling. Other results analysed are the hot water tank temperatures and the thermal energy consumption for ambient heating. These results allowed to draw conclusions about which solar heating solution is the most interesting to use in the building.

Keywords Energy Simulation of Buildings, Solar Thermal Energy, Radiant and convective heating systems, EnergyPlus.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento e motivação.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.3.	Metodologia.....	3
1.4.	Estrutura da dissertação.....	5
2.	Estado da Arte.....	6
2.1.	Sistema solar térmico.....	6
2.1.1.	Componentes.....	6
2.1.2.	Tipos de Sistemas solar térmicos.....	9
2.2.	Sistemas de aquecimento hidráulicos.....	11
2.2.1.	Painéis radiantes.....	11
2.2.2.	Piso radiante.....	12
2.2.3.	Ventiloconvetores/Convetores.....	13
2.3.	Conforto térmico.....	14
3.	Apresentação do caso de estudo.....	18
3.1.	Descrição do edifício.....	18
3.2.	Estrutura e composição do edifício.....	19
3.3.	Cargas internas da habitação.....	21
3.3.1.	Ocupantes.....	21
3.3.1.	Iluminação artificial.....	22
3.3.1.	Equipamentos elétricos e eletrónicos.....	23
3.4.	Ventilação natural.....	24
3.5.	Sistema dos circuitos de aquecimento.....	25
3.5.1.	Circuito de aquecimento ambiente com painéis radiantes hidráulicos.....	26
3.5.2.	Circuito de aquecimento ambiente com piso radiante hidráulico.....	28
3.5.3.	Circuito de aquecimento ambiente com convetores hidráulicos.....	29
4.	Resultados.....	30
4.1.	Validação do Modelo (Semana Real).....	31
4.2.	Parâmetros de conforto térmico.....	34
4.3.	Temperatura do depósito de água quente.....	38
4.4.	Potências internas.....	40
4.4.1.	Ocupantes.....	40
4.4.1.	Iluminação Artificial.....	41
4.4.2.	Equipamentos elétricos e eletrónicos.....	41
4.5.	Consumos energéticos e custos.....	42
4.6.	Ganhos e Perdas Energéticas na Habitação.....	46
5.	Conclusões.....	50
6.	Referências.....	52

Anexo A – Taxas de ocupação e utilização das cargas internas.....	55
Anexo B – Fórmulas para o cálculo das radiações	58
Anexo C – Tabelas com variáveis utilizadas no ficheiro meteorológico	60

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema dos vários <i>inputs</i> a considerar numa simulação <i>EnergyPlus</i> (BRANZ s.d.).....	4
Figura 2 – Eficiência de diferentes tipos de coletores solares (LusoSol.pt 2015).....	7
Figura 3 - Esquema de um sistema termossifão (SPRA 2011).....	9
Figura 4 - Esquema de um sistema solar térmico por circulação forçada (SPRA 2011)	11
Figura 5 - Exemplo de um painel radiante hidráulico (SZ FRICO s.d.).....	12
Figura 6 - Estrutura típica de um piso radiante hidráulico (Borders Underfloor Heating Ltd 2009).....	13
Figura 7 - Imagem ilustrativa de um convetor hidráulico de parede (Archiexpo 2017).	14
Figura 8 - Vista panorâmica do edifício em estudo (Google Maps 2016).	19
Figura 9 - Representação do alçado principal da habitação, no Sketchup 2016	20
Figura 10 - Representação do alçado secundário da habitação, no Sketchup 2016	21
Figura 11 – Representação esquemática de um conjunto de componentes (GARD Analytics and University of Illinois 2002).	26
Figura 12 - Esquema do circuito de aquecimento do ambiente utilizado na habitação através da utilização de painéis radiantes.....	27
Figura 13 - Esquema do circuito de aquecimento do ambiente utilizado na habitação através da utilização de piso radiante.	29
Figura 14 - Gráfico de temperaturas do ar para a simulação da semana real.	33
Figura 15 - Gráfico referente a temperatura média do ar interior para o piso 1.....	34
Figura 16 - Gráfico referente a temperatura média do ar interior para o piso 2.....	36
Figura 17 - Gráfico correspondente a percentagem em que o setpoint é cumprido para o piso 01.	37
Figura 18 - Gráfico correspondente a percentagem em que o setpoint é cumprido para o piso 02.	38
Figura 19 - Gráfico com as temperaturas do depósito para o cenário1.	39
Figura 20 - Gráfico com as temperaturas do depósito para o cenário2.	39
Figura 21 - Gráfico com as temperaturas do depósito para o cenário3.	40
Figura 22 - Gráfico relativo aos ganhos térmicos dos ocupantes para o piso 01 e 02.....	40
Figura 23 - Gráfico relativo as potências da iluminação para o piso 01 e 02.....	41

Figura 24 – Gráfico relativo as potências dos equipamentos elétricos para o piso 01 e 02.	42
Figura 25 – Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 1	46
Figura 26 - Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 2.	47
Figura 27 - Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 3.	48
Figura 28 - Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 4.	49

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Taxa de metabolismo para diferentes atividades físicas (ISO 7730/2005 2005).	15
Tabela 2 – Resistência térmica do vestuário (Águas 2000).....	16
Tabela 3- Número e tipo de lâmpadas e respetivas potências, em cada piso da habitação (Henriques 2015).....	22
Tabela 4 - Equipamentos elétricos e respetivas potências existentes na habitação (Henriques 2015).....	23
Tabela 5 – Características do fluxo de ar (Pereira 2013).	24
Tabela 6 - Consumos energéticos e eficiência do sistema para os diferentes cenários.	43
Tabela 7 – Preços base dos equipamentos e instalação para os diferentes cenários.	45
Tabela 8 - Fração de ocupação do piso 00 e 01 ao longo do ano (Henriques 2015).	55
Tabela 9 - Fração de ocupação do piso 02 ao longo do ano (Henriques 2015).....	56
Tabela 10 - Fração iluminação do piso 00 e 01 ao longo do ano (Henriques 2015).	57
Tabela 11 - Fração iluminação do piso 02 ao longo do ano (Henriques 2015).....	57
Tabela 12 – Tabela com o valor de várias variáveis necessárias para o cálculo das radiações solares.....	60
Tabela 13 – Tabela com as variáveis usadas no ficheiro meteorológico.....	64

Simbologia e Siglas

Simbologia

€ - Euros

c_p - Calor específico [J/(kg·K)]

a_1, a_2 – Coeficiente de perdas térmicas (W/(m² K))

k - Condutividade Térmica [W/(m·K)]

L – litros

met – Energia produzida por unidade de área de uma pessoa em repouso (1 met = 58W/m²)

P_{vap} – Pressão de vaporização (Pa)

G_d – Radiação difusa Horizontal (W/m²)

$G_{O,N}$ – Radiação direta normal (W/m²)

G – Radiação global horizontal (W/m²)

a_0 – Rendimento ótico de um coletor solar

Clo – Resistência térmica da roupa. (1 clo = 0.155m²·°C/W)

T_a – Temperatura do ar no local (°C)

T_g – Temperatura medida pelo termómetro de globo negro (°C)

V_a – Velocidade do ar no local (m/s)

ω – Ângulo Horário

δ – Declinação

ΔT – Diferença de Temperatura

Φ - Latitude

Siglas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

BLAST- *Building Loads Analysis System Thermodynamics*

CST – Coletor solar térmico

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DOE – *Department of Energy*

EDP – Energias de Portugal

EUA – Estados Unidos da América

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GEE – Gases de Efeito de Estufa

HR- Humidade relativa

INE – Instituto Nacional de Estatística

PR – Pannel radiante

PE – X – Polietileno reticulado

REBC 50 – Roteiro Europeu de baixo carbono 50

TMR- Temperatura média radiante

UE – União Europeia

UNESCO – *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

A crescente diminuição das reservas de combustíveis fósseis, associada aos danos ambientais gerados pelo seu uso intensivo, tem suscitado a procura de formas de energia alternativas, de natureza renovável, não poluentes, e que sejam sustentáveis. No entanto, apesar do maior conhecimento dos efeitos nefastos do consumo de combustíveis fósseis nas alterações climáticas, e dos programas para alterar este quadro, a procura de combustíveis fósseis mantém-se elevada, o que em termos ambientais se está a tornar catastrófico.

Para combater esta problemática tem contribuído nos últimos anos uma maior consciencialização da população, aliada a um progresso tecnológico, levando a que as soluções recorrendo a energias renováveis se tornem cada vez mais comuns. Por outro lado, nos países desenvolvidos a energia consumida nos edifícios representa uma parcela significativa do consumo energético total, sendo essencial implementar medidas que diminuam a fatura ecológica de modo a causar um impacto menos prejudicial para o ambiente.

Nos últimos anos, a Europa tem investido bastante na área do ambiente para combater o aquecimento global. Diversas estratégias ao nível do ambiente e da energia têm vindo a ser implementadas em vários países, como a melhoria da eficiência energética, a reciclagem, o uso de energias renováveis, entre outras. Uma dessas estratégias foi acordada em Março de 2007, onde os líderes políticos da União Europeia (UE) definiram algumas metas energéticas a atingir até 2020. Essas metas foram designadas de “20-20-20” e consistem na redução das emissões dos gases de efeito de estufa em 20% abaixo do nível de 1990, no aumento da contribuição das energias renováveis para 20% do consumo energético, e na redução de 20% do consumo de energia primária através da melhoria da eficiência energética (European Commission 2010).

Em Março de 2011 a Comissão Europeia apresentou o Roteiro Europeu de Baixo Carbono (REBC) que visa a redução das emissões dos GEE em 80% até 2050, comparativamente ao ano de 1990, de modo a manter o aquecimento global abaixo dos 2°C. Os países mais desenvolvidos têm de obter reduções das emissões de GEE entre os 80% e 95%, ao passo que os menos desenvolvidos como o caso de Portugal têm de obter reduções na ordem dos 50% a 60%. Para atingir este objetivo previu-se a introdução de etapas intermedias de redução de 25%, 40% e 60% até 2020, 2030 e 2040 respetivamente (European Commission 2011). Em Portugal, segundo a publicação (INE 2014), no ano 2014 o setor doméstico foi responsável por 16.8% do consumo de energia final, sendo o setor onde se espera poder ter maiores reduções do consumo de energia. Neste sentido, e segundo dados do INE, em Portugal, cerca de 9500000 MWh de energia elétrica são consumidos pelas famílias portuguesas durante o ano, em que 10% é destinada ao aquecimento ambiente (INE 2010).

1.2. Objetivos

Pretende-se com este trabalho demonstrar que é possível usar energia solar térmica para aquecimento de uma habitação no período de Inverno. Para o efeito são realizadas várias simulações no programa *EnergyPlus* usando um sistema solar térmico como fonte de energia térmica e painéis radiantes, pisos radiante e convetores hidráulicos como equipamentos terminais de aquecimento ambiente.

Os principais objetivos encontram-se descritos seguidamente:

- Validação de um modelo de simulação da habitação, utilizando os programas *EnergyPlus.8.5* e *SketchUp 2016*. Adaptação do modelo ao edifício existente (presentemente sem ocupação e sem equipamentos). Medição de temperaturas no interior e exterior da habitação, radiação solar e humidade relativa durante uma semana. Validação do modelo através da simulação de uma semana correspondente à semana das medições, com a correspondente alteração do ficheiro meteorológico de modo a conter os dados reais de temperatura do ar, radiação solar, e humidade relativa. Os parâmetros a

ajustar no modelo são ao nível dos materiais de construção e suas propriedades, coeficientes da ventilação natural, propriedades do revestimento das paredes exteriores, características das portadas das janelas, entre outros.

- Com base no modelo validado, adaptação de cinco modelos de simulações energéticas, utilizando o *software EnergyPlus8.5*. O Primeiro modelo contempla todos os aspetos construtivos da habitação após a validação onde não é suportado por qualquer tipo de equipamento de climatização. O segundo terceiro e quarto modelo são idênticos, para além de contemplar todos os aspetos construtivos da habitação, o modelo possui um sistema solar térmico ligado a um equipamento de climatização. A diferença destes três modelos prende-se no equipamento de climatização, na segunda simulação serão usadas três painéis radiantes e na quarta e quinta é usado o piso radiante e convetores, respetivamente. O quinto modelo serve como caso de comparação em que o equipamento de climatização usado são os aquecedores elétricos
- Análise dos resultados fornecidos pelos modelos de simulação, nomeadamente as temperaturas nas diferentes divisões da casa, número de horas em que o *setpoint* de aquecimento é atingido, temperatura do depósito de água quente solar, consumos e custos energéticos dos equipamentos de climatização.
- Após análise dos resultados proceder à verificação de qual o modelo mais viável, tendo em conta os parâmetros energéticos e económicos.

1.3. Metodologia

O *EnergyPlus*, versão 8.5, foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos E.U.A. É um programa de simulação dinâmica de edifícios, utilizado em todo o mundo, que permite realizar simulações energéticas em edifícios existentes ou em fase de projeto.

Segundo (Department of Energy 2015a), este *software* começou a ser desenvolvido em 1995 pelo DOE e resulta da junção de outros dois softwares: o BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*), do Departamento de Defesa, e o DOE-2, do Departamento de Energia. Esta ferramenta possibilita a introdução de parâmetros físicos e dos fluxos de energia e massa para o caso em estudo. O programa calcula os resultados tendo em consideração o equilíbrio das zonas térmicas, as trocas de calor por condução radiação e convecção e os balanços de fluxos de massa (Department of Energy 2015a). O *EnergyPlus* requer, como dado de entrada, o ficheiro climático da região (*Weather file*). Este inclui as componentes da radiação solar, as temperaturas médias do ar exterior e do solo, a velocidade do vento, entre outros parâmetros. Na Figura 1 podemos ter uma maior perceção dos vários *inputs* a ter em conta num modelo de simulação.

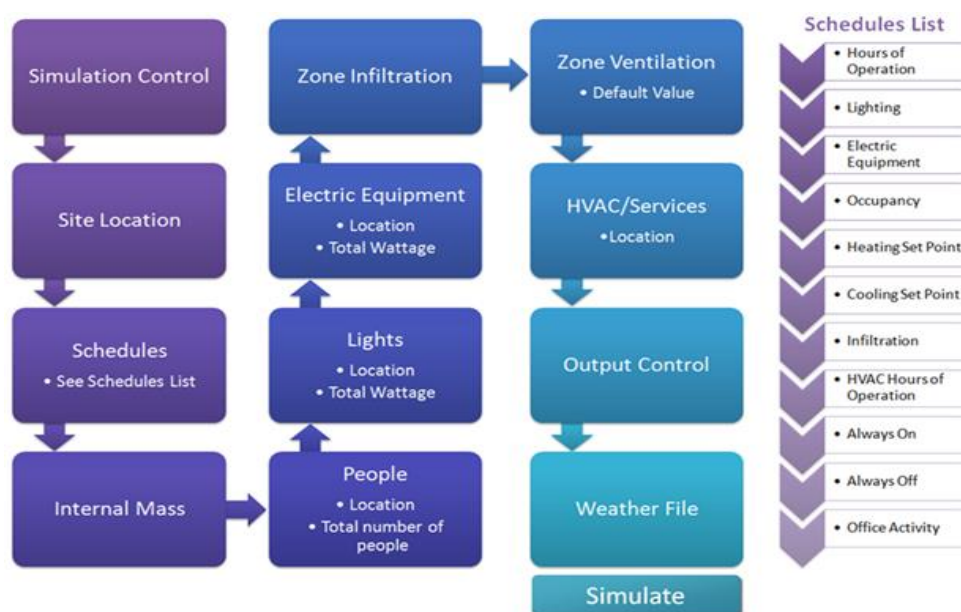


Figura 1 - Esquema dos vários *inputs* a considerar numa simulação *EnergyPlus* (BRANZ s.d.)

No entanto, sendo o *EnergyPlus* um modelo de simulação de aspeto pouco interativo, é habitual optar-se pela utilização de uma interface gráfica, que facilita e auxilia no seu funcionamento. O programa *SketchUp2016* através de um plugin *OpenStudio* permite abrir ficheiros do *EnergyPlus* com extensão IDF. Este programa é uma ferramenta que possibilita a criação de um modelo de edifício em três dimensões de uma forma rápida e fiável (SketchUp 2017).

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos e dois Anexos. A sua divisão está relacionada com os vários conteúdos abordados, possibilitando ao leitor a sua fácil identificação.

No capítulo da “INTRODUÇÃO” é feito o enquadramento da dissertação e a motivação, onde se referem as metas estabelecidas até 2020 pela comissão europeia de modo a reduzir as emissões de GEE para a atmosfera. O REBC 2050 também é referido neste subcapítulo, tal como a situação energética atual vivida em Portugal. Neste capítulo também é descrita a metodologia utilizada, bem como os objetivos pretendidos com esta dissertação.

No segundo capítulo encontra-se o “ESTADO DA ARTE”. Aqui constam as várias definições e conceitos que são necessários para o estudo energético da habitação.

Na “APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO” é feita uma descrição do edifício que vai ser estudado e dos diferentes componentes e características que irão ser necessários nas diferentes simulações energéticas.

No capítulo dos “RESULTADOS” começa-se por fazer uma validação do modelo do edifício (sem sistemas, sem ocupação e sem consumos de energia), de modo a dar maior credibilidade aos valores obtidos nas simulações energéticas. Posteriormente são apresentados os resultados das simulações energéticas para os diferentes tipos de sistemas que estamos a estudar. Os principais resultados apresentados passam pela análise de temperaturas e de consumos energéticos.

Na “CONCLUSÃO” é feita a análise dos dados provenientes dos resultados, sendo indicada a melhor alternativa energética em estudo. Também existe um subcapítulo com sugestões para trabalhos futuros.

No “ANEXO A” estão inseridas as tabelas com valores referentes a fração de ocupação e iluminação ao longo do ano para os respetivos pisos.

No “ANEXO B” estão colocadas as fórmulas necessárias para calcular os parâmetros da radiação direta normal e radiação difusa horizontal, a partir das medições, para inserir no ficheiro meteorológico.

No “ANEXO C” estão as tabelas com os valores obtidos através das fórmulas do Anexo B.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Sistema solar térmico

O princípio de funcionamento de um sistema solar térmico é bastante simples. A radiação solar incide sobre a cobertura de vidro que compõe a parte superior do painel. Esta radiação penetra em grande parte no interior do painel solar, onde existe uma superfície absorvedora em contacto com os tubos por onde circula o fluido térmico, sendo transferida energia térmica para o fluido. O fluido circula em círculo fechado, com ou sem apoio de uma bomba hidráulica (dependendo se o sistema é do tipo circulação forçada ou termossifão), transferindo o calor absorvido no coletor para a água do reservatório através da serpentina ou de um permutador externo.

2.1.1. Componentes

Um sistema solar térmico é constituído pelos seguintes equipamentos:

Coletor Solar térmico

Um coletor solar térmico é um coletor específico para obter calor através da absorção da luz solar. O calor é transferido para o fluido térmico que circula no interior do mesmo. Existem 3 grandes grupos de coletores, de acordo com as temperaturas de funcionamento:

- Painéis solares planos – para baixas temperaturas, até 100°C
- Painéis solares de tubos de vácuo – para médias temperaturas, até 160°C
- Painéis solares concentradores – para elevadas temperaturas, mais de 150°C

O coletor plano é constituído tipicamente por uma placa de vidro, uma placa absorvedora, tubos por onde circula o fluido térmico, isolamento térmico e estrutura de suporte (caixa do coletor).

Existem vários tipos de coletores solares de tubos de vácuo, sendo as duas configurações mais comuns os de fluxo direto e os do tipo *heat-pipe*. Os coletores de tubos de vácuo de fluxo direto contêm no seu interior um tubo de cobre onde passa o fluido térmico, geralmente soldado a uma placa absorvedora, e têm a particularidade de poderem ser instalados na horizontal. Um tubo de vácuo consiste geralmente num tubo de vidro transparente de boro silicato de parede dupla onde é feito vácuo. A parede interna está coberta de nitrato de alumínio, material com excelente capacidade de absorção de calor. Os coletores do tipo *heat-pipe* têm no seu interior um tubo de cobre, ao qual estão fixos recetores solares de alumínio seletivo, onde é evaporado e condensado um fluido secundário, efetuando transporte do calor para a água na parte superior onde ocorre a condensação. Estes coletores têm obrigatoriamente de ficar inclinados. (GreenTerraFirma 2008).

Os coletores solares apresentam diferentes eficiências, e como podemos observar na Figura 2 o coletor solar de tubos de vácuo apresenta melhor rendimento que os coletores planos, principalmente no inverno, sendo por isso de especial interesse para o caso em estudo.

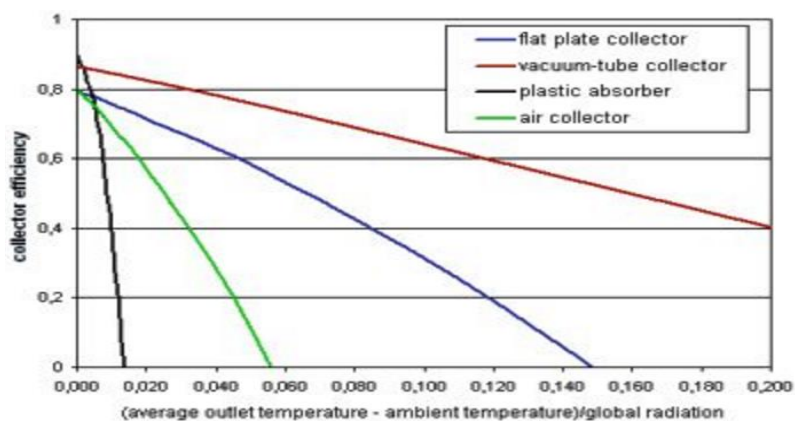


Figura 2 – Eficiência de diferentes tipos de coletores solares (LusoSol.pt 2015).

Depósito Acumulador

É um reservatório para acumular água quente. Tem pelo menos uma serpentina no interior, onde passa o fluido térmico previamente aquecido no coletor, e que tem por finalidade transferir energia para a água que se encontra no reservatório. Poderá ter também uma resistência elétrica como apoio ao aquecimento da água, na parte superior do reservatório, que funciona sempre que a energia solar não seja suficiente para aquecer a água até ao valor mínimo de temperatura de armazenamento.

Grupo Hidráulico

É constituído por uma bomba de circulação, um manómetro, termómetros e ligação ao vaso de expansão, e tem por função fazer circular a água entre os coletores e o depósito, de modo a termos permuta térmica.

Sistema de controlo

É um mecanismo eletrónico que controla o grupo hidráulico de forma automática. Recebe sinais elétricos das sondas de temperatura instaladas no coletor e no depósito, e atua pela diferença de temperatura nestes dois pontos. Quando a temperatura no coletor for superior à do depósito ($\Delta T > 8$ a 10 °C), o grupo hidráulico arranca e para quando o ΔT for menor que 2 a 3 °C (Ofaclimatizacao 2014).

Sistema de apoio

O sistema de apoio, como o próprio nome indica, serve como auxílio quando o painel solar não atinge temperatura suficiente para aquecer água do depósito. Este sistema é sempre ligado na parte superior do depósito de modo a maximizar a captação de energia solar.

2.1.2. Tipos de Sistemas solar térmicos

- **Sistema de termossifão**

Este sistema é composto por um coletor solar e um depósito de água que se encontra fixo junto à parte superior do coletor.

O sistema de termossifão é o sistema solar térmico mais simples. Funciona de acordo com o princípio da gravidade, isto é, a água quente torna-se menos densa, e sobe naturalmente do painel solar para o depósito, enquanto que a água fria, que é mais densa, se desloca do depósito para a parte inferior dos painéis solares. Neste tipo de sistema solar térmico não são necessárias bombas circuladoras, pois a circulação da água dá-se por convecção natural.

Este tipo de sistema apresenta como vantagens ser um sistema mais económico e mais simples, que requer menores cuidados de manutenção devido à ausência de equipamentos mecânicos e controlos eletrónicos. Contudo, também tem desvantagens: o depósito tem de ficar no exterior, o que aumenta as perdas térmicas, principalmente nas noites frias de inverno.

Os sistemas de termossifão são usados principalmente em moradias unifamiliares e sistemas de pequenas dimensões. Na Figura 3 temos um esquema ilustrativo de um sistema solar térmico por termossifão.

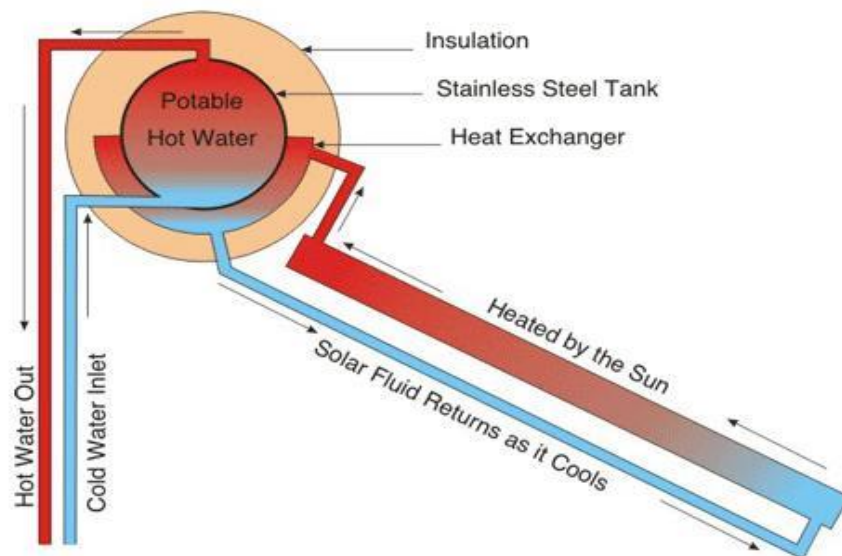


Figura 3 - Esquema de um sistema termossifão (SPRA 2011)

- **Sistema de circulação forçada**

O sistema de circulação forçada, que se encontra esquematizado na Figura 4, é composto por um conjunto de equipamentos, dos quais os principais são: coletores solares, reservatório de água quente, grupo hidráulico, sistema de controlo e de apoio

Neste tipo de sistemas o depósito encontra-se dentro da habitação, pois a circulação do fluido térmico é feita por bombagem, ao contrário do que se sucede no sistema por termosifão. O sistema de controlo mede as temperaturas no depósito e no coletor e liga a bomba sempre que é possível captar energia solar; por sua vez a função do sistema de apoio é fornecer energia ao depósito sempre que a energia solar não seja suficiente. O sistema de apoio é sempre ligado na parte superior do depósito, como podemos observar na Figura 4, com o objetivo de maximizar a captação de energia solar. Este tipo de sistemas também costuma ter incorporado um vaso de expansão, que tem como função compensar o aumento do volume da água provocado pela subida da temperatura, impedindo o rebentamento das tubagens. A válvula de mistura é também uma peça importante nestes sistemas, pois mantém a temperatura da água em limites aceitáveis.

A principal vantagem é a maior eficiência no aquecimento da água contida no depósito, além da possibilidade de regularização do caudal de fluido térmico, e possível integração com sistemas de aquecimento central e/ou aquecimento de piscinas.

Contudo, os sistemas de circulação forçada apresentam algumas desvantagens, tais como: são sistemas mais caros, têm um custo elétrico adicional relativo ao funcionamento da bomba circuladora e do sistema de controlo (embora seja muito pequeno) e a instalação é mais complexa.

Estes sistemas são ideais para aplicações individuais e coletivas, tais como: habitação (unifamiliar, edifícios coletivos), serviços (lares, restaurantes, hotéis, etc.) e indústria.

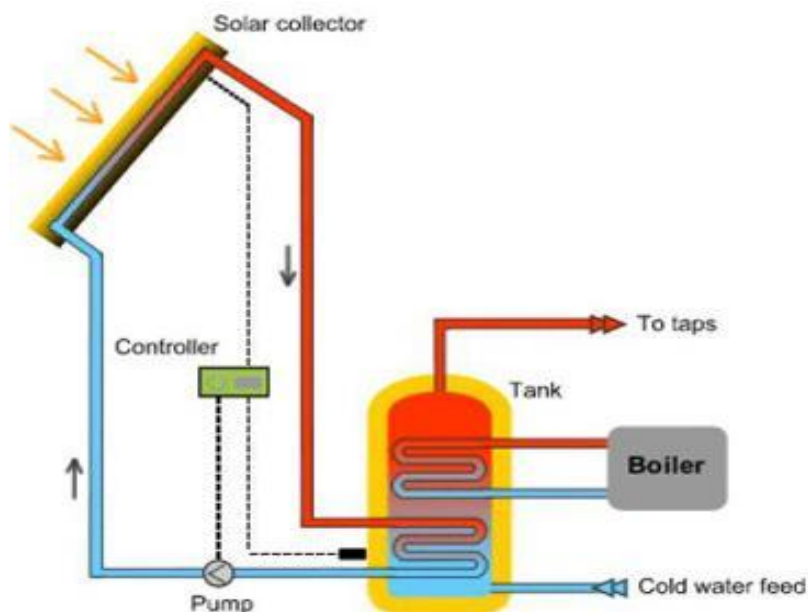


Figura 4 - Esquema de um sistema solar térmico por circulação forçada (SPRA 2011)

2.2. Sistemas de aquecimento hidráulicos

Existem três tipos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. A condução é a transferência de energia através de dois ou mais materiais que estão em contacto direto. A convecção é a transferência de calor entre um corpo sólido e um fluido, como por exemplo o ar ou a água. A radiação corresponde à emissão de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas. A fonte mais comum de energia radiante é o sol. Esta forma de transmitir energia pode ser encontrada em sistemas de aquecimento, onde a fonte de calor irradia o calor a partir de um objeto para outro, sem ocorrer aquecimento do ar contíguo (Cengel e Boles 5ª edição).

2.2.1. Painéis radiantes

O que define e caracteriza um painel radiante para aquecimento ou arrefecimento é a sua capacidade de transferir mais de 50% da sua energia de forma radiante. A restante energia é transferida por meio de condução ou convecção (ASHRAE 2009).

Em geral, o painel radiante (Figura 5) é uma estrutura de alumínio em que o seu interior é constituído por uma serpentina por onde circula a água aquecida.



Figura 5 - Exemplo de um painel radiante hidráulico (SZ FRICO s.d.).

2.2.2. Piso radiante

Existem três tipos de pisos radiantes: piso radiante a ar quente, piso radiante elétrico e o piso radiante hidráulico. Estes três tipos de piso podem ser subdivididos segundo o tipo de instalação: os que fazem uso da capacidade da massa térmica da laje de betão ou argamassa na qual as tubagens estão embebidas (instalações “molhadas”), e os que têm as tubagens do piso radiante ensanduichadas entre duas camadas de contraplacado de madeira ou instaladas diretamente sob a superfície do piso (instalações “secas”) (Department of Energy 2015b).

Os pisos radiantes hidráulicos são os sistemas de aquecimento radiante mais populares e mais eficientes na área do aquecimento. Basicamente este sistema consiste em bombear água aquecida a partir de uma fonte de produção de calor através de tubos colocados sob o chão. Em alguns sistemas, o controlo do fluxo de água quente é feito através de bombas e termostatos que regulam a temperatura ambiente. O custo de instalação de um piso radiante varia conforme a localização geográfica e depende do tamanho da casa, do tipo de instalação, do revestimento do piso, do afastamento do local, e do custo de mão-de-obra (Department of Energy 2015b).

As características radiantes das superfícies utilizadas atualmente não afetam significativamente o processo radiante de transferência de calor, pois os materiais utilizados têm uma emissividade de 0.85 ou superior.

Nas instalações de piso radiante hidráulico as tubagens de plástico tipo PE-X (polietileno reticulado) são atualmente as mais utilizadas. Este tipo de material é utilizado

devido ao seu baixo custo, a sua não reação com a argamassa e durabilidade. O preço do cobre tem reforçado o uso de materiais alternativos, tal como o referido anteriormente (Watson 2002).

Como podemos observar na Figura 6, a parte inferior do piso radiante é composta por betão armado, seguido de uma camada com argamassa. Como isolante costuma usar-se uma camada de poliestireno extrudado de alta densidade, mas no caso de estudo iremos usar cortiça. Por fim, a parte superior é composta por pavimento de madeira, seguido de uma camada de argamassa.

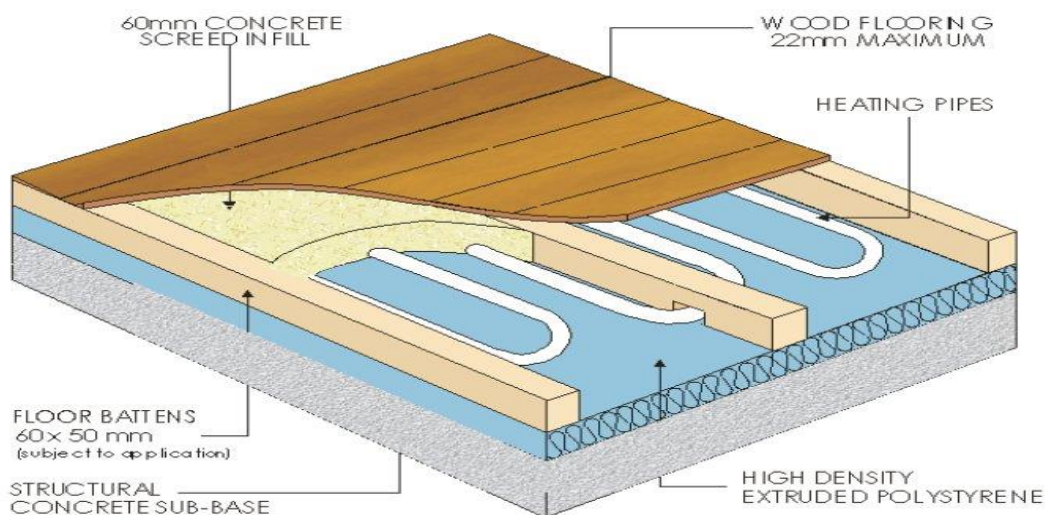


Figura 6 - Estrutura típica de um piso radiante hidráulico (Borders Underfloor Heating Ltd 2009).

2.2.3. Ventiloconvetores/Convetores

Os ventiloconvetores/convetores são sistemas de climatização que funcionam através da circulação de água pelo princípio da convecção e com auxílio da circulação do ar. Se o sistema tiver incorporado um ventilador designa-se de ventiloconvetor caso contrário designa-se por convetor.

Os ventiloconvetores têm como principal vantagem o sistema de circulação forçada do ar, que permite uma maior eficiência e rapidez, tanto na transmissão do calor para o ar como na

absorção do calor do ar. As temperaturas de funcionamento andam na ordem dos 50°C para aquecimento e 5°C para arrefecimento.

Na Figura 7 temos um exemplo que um convetor hidráulico de parede que também pode ser implementado em tetos e pavimentos.

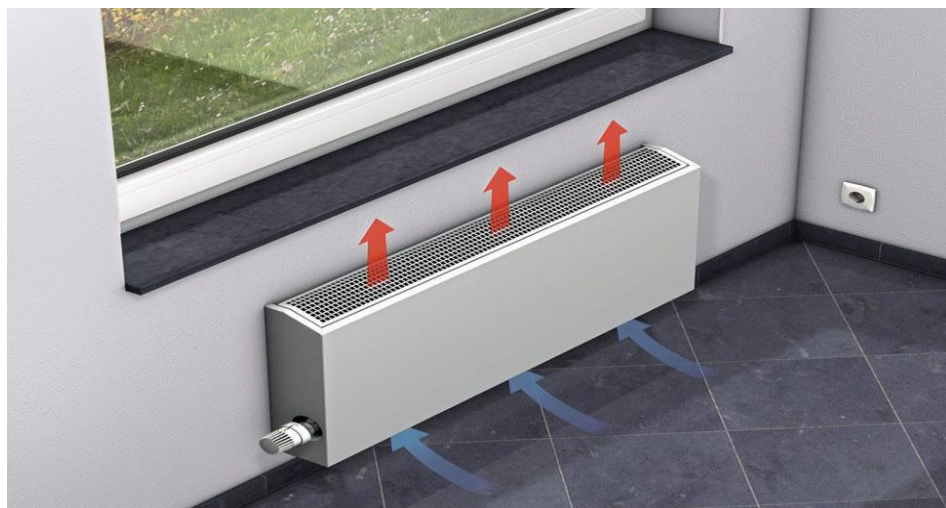


Figura 7 - Imagem ilustrativa de um convetor hidráulico de parede (Archiexpo 2017).

2.3. Conforto térmico

Segundo o (BSR/ASHRAE Standard 55P 2003), conforto térmico pode ser definido como um estado ou condição de satisfação em relação ao ambiente térmico onde a pessoa se encontra. Se o resultado das trocas de calor entre o corpo e o ambiente envolvente for nulo, e a temperatura da pele estiver dentro dos limites aceitáveis, pode-se afirmar que a pessoa sente conforto térmico.

Também (Lamberts, Xavier et al. 2011) referem três condições para que se possa atingir o conforto térmico, que vão de encontro ao que foi referido no primeiro parágrafo.

- O individuo tem que se encontrar em neutralidade térmica.
- A temperatura da sua pele e a taxa de suor devem ser compatíveis com o seu nível de atividade.
- O individuo não se deve encontrar sujeito a desconforto localizado.

Os parâmetros mais importantes para determinar o conforto térmico são de origem Individual e ambiental.

- **Individual**

- **Metabolismo**

O metabolismo corresponde à taxa de utilização de energia pelo corpo, de modo a mantê-lo a uma temperatura estável de 36.7°C em repouso. Podemos ter o metabolismo basal, que corresponde a verificação da taxa em repouso absoluto, e o metabolismo de atividade que está relacionado com o alto nível de atividade física.

De acordo com DuBois e DuBois, a área corporal (em m²) está correlacionada com a altura (em m) e com o peso (em kg), através da seguinte fórmula (Bois 1916).

$$Área = 0.202 \times Altura^{0.725} \times Peso^{0.425} \quad (2.1)$$

O valor da taxa de metabolismo é expresso em W/m² ou met, em que o metabolismo de uma pessoa sentada sem exercer qualquer tipo de atividade corresponde a 58.15 W/m² ou 1 met. Na Tabela 1 podem ser observados os valores das taxas metabólicas para diferentes tipos de atividade.

Tabela 1 – Taxa de metabolismo para diferentes atividades físicas (ISO 7730/2005 2005).

Atividades	Taxas Metabólicas	
	W/m ²	met
-Deitado, reclinado	46	0,8
-Sentado, relaxado	58	1,0
-Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
-Atividade leve em pé (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
-Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, em máquinas)	116	2,0
-Andando em nível:	110	1,9
2 km/h	140	2,4
3 km/h	165	2,8
4 km/h	200	3,4
5 km/h		

- Vestuário

O vestuário é caracterizado pela sua resistência térmica, I_{cl} . Possui uma unidade própria que é o clo, em que 1 clo corresponde a $0.155 \text{ m}^2\text{K/W}$. A Tabela 2 apresenta o valor da resistência térmica para diferentes peças de vestuário.

Tabela 2 – Resistência térmica do vestuário (Águas 2000)

VESTUÁRIO	Resistência térmica (I_{vest}) (clo)	Resistência térmica (I_{vest}) ($\text{m}^2\text{K/W}$)
Nu	0	0
Calções	0.1	0.016
Vestuário tropical	0.3	0.047
Vestuário leve de verão	0.5	0.078
Vestuário de trabalho	0.7	0.124
Vestuário de inverno para ambiente interior	1.0	0.155
Fato completo	1.5	0.233

Ambiental:

- Temperatura do ar

Corresponde à temperatura seca do ar, pode ser expressa em graus Celsius, Kelvin ou Fahrenheit e afeta a perda de calor do corpo humano por convecção e por evaporação.

- Humidade do ar

As equações de balanço energético são deduzidas com base na pressão parcial do vapor de água no ar. Definindo o estado higroscópico do ar em termos da temperatura seca, da humidade relativa, e da pressão parcial do vapor de água temos a seguinte fórmula (Águas 2000). A humidade relativa varia entre 0 e 1, a p_{vap} e p_{sat} vem nas unidades Pa e a temperatura em °C.

$$p_{vap} = HR \times p_{sat}(T), \text{ com } p_{sat}(T) = 1000 e^{\left(\frac{16.6536 \times 4030.183}{T + 235} \right)} \quad (2.2)$$

- Velocidade do ar

A velocidade do ar não baixa a temperatura, no entanto causa um efeito de arrefecimento. No inverno, o valor mínimo de velocidade para existir conforto é de 0.15m/s e o máximo é de 0.2 m/s na zona de ocupação. A velocidade do ar pode ser aumentada através da abertura de janelas, principalmente durante a estação do verão, de modo a atingir níveis de conforto. Dentro de edifícios, a velocidade do ar é geralmente inferior a 0.2 m/s nas zonas ocupadas por pessoas, nas restantes zonas pode atingir valores superiores a 1m/s. (ISO 7730/2005 2005).

- Temperatura média radiante

Por definição, a temperatura média radiante é a temperatura uniforme das superfícies envolventes de um espaço imaginário, onde a transferência de calor por radiação entre este espaço e um ocupante seja igual à soma das transferências de calor por radiação não uniformes das superfícies envolventes de um espaço real.

Um das formulas utilizadas para calcular a TMR, é apresentada em seguida, em que o T_g representa a temperatura medida pelo aparelho globo negro, o T_a a temperatura do ar no local e o $\vec{V}a$ representa a velocidade do ar no local. (PEREIRA 2004).

$$TMR = T_g \times 2.27 \times \sqrt{\vec{V}a} (T_g - T_a) \quad (2.3)$$

- Temperatura operativa

A temperatura operativa é a média dos valores de temperatura do ar com a temperatura radiante.

Segundo (PEREIRA 2004), os parâmetros de conforto no Inverno situam-se nos seguintes valores.

- Atividade física = 1.2 met = (70 W/m²)
- Vestuário = 0.9 clo, (camisola com mangas, camisa com mangas, calças de tecido espesso).
- Velocidade do ar = 0.15 m/s
- Temperatura operativa ótima (TOP) = 22.7 °C

3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Neste capítulo é apresentada a informação necessária para criar os diferentes modelos de simulação energética. Para isso foi necessário recolher alguns dados acerca da localização, da estrutura e da composição do edifício.

Como a habitação se encontra para reabilitação/restauro, e como queremos fazer simulações o mais fidedignas possível, foram selecionados valores de consumos energéticos utilizados na habitação com base nos valores típicos para habitações semelhantes.

Para o edifício em estudo já foram feitas várias simulações energéticas, descritas na Dissertação de Mestrado (Henriques 2015). Todos os dados referentes à estrutura e composição da casa foram obtidos de (Henriques 2015), tal como os valores referentes aos consumos energéticos considerando dois habitantes na habitação.

3.1. Descrição do edifício

O edifício em estudo, que podemos visualizar na Figura 8, está localizado no centro histórico de Coimbra, mais propriamente na Travessa de Montarroio. Está situado numa zona caracterizada pela UNESCO (2015) como património mundial da humanidade. O ano de construção do edifício em estudo remonta ao séc. XIV (Brito 2015).

No lado poente temos um edifício contíguo à habitação, que possui mais um piso, o que dificulta a incidência de radiação solar no final da tarde, devido ao sombreamento. A fachada maior da habitação está orientada para Sul, sendo que esta tem uma boa exposição solar durante praticamente todo o dia.

A moradia é do tipo T1, com três pisos de 18.4m² cada, em que os dois pisos superiores são habitáveis e o piso inferior é usado como arrecadação. O terceiro piso é constituído por um quarto, uma cozinha e uma casa de banho, enquanto que no segundo piso se encontra a sala de estar. Na Figura 8 podemos ver uma imagem aérea da habitação em estudo enquanto que nas Figuras 9 e 10 temos o modelo do edifício feito no programa *sketchup 2016* com diferentes perspetivas.

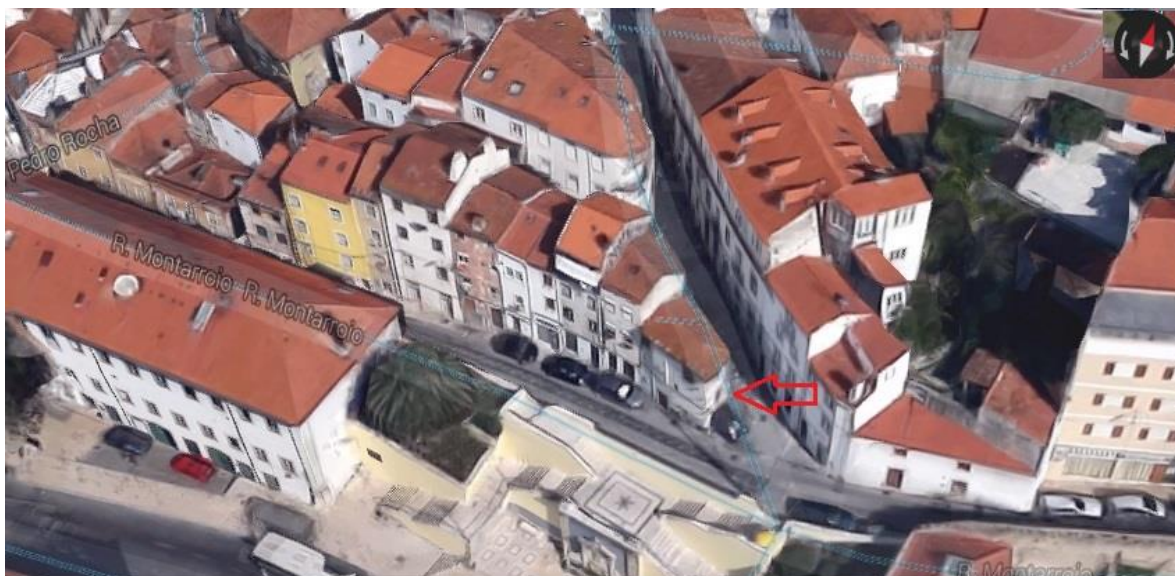


Figura 8 - Vista panorâmica do edifício em estudo (Google Maps 2016).

3.2. Estrutura e composição do edifício

A envolvente da habitação é constituída por paredes de pedra calcária, com acabamento exterior em reboco e com o interior em estuque, variando a sua espessura entre 750, 650 e 300 mm, consoante a zona onde se situa a parede.

A parede do piso 00 que se situa no alçado norte encontra-se totalmente em contacto com o solo, enquanto que a parede do piso 00 dos alçados este e sul- 1 (Figura 9) estão parcialmente em contacto com o solo. As paredes do Alçado Oeste são contíguas a outra habitação.

As superfícies da parede exterior, localizadas na parte superior do edifício e que estão em contato direto com o telhado e com as paredes do piso 02, são compostas por pedra calcária aparelhada no seu exterior e por estuque no interior.

O teto do piso 00 é constituído por pinho duro na camada superior, espaço de ar e por pinho macio na camada inferior. O pavimento do piso 01 apresenta a mesma composição mas organizada inversamente, ou seja possui uma camada de pinho duro na camada inferior, espaço de ar e pinho macio na camada superior. O pavimento do piso 00 é composto por um material cerâmico, seguido de argamassa. O teto do piso 02 é constituído apenas por pinho macio.

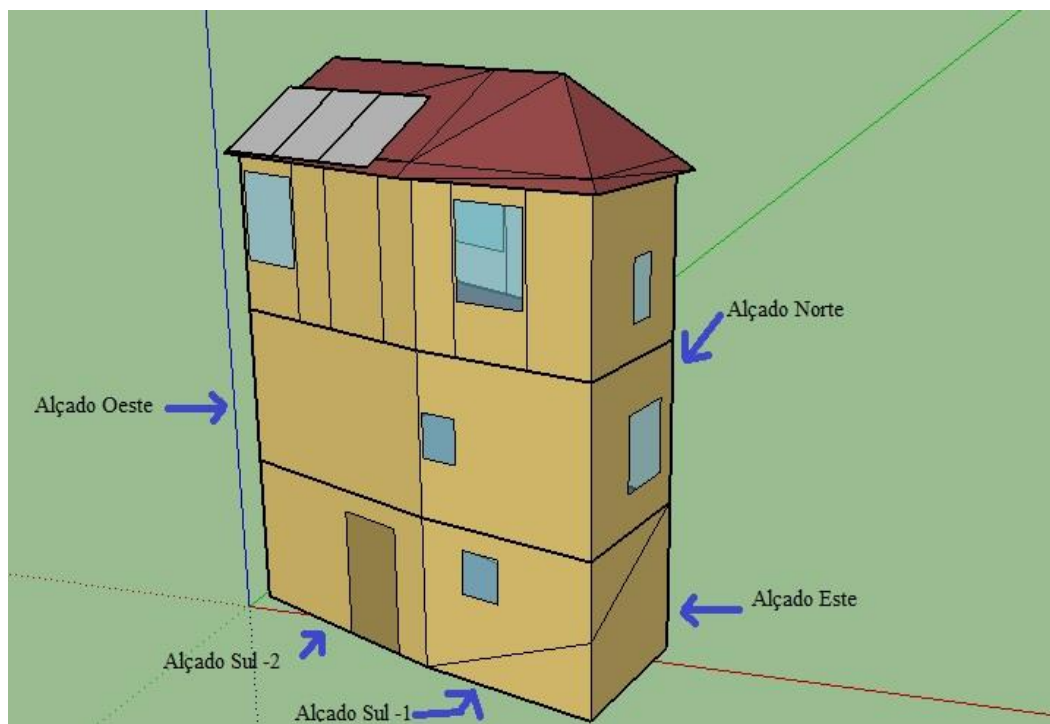


Figura 9 - Representação do alçado principal da habitação, no Sketchup 2016

Na habitação existem duas portas exteriores, localizadas na cave do piso 00 e na entrada principal do piso 01. No primeiro caso a porta é constituída por pinho duro e por um vidro simples de 3 mm. A porta do piso 01 é constituída apenas por pinho duro. As sete janelas da habitação estão localizadas ao longo dos três pisos. Estas diferem apenas no tipo de abertura, podendo ser do tipo giratória ou do tipo guilhotina. O vidro que as constitui tem 3 mm de espessura (Henriques 2015).

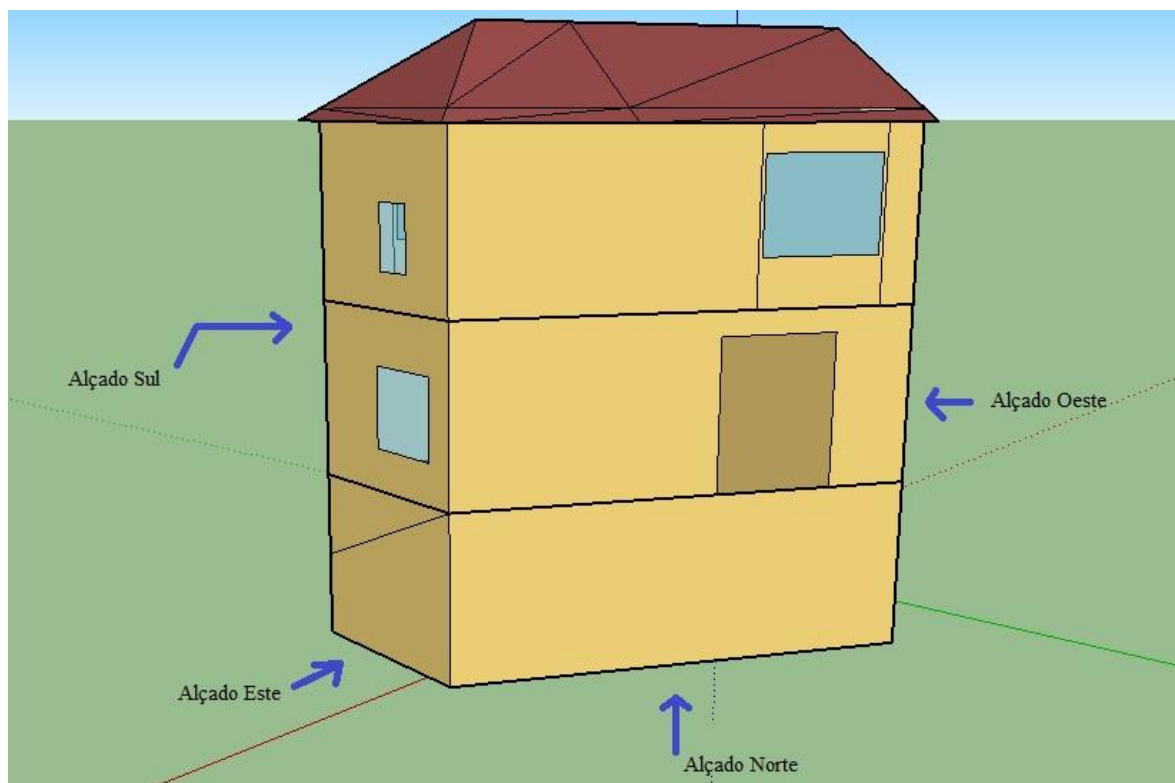


Figura 10 - Representação do alçado secundário da habitação, no Sketchup 2016

3.3. Cargas internas da habitação

Para o nosso caso de estudo temos de ter em consideração as cargas internas da habitação, pois existem vários equipamentos pertencentes ao edifício que irradiam energia sob a forma de calor, que tem de ser considerado nas simulações energéticas.

3.3.1. Ocupantes

O edifício será habitado por duas pessoas, o que representa ganhos energéticos para a habitação, dependendo dos seus horários de utilização da habitação e pelas suas atividades metabólicas. O calor gerado pelos habitantes é libertado pela superfície do corpo e pelas vias respiratórias. Para o caso de estudo considerou-se que as atividades metabólicas dos ocupantes do tipo relaxado tem o valor de 58 W/m^2 . Para os restantes atividades o valor considerado foi de 125 W/m^2 (INNOVA 2002).

No período de férias do Natal, que vai de 20 a 27 de dezembro, os habitantes irão passar mais tempo na habitação. No Anexo A temos as tabelas 10 e 11 que mostram a fração de ocupação ao longo do ano para os diferentes pisos.

3.3.1. Iluminação artificial

O calor transmitido para o ar através da iluminação artificial pode ser dividido em 5 tipos de frações: Fração de retorno de ar, fração radiante, fração visível, fração substituível e fração convectiva. Seguindo os valores estipulados pelo manual *Input-Output Reference* do *Energyplus 8.5*, para lâmpadas do tipo fluorescente e com configuração suspensa no ar temos os valores de 0, 0.42, 0.18 e 0 respetivamente (Department of Energy 2015c).

No total teremos 186.5W de potência, utilizando lâmpadas do tipo florescente. Na Tabela 3 podemos visualizar a sua distribuição, número e tipo de lâmpadas e respetivas potências em cada piso da habitação (Henriques 2015).

No Anexo A estão as Tabelas 10 e 11 que têm informação sobre a fração de utilização da iluminação.

Tabela 3- Número e tipo de lâmpadas e respetivas potências, em cada piso da habitação (Henriques 2015)

Tipo de iluminação	Número de lâmpadas existentes na habitação				
	Piso 00	Piso 01	Piso 02		
		Sala de estar	Cozinha	Quarto	Casa de banho
Lâmpada fluorescente de 36 W	...	...	2	...	...
Lâmpada economizadora de 14 W	2	2	...	1	1
Lâmpada economizadora de 9 W	...	...	...	2	1
Candeeiro de 3.5 W	...	1	..	...	...
Potencia total (W)	28	31,5	72	32	23

3.3.1. Equipamentos elétricos e eletrónicos

Os ganhos térmicos ocorridos por parte dos equipamentos elétricos e eletrónicos são introduzidos no programa de simulação através dos respetivos valores das potências, sendo necessário especificar o seu horário de funcionamento e os três tipos de dissipação de calor que podem ocorrer para a zona térmica onde estão localizados, nomeadamente a fração latente, a fração radiante e a fração perdida. As frações latente e radiante são introduzidas pelo utilizador, enquanto que a fração convectiva é calculada pelo programa, e equivale à diferença entre a unidade e as frações indicadas (Department of Energy 2015c).

Para os equipamentos distribuídos pelos três pisos considerou-se uma fração radiante de 0.1. Para o piso 01 e 02 temos uma fração latente de 0.1, enquanto que no piso 00 temos uma fração latente de 0, uma vez que não existe transferência de energia por mudança de fase. No piso 00 e no piso 01 foi considerado que a fração de perda é nula, já que o calor fica retido na zona térmica. No piso 02 já foi considerado uma fração de perda de 0.8, devido a existência de um exaustor que liberta calor proveniente do fogão para o exterior. Na Tabela 4 podemos ver a potência elétrica dos equipamentos utilizados.

Para consulta de mais informação referente a este subcapítulo, nomeadamente na fração de utilização dos equipamentos elétricos, ver (Henriques 2015).

Tabela 4 - Equipamentos elétricos e respetivas potências existentes na habitação (Henriques 2015)

Piso 00		Piso 01		Piso 02	
Equipamento	Potencia (W)	Equipamento	Potencia (W)	Equipamento	Potencia (W)
Máquina de lavar a roupa (lavagem a frio)	300	Aspirador	1400	Torradeira	800
		Internet, Tv-cabo, telefone	0.6	Forno elétrico	2000
		Televisão	90	Frigorifico	16.7
		Computador	27	Máquina de café	1200
		Computador	27	Micro-ondas	700
		Ferro de engomar	2000	Placa elétrica	1625
				Exaustor	125
				Secador de cabelo	2100
				Aspirador	1400
Total	300	Total	3545	Total	9967

3.4. Ventilação natural

O processo de ventilação natural ocorre normalmente devido a diferença de pressões existentes entre o interior e o exterior do edifício. Esta diferença de pressões pode advir da ação do vento nas fachadas, provocando a renovação do ar pela abertura de janelas e portas, pela chaminé e através de fissuras ou fendas existentes. Também pode ocorrer movimento natural do ar entre divisões da habitação, devido a diferenças térmicas existentes entre as várias divisões e o ar exterior, que possibilitam a criação de massas de ar com densidades não similares, promovendo a ocorrência da ventilação natural.

A simulação da ventilação natural na habitação é possível de recriar através de um fluxo de ar proveniente dos processos já descritos. Para as simulações foram considerados os fluxos de ar através da abertura de janelas e portas, e pelas frinchas que nestas possam existir quando estes estão fechados, bem como as frinchas nos pavimentos de madeira e do teto (Henriques 2015). Os valores do fluxo de ar podem variar consoante a dimensão das fissuras por onde o ar se move, e do coeficiente de pressão (CP), que é um número adimensional que representa a pressão relativa em cada ponto num escoamento (Awbi 2003)

O simulador *EnergyPlus* 8.5 permite calcular os valores do CP em função da direção e da intensidade do vento que atinge a habitação, no período de tempo considerado, para cada uma das fachadas verticais e para o telhado, desde que a habitação tenha uma forma retangular (Department of Energy 2015c). Os valores referentes ao fator de abertura, coeficiente de infiltração de massa de ar e expoente de fluxo de massa para as diferentes zonas da habitação já estão na Tabela 5 e foram desenvolvidos por (Pereira 2013).

Tabela 5 – Características do fluxo de ar (Pereira 2013).

	Janelas		Portas de madeira	Teto do piso 02	Telhado	Pavimentos
	Abertura Lateral	Guilhotina				
Fator de abertura	1	0.5	1	0	0	0
Coefficiente de infiltração de fluxo de massa de ar [kg/s]	0,00022	0,00022	0,00455	0,005	0,1	0,5
Expoente de fluxo de massa	0,66	0,66	0,66	0,66	0,75	0,75

3.5. Sistema dos circuitos de aquecimento

O *EnergyPlus* permite-nos inserir os circuitos de aquecimento no modelo. Para isso temos de inserir algumas variáveis e cumprir determinadas regras para que o circuito possa funcionar.

Os circuitos são divididos em dois subsistemas, o primário (onde ocorre a produção de energia térmica) e o secundário (onde ocorre o consumo da energia térmica). O programa só nos permite criar circuitos fechados, o que no caso de estudo significa que não há perdas de água.

Para fazer as ligações nos circuitos é preciso saber algumas designações específicas, tais como:

- Componentes - correspondem ao conjunto de equipamentos utilizados no circuito, como por exemplo uma bomba hidráulica, um tanque de armazenamento ou um termóstato.
- Splitter - é um componente que permite fazer a ligação de um componente a vários componentes.
- Mixer - é o inverso do *Splitter*, que permite fazer a ligação de vários componentes para um só.
- Branches - é o conjunto de componentes que forma um ramo do circuito. Estes são uma informação básica necessária ao programa e definem a ordem dos componentes no modelo de simulação.
- Nodes - são os pontos que fazem a ligação entre os componentes. A cada componente estão associados pelo menos dois nós, o de entrada e o de saída.
- Loops - correspondem a um conjunto de *Branches* que formam um circuito aberto com um ou mais equipamentos, e têm apenas uma entrada e uma saída. Por cada *Loop* só pode haver no máximo um *Splitter* um *Mixer* e um *ByPass*.

Na Figura 11 podemos observar um esquema, onde é mais perceptível o significado de cada denominação.

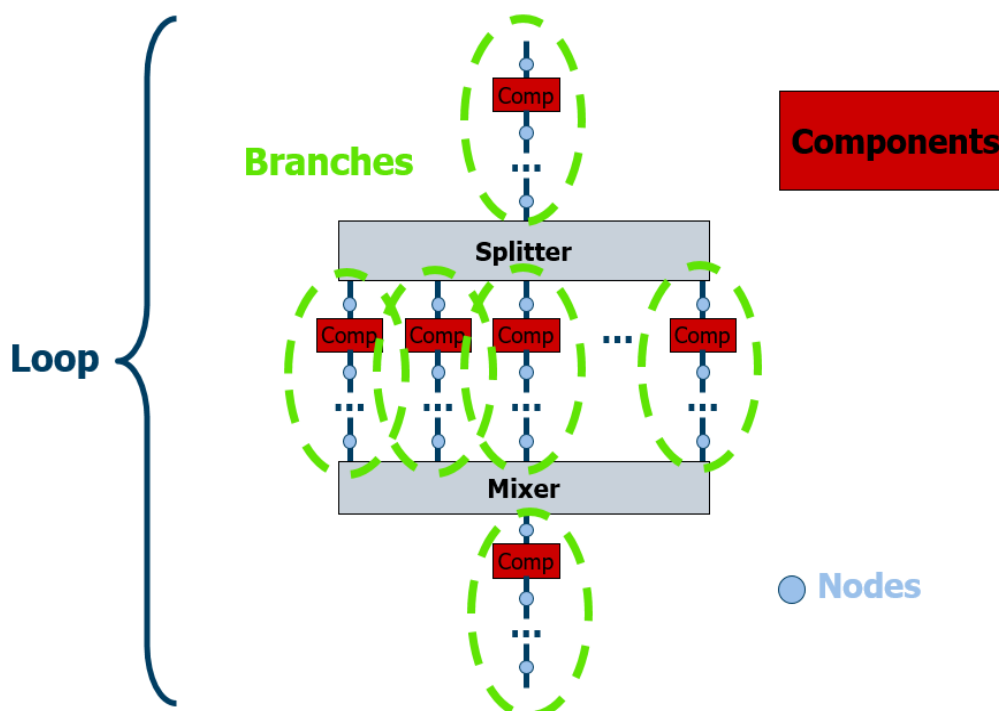


Figura 11 – Representação esquemática de um conjunto de componentes (GARD Analytics and University of Illinois 2002).

Nos dois subcapítulos abaixo vão ser explicados os circuitos para as simulações usando painéis radiantes e piso radiante, sendo também caracterizados os equipamentos utilizados.

3.5.1. Circuito de aquecimento ambiente com painéis radiantes hidráulicos

Os coletores solares selecionados são 3 coletores da marca *Apricus*, modelo AP-10. São coletores de tubos de vácuo do tipo *Heat-pipe*, e apresentam por isso uma eficiência maior para temperaturas mais baixas comparativamente aos coletores planos. Possuem uma área de abertura de 1.342m^2 , o rendimento ótico do coletor (a_0) tem o valor de 0.456 e os coeficientes de perdas térmicas (a_1 e a_2) o valor de $-0.9656\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ e $-0.00225\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K}^2)$. O caudal de ensaio do fluido térmico é de $0.0000545\text{ m}^3/\text{s}$. (Solar Rating & Certification Corporation 2016). Na Figura 12 temos o esquema do circuito completo para a simulação dos painéis radiantes.

O *EnergyPlus* utiliza o modelo de eficiência de coletores solares segundo as Normas *ASHRAE*, que são certificados por uma empresa Americana de nome *Solar Rating & Certification Corporation*.

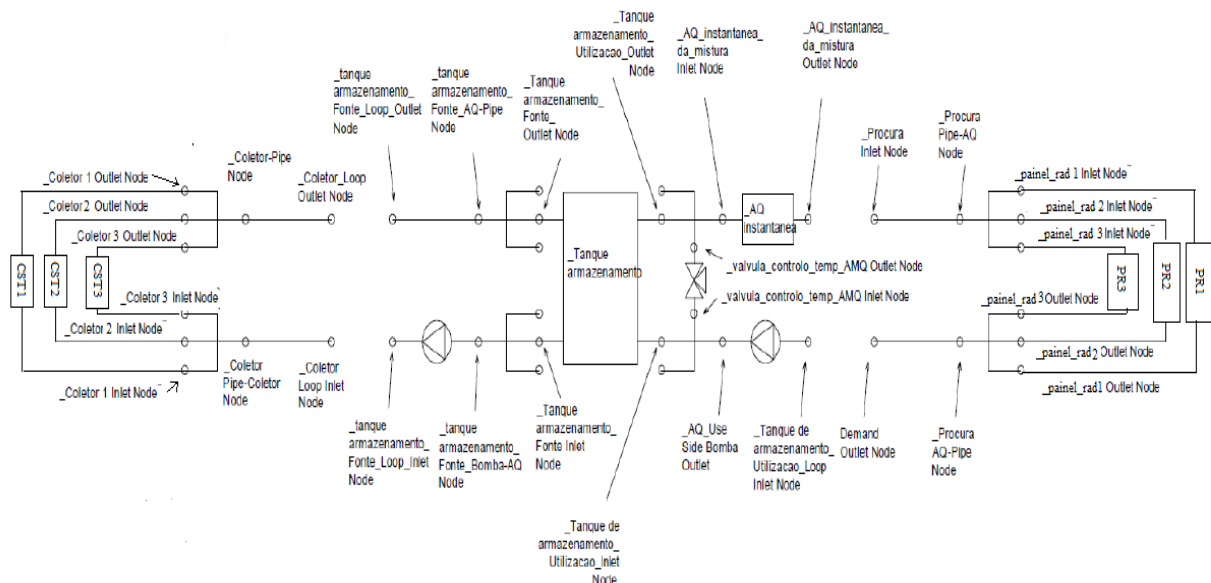


Figura 12 - Esquema do circuito de aquecimento do ambiente utilizado na habitação através da utilização de painéis radiantes.

Além dos três coletores, neste circuito temos também duas bombas hidráulicas, um tanque de armazenamento, um termostato e três painéis radiantes hidráulicos.

A bomba entre os coletores solares e o tanque de armazenamento é de caudal constante, por sua vez a bomba entre o tanque de armazenamento e os painéis radiantes é de caudal variável. O consumo de energia e o caudal das bombas são ajustados automaticamente pelo programa. O tanque de armazenamento possui uma capacidade de 500 l e um coeficiente de perdas térmicas de 0.5W/K, sendo auxiliado por um sistema de apoio que possui um tanque de 5.68l. O sistema de apoio é constituído por uma resistência elétrica de 2000W que liga quando os coletores solares não conseguem aquecer a água do tanque de armazenamento (O tanque do sistema de apoio está a jusante do tanque principal, e é necessário porque os tanques no *EnergyPlus* não são estratificados. Na simulação atual optou-se por deixar sempre a resistência desligada para testar ao máximo a capacidade do

sistema solar térmico). A bomba hidráulica é auxiliada por um controlador que, quando a diferença de temperatura entre o tanque de armazenamento e os coletores solares for superior a 10°C, liga, e desliga quando a diferença de temperaturas for de 2°C. Existe também uma válvula de controlo de temperatura para permitir controlar a temperatura da água que vai para os painéis radiantes.

Existem dois painéis radiantes no piso 02 e um painel no piso 01. Os painéis utilizados tem uma potência máxima de aquecimento de 700 W, um caudal mássico de 0.04 kg/s e a temperatura de funcionamento dos painéis é de 60°C (na simulação a temperatura da água quente depende da radiação solar disponível em cada dia, mas está limitada a 60°C devido à existência da válvula de mistura).

3.5.2. Circuito de aquecimento ambiente com piso radiante hidráulico

O circuito da simulação do piso radiante é praticamente idêntico ao circuito de simulação com painéis radiantes. A única diferença consiste na utilização do piso radiante hidráulico em vez dos painéis radiantes hidráulicos.

O piso radiante é utilizado no piso 02 e 01 da habitação, com uma área de 18.4m² por piso.

A parte inferior do piso é constituída por betão armado com um espessura de 0.25m, a seguinte camada é de argamassa (betonilha de regularização) com 0.09m, depois vem a cortiça como material isolante de 0.10m de espessura, onde vão ser colocados os tubos por onde circula a água. Por fim ainda recebe mais duas camadas, uma de argamassa (betonilha de regularização) com 0.055 m e por fim um revestimento final feito em pinho macio de 0.015m de espessura.

Na Figura 13 podemos visualizar o esquema do circuito para a simulação onde é utilizada o piso radiante.

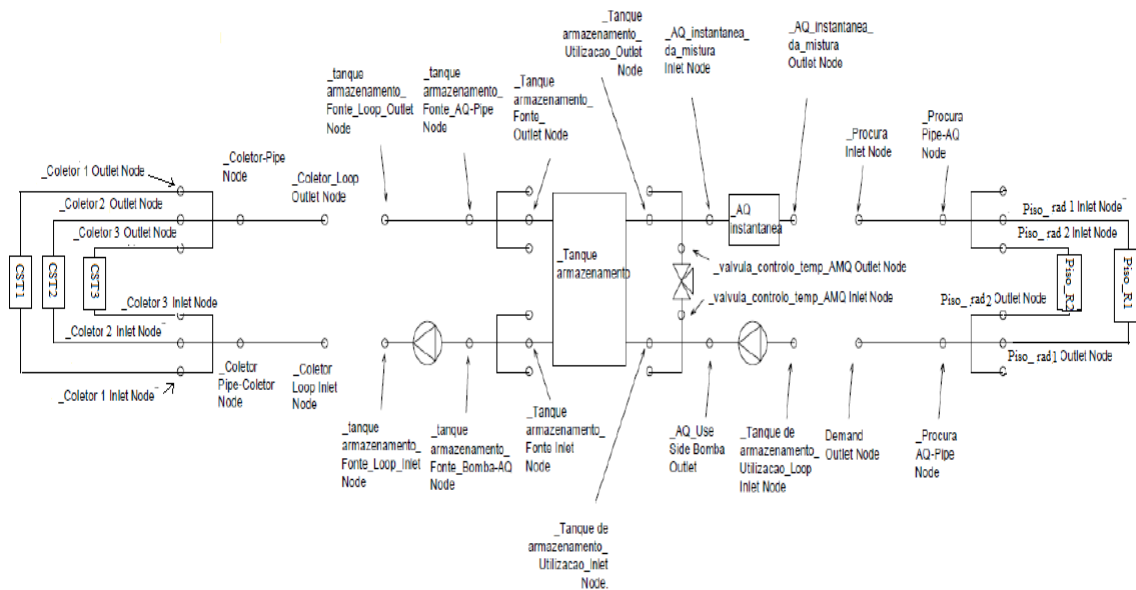


Figura 13 - Esquema do circuito de aquecimento do ambiente utilizado na habitação através da utilização de piso radiante.

3.5.3. Circuito de aquecimento ambiente com convetores hidráulicos

O circuito de climatização com convetores é praticamente igual ao circuito de climatização com painéis radiantes, em que a única diferença é a colocação de convetores na vez dos painéis radiantes.

Existem dois convetores no piso 02 e um no piso 01. Cada convetor tem um caudal mássico de 0.04kg/s uma potência máxima de 1000W e uma temperatura de funcionamento de 50°C.

4. RESULTADOS

Para o caso de estudo iremos ter em conta cinco cenários possíveis de aquecimento da habitação, que terão determinadas especificações. Para todos os cenários o período de simulação é o mesmo: de 1 de novembro a 31 de março. Os cinco cenários encontram-se descritos a seguir.

Nos quatro primeiros cenários foi definido um valor mínimo de temperatura do ar para que os habitantes se sintam confortáveis. Das 00:00h às 17:00h a temperatura tem de ser superior a 18°C e das 17:00h às 00:00h a temperatura tem de ser igual ou superior a 20°C. Este último período corresponde ao tempo em que os habitantes passam mais tempo na casa.

- **Cenário 1 – Painéis radiantes hidráulicos**

Para o cenário 1 são usados os painéis radiantes como solução de aquecimento. É idêntico ao circuito de aquecimento explicado no subcapítulo 3.5.1, com a exceção da resistência elétrica, que será desligada. Sempre que a temperatura do ar na habitação for inferior a 18°C, entre as 00:00H e as 17:00H o sistema de aquecimento é ligado. Nas restantes horas do dia o sistema de aquecimento liga sempre que a temperatura do ar for inferior a 20°C.

- **Cenário 2 – Piso radiante hidráulico**

No cenário 2, a fonte de aquecimento usada é o piso radiante hidráulico, que se supõe instalado nos pisos 1 e 2 da habitação. Este cenário também é bastante idêntico ao circuito de aquecimento explicado no subcapítulo 3.5.2, sendo que a resistência elétrica também estará desligada. O funcionamento do sistema de aquecimento também é igual ao do cenário 1.

- **Cenário 3 – Convectores hidráulicos.**

Para este cenário, serão usados convectores como fonte de aquecimento.

O sistema é idêntico ao do cenário 1, mas em vez de ter painéis radiantes tem convetores. O funcionamento do sistema de aquecimento também é igual ao do cenário 1.

- Cenário 4 – Aquecedores elétricos

Para este cenário iremos usar dois aquecedores elétricos, com uma potência máxima de 1000 W cada, um no piso 1 e outro no piso 2. O funcionamento dos aquecedores elétricos também é igual ao do cenário 1.

- Cenário 5 – Sem sistema de aquecimento

Neste cenário não iremos usar qualquer fonte de aquecimento, mantendo as características físicas da habitação intactas. Deste modo conseguiremos ter uma melhor perceção das variações que possam ocorrer nos restantes cenários.

4.1. Validação do Modelo (Semana Real)

Para proceder à análise dos resultados para as simulações energéticas teve se de fazer uma validação dos resultados da simulação, comparando-os com valores reais medidos. A semana escolhida foi o período entre os dias 13 e 20 de setembro de 2016.

Em primeiro lugar procedeu-se à alteração do ficheiro meteorológico nessa semana, em que os parâmetros alterados foram a temperatura do bolbo seco, pressão atmosférica, a humidade relativa, a radiação global horizontal (G), a radiação direta normal ($G_{O,N}$) e a radiação difusa horizontal (G_d). Os dados referentes às temperaturas de bolbo seco, humidade e pressão atmosférica foram fornecidos pelo Arquiteto Nelson Brito, que possui equipamento para fazer as medições na habitação em estudo. Os dados referentes à radiação global horizontal foram retirados da estação meteorológica da ADAI, que está instalada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. As restantes radiações foram calculadas com recurso a fórmulas empíricas do livro (John A. Duffie 2013). Estas fórmulas podem ser encontradas no Anexo B, tais como as tabelas com os resultados obtidos.

A simulação já existente e criada por (Henriques 2015) sofreu alguns ajustes de modo a obter a melhor aproximação possível entre as medições no interior da habitação e os resultados obtidos com o modelo para o cenário 5. As alterações foram as seguintes:

- A condutividade térmica da pedra calcária foi alterada de $1.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ para $1.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Segundo (Santos e Matias 2006) o valor da condutividade das pedras calcárias pode variar de $2.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a $0.85 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ consoante o seu grau de dureza.
- A absorção solar e visível foram alteradas de 0.92 para 0.7. Entendeu-se que o valor de 0.92 é um valor bastante elevado, pois as paredes exteriores são revestidas a cal branca, o que torna o coeficiente de absorção solar bastante mais baixo.
- As portadas das janelas existentes no piso 01 e 02 foram fechadas, já que as temperaturas reais medidas na casa foram medidas com as portadas fechadas.
- Optou-se por não alterar os coeficientes da ventilação natural. As temperaturas medidas na habitação variam pouco ao longo do dia, apesar de a temperatura do ar variar significativamente, o que indica que há pouca renovação de ar. No entanto, os valores dos caudais de ar de infiltração já eram muito baixos na simulação.

Por fim colocou-se a simulação a correr para a respetiva semana. Depois de obter os resultados da simulação compararam-se os valores das temperaturas do ar interior medidas para os dois pisos com os valores reais disponibilizados pelo Arquiteto Nelson Brito.

No gráfico da Figura 14 é apresentada uma comparação entre as temperaturas do ar interior obtidas através da simulação e dos dados reais, para os dois pisos. Também foi adicionada a temperatura do ar exterior no mesmo gráfico.

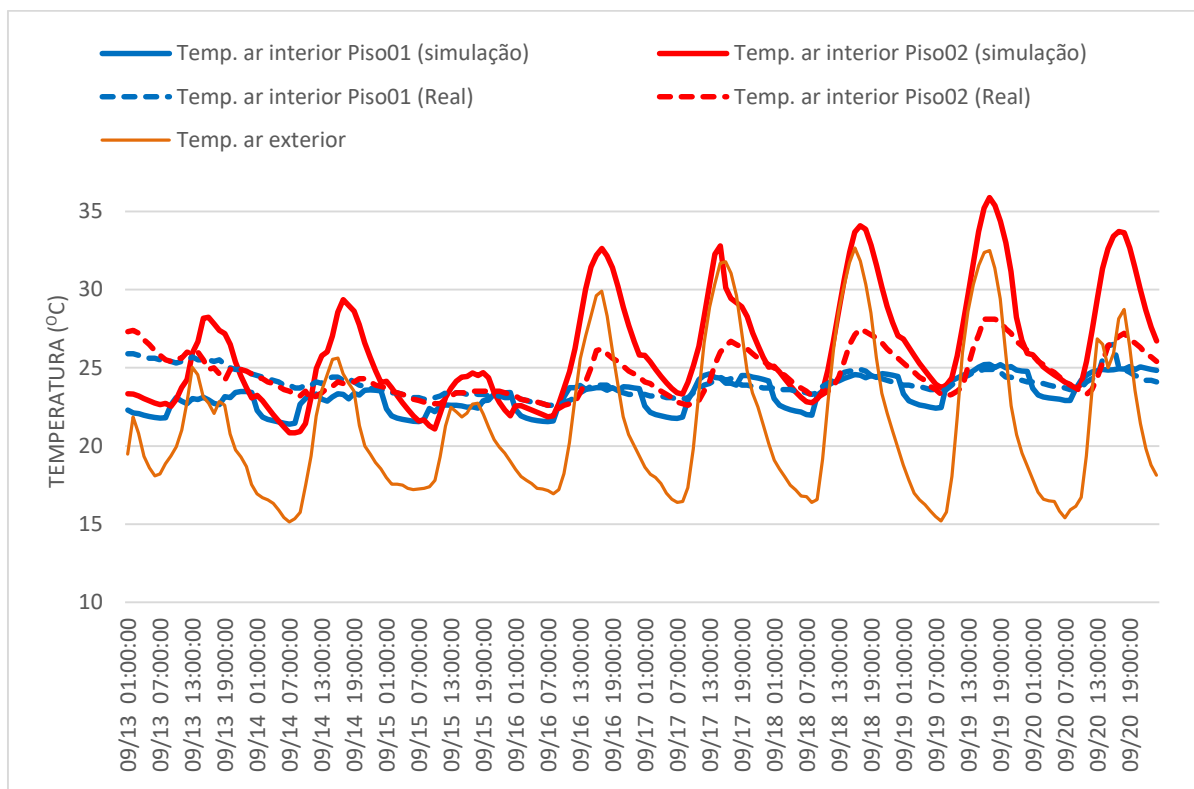


Figura 14 - Gráfico de temperaturas do ar para a simulação da semana real.

Pelo gráfico da figura 14 pode-se observar que as temperaturas das simulações não coincidem exatamente com as temperaturas reais. As linhas a tracejados representam as temperaturas medidas e as linhas contínuas representam as temperaturas obtidas através da simulação. O piso 02 apresenta temperaturas mais irregulares, em que os picos da temperatura obtida por simulação quase acompanham a variação da temperatura exterior (apesar de as portadas estarem fechadas, a ventilação natural ser muito baixa na maior parte do tempo, e terem sido alterados os valores dos coeficientes de absorção solar das paredes exteriores) enquanto que os valores medidos têm uma amplitude muito menor ao longo da semana. Não foi possível encontrar a causa desta disparidade, apesar de terem sido empregues todos os esforços nesse sentido, e por isso optou-se por fazer o ajuste com o valor médio. O piso 01 apresenta temperaturas mais regulares, obtendo-se uma razoável concordância entre os valores medidos e os valores obtidos por simulação

4.2. Parâmetros de conforto térmico

Temperatura média do ar

Os gráficos das Figuras 15 e 16 não contemplam todo o período de simulação, que vai do dia 1 de novembro a 31 de março. Como esse período engloba uma enorme quantidade de valores de temperaturas horárias, os gráficos ficam impercetíveis, sendo difícil a sua leitura. Para estes gráficos optou-se por mostrar apenas resultados para um período de 12 dias, que vai do dia 27 de janeiro a 7 de fevereiro. Foi este o período escolhido, pois engloba tanto dias mais frios como dias mais amenos.

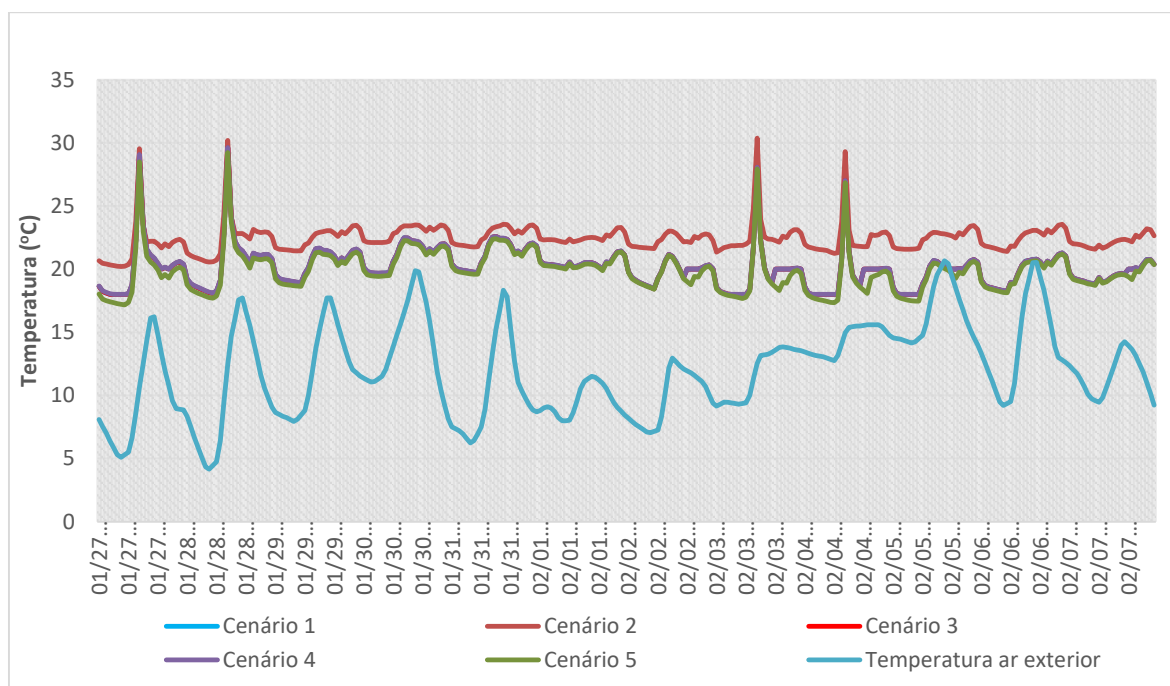


Figura 15 - Gráfico referente a temperatura média do ar interior para o piso 1.

Ao analisar o gráfico da Figura 15 percebe-se que as temperaturas para os diferentes cenários apresentam um comportamento semelhante, sendo o cenário 2 o que regista as temperaturas do ar interior mais elevadas. Neste piso 1, até mesmo o cenário sem aquecimento ambiente (cenário 5) apresenta temperaturas próximas das temperaturas de conforto, muito devido aos ganhos internos e ganhos solares. O cenário 4 (a roxo) representa

a simulação com aquecedores elétricos, que naturalmente consegue sempre manter o *setpoint* de aquecimento. As temperaturas do piso 1 para os sistemas de aquecimento solar sobrepõem-se às temperaturas com os aquecedores elétricos, com exceção do cenário para o pavimento radiante, que apresenta temperaturas sempre mais elevadas. A única explicação para as temperaturas mais elevadas com o piso radiante é a maior inércia térmica devida ao piso em laje de betão, ao contrário das outras simulações em que o piso é de madeira.

Existem uns picos de temperatura registados em quatro dias durante estas duas semanas. Ocorrem com um intervalo de sete dias, o que corresponde aos períodos do fim-de-semana em que os habitantes passam mais tempo na habitação e por sua vez as cargas internas aumentam essencialmente devido a utilização de equipamentos de elevado consumo de energia (como por exemplo um aspirador ou ferro de engomar). Os picos estão talvez um pouco exagerados, mas optou-se por manter assim a simulação por um lado porque não temos dados concretos de como a casa se comporta realmente (a casa está desocupada) e por outro a pequena área de pavimento proporciona que a temperatura possa subir rapidamente no caso de cargas internas consideráveis.

Na Figura 16 temos as temperaturas dos vários cenários para o piso 02 e pode-se observar que existem bastantes picos mais largos. Existem 7 picos mais largos ao longo destes doze dias, representados no gráfico e que correspondem aos ganhos solares. Ao analisar a linha que corresponde à temperatura do ar exterior e comparando com as linhas dos cenários pode se observar que o pico de temperatura do ar exterior coincide com os picos dos quatro cenários. Neste piso já se nota que a temperatura sem aquecimento desce a valores abaixo dos 15°C, mas ainda assim não se torna demasiado desconfortável, devido aos ganhos internos e à pequena área de pavimento. Mais uma vez, a temperatura com os sistemas de aquecimento com energia solar consegue acompanhar a temperatura com os aquecedores elétricos. Tal como no piso 1, a temperatura com o piso radiante é um pouco superior.

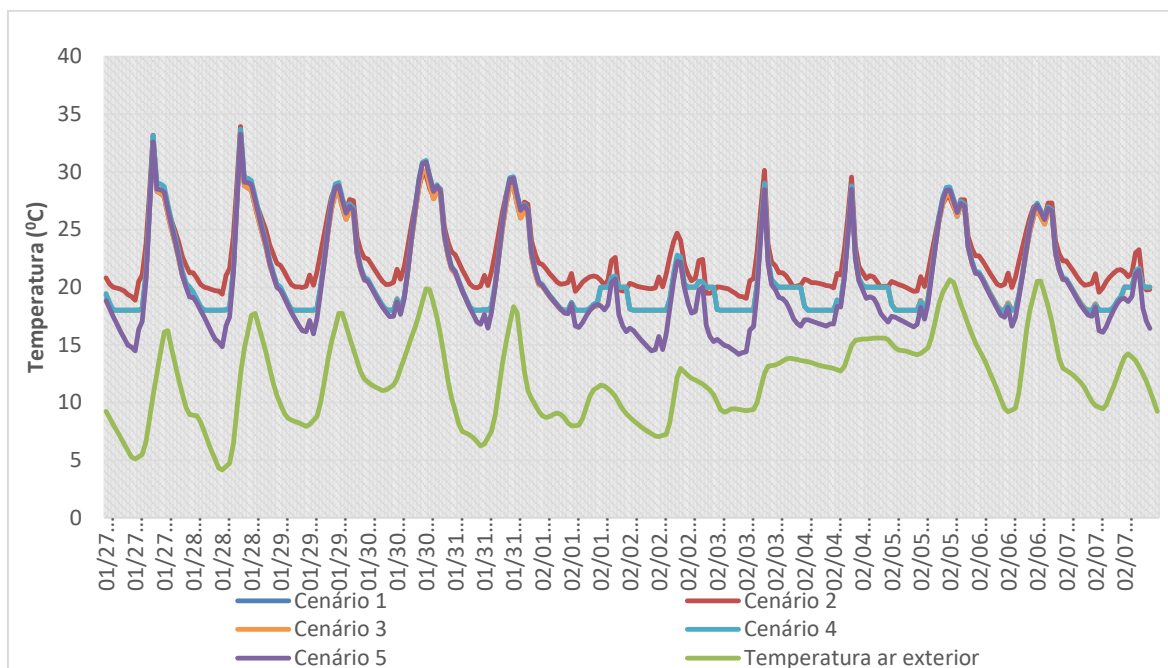


Figura 16 - Gráfico referente a temperatura média do ar interior para o piso 2.

Setpoint de temperatura

Os gráficos de barras das Figuras 17 e 18 permitem tirar conclusões quanto ao número de horas em que é verificado o mínimo de temperatura estipulado no *schedule* de aquecimento. Neste gráfico está também representado o cenário 4 (aquecedores elétricos), para mostrar que a simulação dos aquecedores está correta ao cumprir sempre o *setpoint* de temperatura. Os gráficos estão representados sob a forma de percentagem para uma melhor compreensão. O período de análise corresponde aos cinco meses mais frios, o que perfaz um total de 3624 horas.

Ao analisar a Figura 17, referente ao piso 01, temos o cenário 2 em que a temperatura mínima pretendida é verificada 87% das vezes, seguindo-se o cenário 3 com 77%. Para o cenário 5 em que não existe qualquer tipo de aquecimento do ar ambiente é verificada a temperatura mínima em 41% das horas, por outro lado em 53% das horas a temperatura só é parcialmente satisfeita. Para qualquer dos cenários a percentagem de horas em que não se cumpre o *setpoint* é bastante baixa (inferior a 6%).

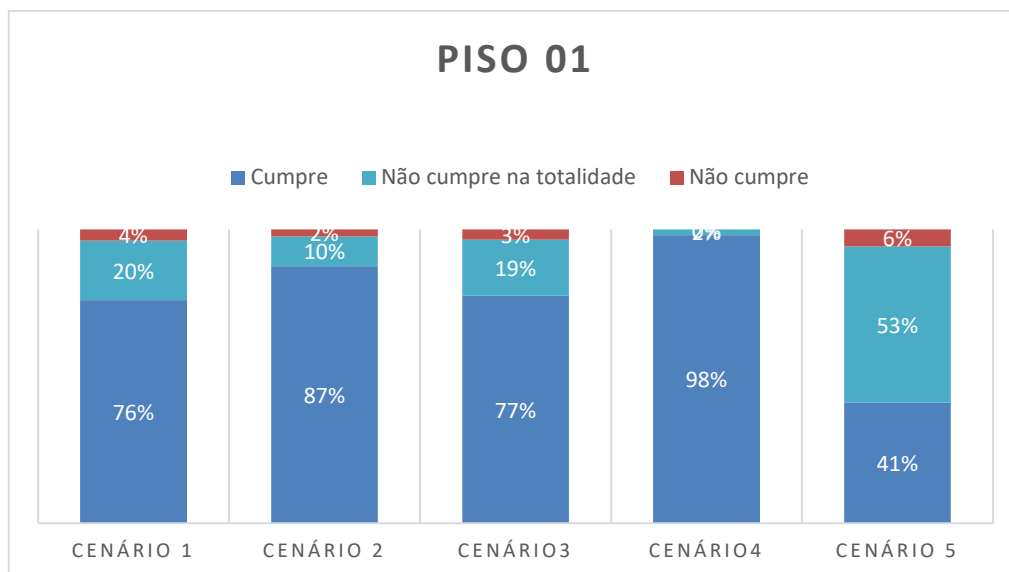


Figura 17 - Gráfico correspondente a percentagem em que o setpoint é cumprido para o piso 01.

Na figura 18, que diz respeito ao piso 02, o número de horas em que a temperatura do ar é sempre igual ou superior ao *setpoint* é bastante idêntico para os dois primeiros cenários. Para o cenário 1, o *setpoint* de temperatura é verificado totalmente em 62% do tempo, e no cenário 2 é verificado em 65% do tempo. O cenário 3 é o que apresenta uma percentagem maior de verificação com um total de 79%. Por sua vez o cenário 5 apresenta uma taxa de verificação do *setpoint* bastante inferior (39%), mas por outro lado a taxa em que o *setpoint* não é cumprido na totalidade apresenta um valor maior (54%). Tal como acontece no Piso 01, a percentagem em que não é verificado o *setpoint* é bastante baixa, com valores inferiores a 7%.

Pela análise das Figuras 17 e 18 o cenário 4 não tem os 100% esperados, de verificação do *setpoint*. No piso 01 tem uma percentagem de 2% em que o *setpoint* não é verificado na totalidade e no piso 02 tem o valor de 1%. Estas percentagens correspondem só alguns minutos, em que houve uma descida repentina da temperatura e o aquecedor demorou algum tempo até restabelecer a temperatura de *setpoint*.

Da análise de ambos os gráficos observa-se que com o sistema de climatização solar sem apoio se consegue uma notável melhoria do conforto térmico dos ocupantes, embora ainda fique aquém dos resultados obtidos com os aquecedores elétricos. Surpreendentemente, é de notar que caso não exista sistema de climatização, a casa ainda

assim consegue manter temperaturas do ar interior bastante aceitáveis na maior parte do tempo.

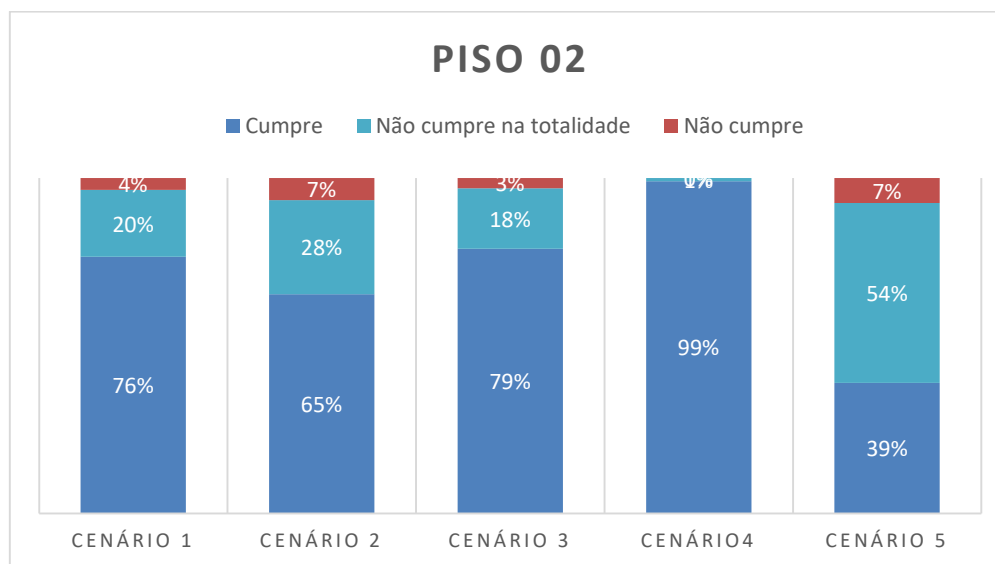


Figura 18 - Gráfico correspondente a percentagem em que o setpoint é cumprindo para o piso 02.

4.3. Temperatura do depósito de água quente

Uma vez que a resistência de apoio não é ligada, a temperatura do depósito é uma variável importante, pois permite-nos saber se o sistema solar térmico está a funcionar corretamente, ou seja, se a energia está a ser captada e se por outro lado está a ser dissipada para os sistemas de aquecimento. As figuras 19, 20 e 21 representam o gráfico de temperaturas dos depósitos para os cinco meses e para os cenários 1, 2 e 3 respetivamente. Nas simulações foi definido um limite máximo de temperatura para o depósito que corresponde a 90°C.

No gráfico da Figura 19, cenário 1, pode se observar que nos limites do período em estudo, que corresponde aos meses de novembro e março, a temperatura da água no depósito é bastante elevada, o que significa que não há necessidade de aquecimento. Nos meses mais frios não se conseguem atingir temperaturas tão altas devido ao maior consumo de energia térmica para aquecimento e à menor disponibilidade de radiação solar, registando-se um máximo de 55°C no período de Dezembro, e com dois picos perto de 90°C registados nos meses de janeiro e fevereiro.

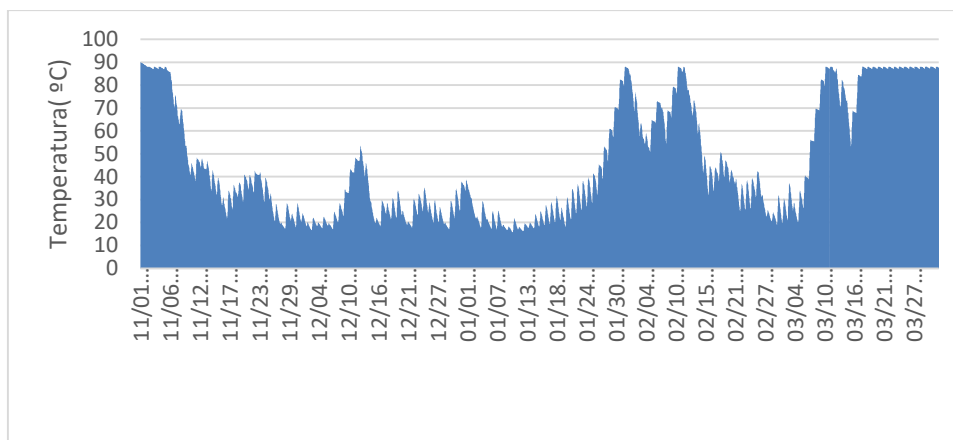


Figura 19 - Gráfico com as temperaturas do depósito para o cenário1.

Para o cenário 2, representado graficamente na Figura 20, as temperaturas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro são ligeiramente mais baixas comparativamente ao cenário 1. No mês de dezembro, a temperatura da água não consegue chegar aos 40°C e no mês de janeiro e fevereiro a temperatura não atinge os 70°C.

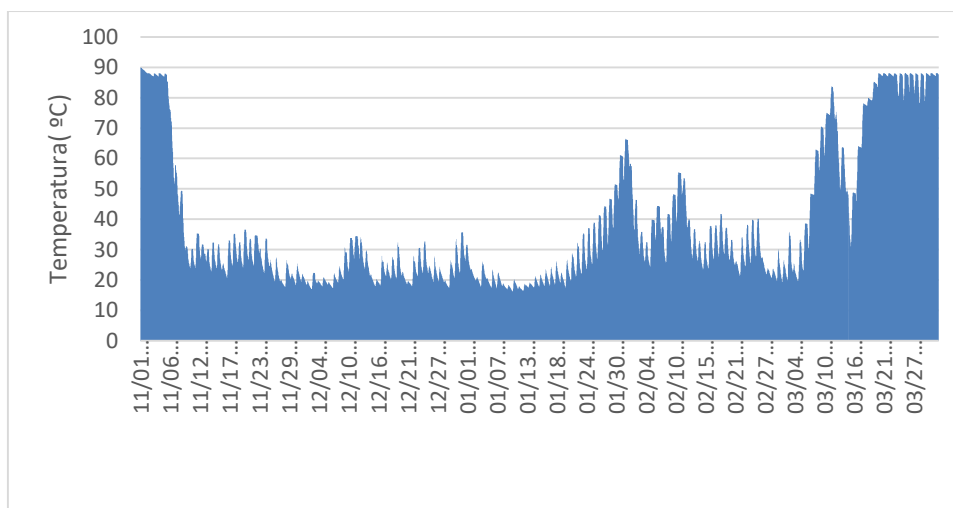


Figura 20 - Gráfico com as temperaturas do depósito para o cenário2.

Para o cenário 3, tirando os meses de novembro e março (em que acontece o mesmo dos outros cenários), temos o mês quase todo de fevereiro em que o depósito consegue manter a temperatura elevada, na ordem dos 80°C. Explicação plausível para este acontecimento é que o sistema de aquecimento não está a necessitar de mais energia para verificar as condições de temperatura.

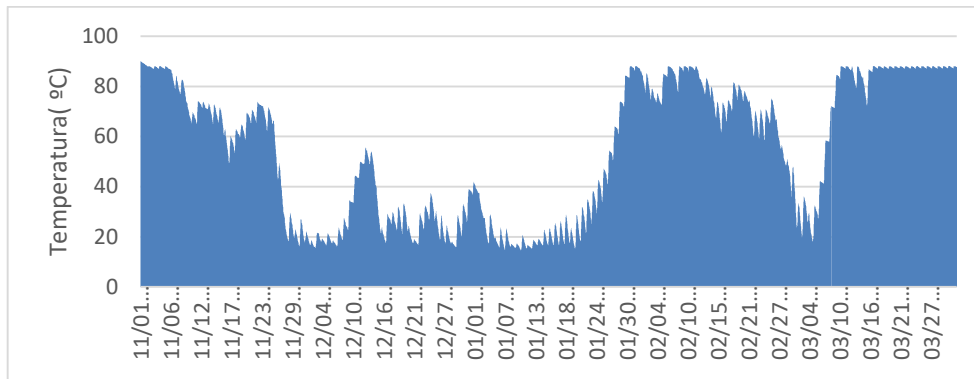


Figura 21 - Gráfico com as temperaturas do depósito para o cenário3.

4.4. Potências internas

4.4.1. Ocupantes

A habitação é habitada por dois ocupantes, que apresentam diferentes taxas metabólicas ao longo do dia, consoante o tipo de atividade, e podem estar ausentes ou presentes na habitação. Através da Figura 22 pode-se observar que a taxa de atividade dos ocupantes incide mais sobre o piso 02 da habitação e no período do fim-de-semana. O máximo de potência registada é de 250 W que corresponde aos 125W por ocupante com nível de atividade ligeiramente elevado. O tempo em que a potência é 0 significa que os ocupantes não se encontram na habitação.

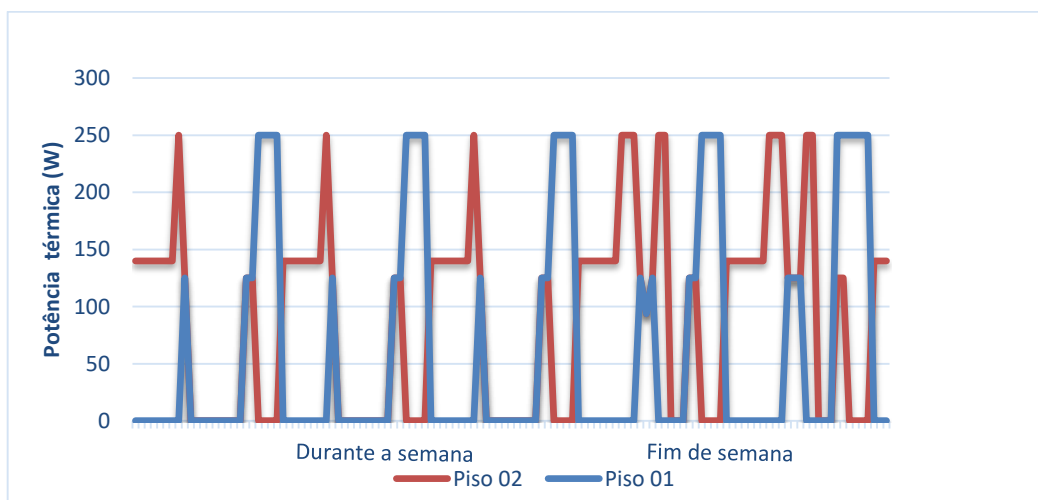


Figura 22 - Gráfico relativo aos ganhos térmicos dos ocupantes para o piso 01 e 02.

4.4.1. Iluminação Artificial

O gráfico da Figura 23 dá nas indicações sobre a potência dissipada pela iluminação durante cinco dias, onde três dias são durante a semana e os outros dois são o fim-de-semana. Pela análise do gráfico pode-se concluir que o piso 02 apresenta mais ganhos térmicos, sendo mais elevado no período do fim-de-semana. Por outro lado o piso 01 regista sempre os mesmos ganhos ao longo dos dias.

Ao longo dos cinco meses o piso 02 consome cerca de 19kWh de energia elétrica e o piso 01 consome 8.5kWh.

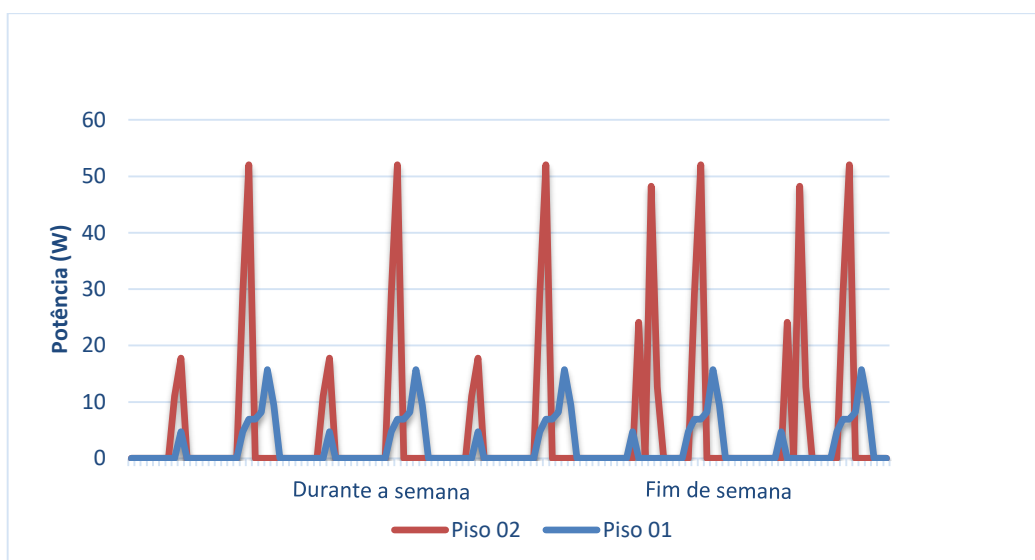


Figura 23 - Gráfico relativo as potências da iluminação para o piso 01 e 02.

4.4.2. Equipamentos elétricos e eletrónicos

Os equipamentos elétricos e eletrónicos apresentam um consumo bastante baixo durante a semana, sendo quase nulo para o piso 01, como se pode observar na Figura 24. O piso 02 e o período do fim-de-semana são os períodos onde a potencia consumida é maior, muito devido a utilização do forno elétrico e do aspirador.

Nos cinco meses de simulação energética são consumidos cerca de 45.6 kWh de energia elétrica para o piso01 e 333kWh para o piso 02.

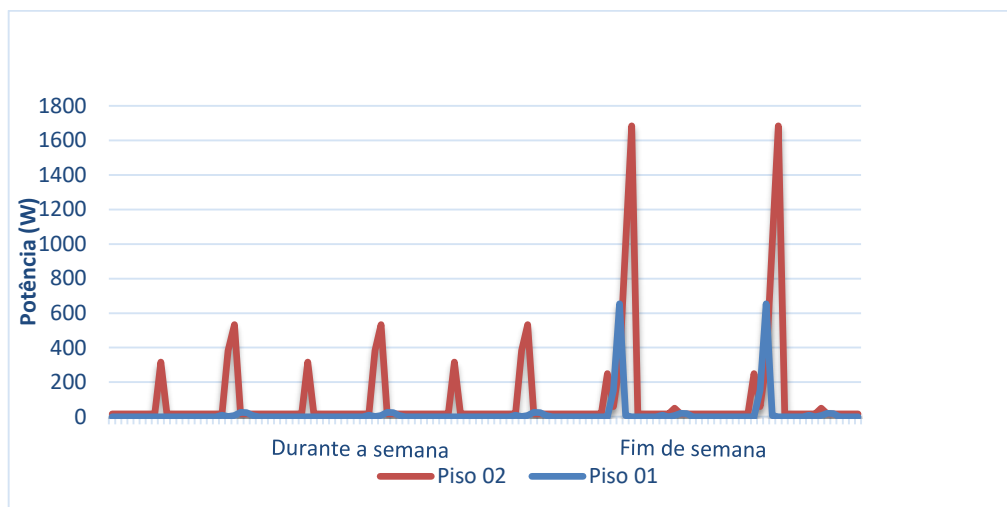


Figura 24 – Gráfico relativo as potências dos equipamentos elétricos para o piso 01 e 02.

4.5. Consumos energéticos e custos

Os equipamentos de climatização estudados emitem uma determinada energia, sendo a energia proveniente de fontes diferentes. Nos três primeiros cenários a energia provém do sol, que através de um sistema solar térmico permite aquecer água do depósito aproveitando esse calor para climatizar a casa e no quarto cenário usa-se energia elétrica para aquecer uma resistência, fornecendo energia sobre a forma de calor.

Na Tabela 6 estão estipulados os consumos de energia térmica nas várias partes do circuito, nomeadamente na entrada dos coletores solares, entrada e saída do depósito, na saída dos equipamentos terminais e a energia térmica dissipada para o ambiente. Também estão representadas duas eficiências, a primeira é a eficiência do sistema que é calculada através da divisão da energia térmica dissipada nos equipamentos terminais pela energia térmica produzida pelos coletores solares. A segunda eficiência é a do equipamento terminal, que é calculado pela divisão da energia térmica dissipada nos equipamentos terminais pela energia térmica fornecida aos terminais.

Tabela 6 - Consumos energéticos e eficiência do sistema para os diferentes cenários.

		Energia térmica dissipada nos equipamentos terminais (MJ)	Energia térmica produzida pelos coletores (MJ)	Energia térmica que entra no depósito (MJ)	Energia térmica que sai do depósito (MJ)	Energia térmica fornecida aos terminais (MJ)	Eficiência do sistema	Eficiência do equipamento terminal
Cenário 1	Piso 01	336.1	2450.4	2454.6	2242.7	2283.8	52%	55%
	Piso 02	931.3						
Cenário 2	Piso01	374.8	2897.5	2902.3	2764.0	2795.5	97%	100%
	Piso 02	2434.3						
Cenário 3	Piso 01	576.4	2275.4	2279.4	2033.4	2057.2	90%	100%
	Piso 02	1480.9						
Cenário 4	Piso 01	818.6	-	-	-	-	-	100%
	Piso 02	1956.8						

Ao analisar a Tabela 6, conclui-se que o programa *EnergyPlus* não considera perdas nas tubagens, sendo que as únicas perdas registam-se no depósito e na fase de consumo.

A quantidade de energia recebida nos coletores é diferente entre cenários, pois a água que entra nos coletores vem do depósito (circuito fechado) a temperaturas diferentes, o que vai modificar a eficiência do coletor. A temperatura do depósito de água quente ao longo do período de simulação pode ser verificada nos gráficos das figuras 19, 20 e 21.

A energia térmica que sai do depósito é inferior aquela que é consumida pelos equipamentos. Isto pode dever-se a erros de simulação no cálculo iterativo dos circuitos ou que parte do trabalho realizado pela bomba é adicionado como energia à água.

O cenário 1 é o que apresenta uma eficiência do equipamento terminal mais baixa de 55%, seguindo-se o cenário 3 e 2 que apresentam eficiências de 100%. O resultado da eficiência para o cenário 1 tem uma grande discrepância para os outros cenários, o que se pensou ser devido ao facto de parte da radiação libertada pelos painéis radiantes ser diretamente absorvida pelas paredes e dissipada para o exterior. Para provar esta teoria modificou-se a simulação, em que a taxa de energia radiante que incide nas superfícies foi baixada para 0.01 e a taxa de energia radiante que incide nos ocupantes foi aumentada para

0.99. Esta alteração fez com que a eficiência do equipamento passa-se para os 100%, porque grande parte da energia radiante deixou de ser diretamente dissipada através das superfícies.

Quanto a eficiência do sistema o cenário 1 tem 52%, seguindo-se o cenário 3 com 90% e o cenário 2 com 97%. Para os três cenários foi definido um coeficiente de perdas térmicas pela parede do depósito de 0.5 W/K, e por isso a energia térmica fornecida pelos coletores não é a mesma que chega aos equipamentos terminais. Para o cenário 1 são também acrescentadas as perdas nos equipamentos de consumo, como explicado no parágrafo acima.

O piso 02 é a zona da casa onde se verifica maior dissipação de calor por parte dos equipamentos de aquecimento, sendo o cenário 2 aquele que tem o valor mais elevado, de 2434.3MJ. No total o cenário 2 tem um consumo energético de 2809.1MJ seguindo-se o cenário 3 com 2057.2 MJ e o cenário 1 com 1267.5 MJ. Uma das possíveis causas para o cenário 2 ter uma maior dissipação de energia térmica para aquecimento é o possível efeito da inércia térmica da laje de betão do pavimento radiante que tem capacidade de armazenar calor e ir libertando aos poucos.

Os consumos energéticos do aquecedor são uma variável importante, pois este tipo de consumo envolve energia elétrica que acarreta um determinado custo para o ser humano. Os equipamentos de climatização dos outros cenários não tem grandes custos no período de utilização mas sim no período de construção e implantação do sistema, enquanto que os aquecedores elétricos tem um valor baixo de compra mas um valor elevado de utilização. O cenário nº4, que corresponde ao aquecimento do ar utilizando aquecedores elétricos, possui um determinado consumo ajustado consoante as necessidades de aquecimento. No total dos cinco meses são consumidos 818.6 MJ para o piso 01 e 1956.8 MJ para o piso 02. O aquecedor elétrico tem um consumo total de 925kWh de energia elétrica. Em termos de custos, se por exemplo a casa tiver uma potência contratada a EDP de 3.45kVA e uma tarifa simples vai pagar 0.1652 €/kWh, ou seja os ocupantes da casa vão desembolsar cerca de 153€/ano pela energia consumida pelos aquecedores elétricos.

Se tivermos em conta os custos de compra e instalação dos equipamentos temos os seguintes valores representados na Tabela 7. Estes custos são valores aproximados e não exatos.

O preço base de um sistema solar térmico em Portugal com coletores de tubos de vácuo ronda os 5000€, já contando com a instalação que corresponde a 20% do custo do equipamento (Vulcano 2016). Os coletores solares não são os mesmos das simulações pois não estão a venda em Portugal. Um painel radiante de 300cm de altura e 600 cm de comprimento custa 46€ na empresa (HiperClima 2016). Para o piso radiante não existe um valor fixado por m² porque depende do tipo de material usado e da configuração, mas defini um valor mínimo de 2500€. Os convetores hidráulicos de parede tem preços a partir de 150€ por unidade (Archiexpo 2016). Os aquecedores elétricos podem ser comprados em qualquer superfície comercial com um preço base de 40€ (ElCortInglés 2016).

Tabela 7 – Preços base dos equipamentos e instalação para os diferentes cenários.

Preço (€) (c/iva)	Sistema solar térmico com 3 coletores	3 Painéis radiantes	Piso radiante	3 Convetores de parede	2 Aquecedores elétricos
Cenário 1	5000	138	-	-	-
Cenário 2	5000	-	2500	-	-
Cenário 3	5000	-	-	450	-
Cenário 4	-	-	-	-	80

Tendo em conta estes valores o cenário 2 pode chegar aos 7500€ só na compra e instalação do equipamento, sendo o cenário 4 o que representa menor custo de compra com 80€.

O custo de compra e do consumo de eletricidade para o cenário 4 fica com o valor de 233€ no primeiro ano de utilização. Por exemplo se quisesse implementar o cenário 1 com um custo superior a 5000€, seriam necessário mais de 30 anos para fazer face ao investimento utilizando os aquecedores elétricos. Se em vez do cenário 1 quisesse instalar o cenário 2 esse período era superior a 40 anos. De referir que os custos referentes ao consumo de eletricidade por parte das bombas hidráulicas e os custos de manutenção do sistema, não estão descritos na Tabela 7, o que eleva ainda mais o período de retorno. Em termos económicos não é viável implementar um sistema destes nesta habitação. No entanto, as simulações comprovam o seu bom funcionamento, podendo mesmo chegar a 100% de horas em que cumpre o valor do *setpoint* se o sistema de apoio for ligado.

4.6. Ganhos e Perdas Energéticas na Habitação

Nas Figuras 25, 26, 27 e 28 podem ser visualizadas graficamente as magnitudes das trocas de energia térmica para os quatro cenários. O balanço energético na casa tem de ser nulo, ou seja, a energia que entra na casa é igual a energia que sai.

Para todos os cenários os equipamentos elétricos e os ocupantes têm uma parcela importante na energia fornecida a casa. No cenário 1 (Figura 25) essa energia é maior do que a energia fornecida à casa pelo equipamento de climatização.

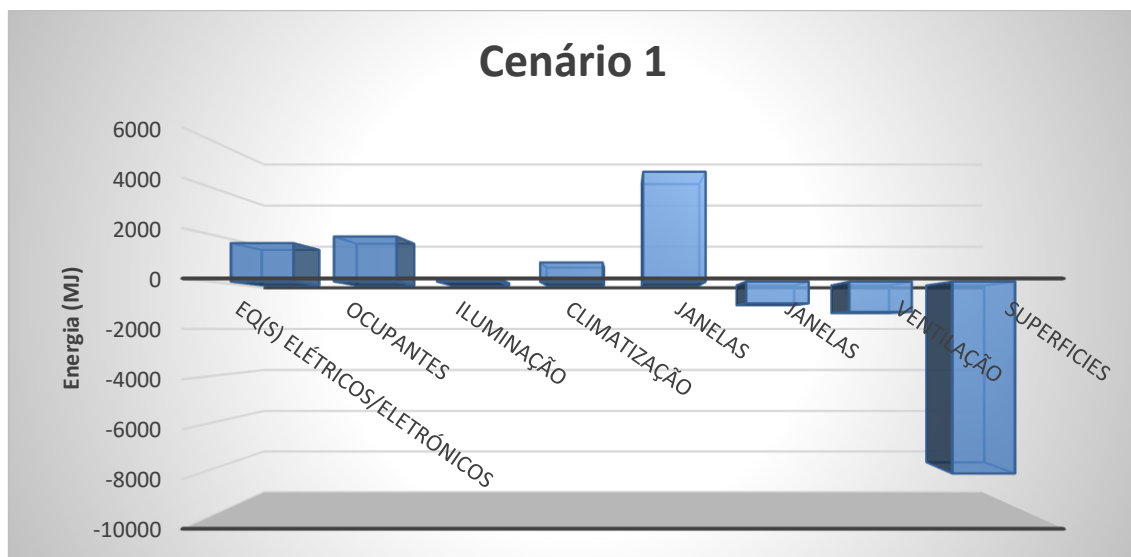


Figura 25 – Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 1.

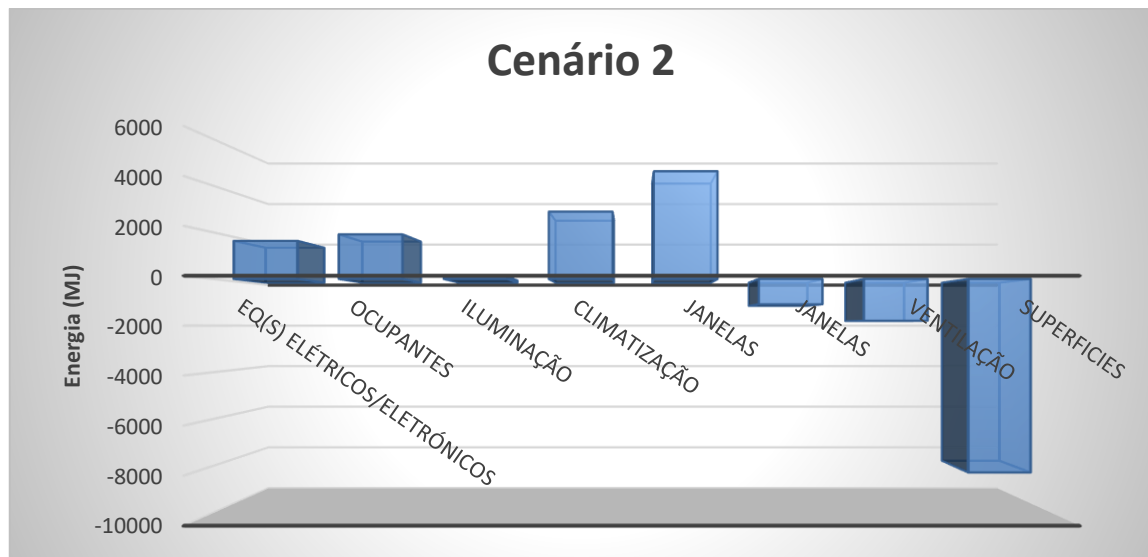


Figura 26 - Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 2.

Os ganhos solares através dos envidraçados são a principal responsável pelo fornecimento de energia na habitação, com valores na ordem dos 4500MJ. Em todos os cenários esta diferença é de quase o dobro comparando com os ganhos energéticos provenientes da climatização.

A energia é perdida essencialmente através das superfícies da casa como paredes, tetos e pavimentos. Esse valor anda próximo dos 8000 MJ para todas as simulações. Além das superfícies, a casa também perde calor pelas portadas devido à ventilação natural. Essas perdas andam na ordem dos 1500 e 2000MJ.

Já que a principal fonte de perdas na casa são às superfícies e as portadas, uma medida a ter em conta seria um melhor isolamento térmico da casa e das portadas de modo a diminuir as perdas térmicas. No inverno seria uma boa medida, mas no verão teria de se analisar melhor a situação, uma vez que a casa pode necessitar de perder calor.

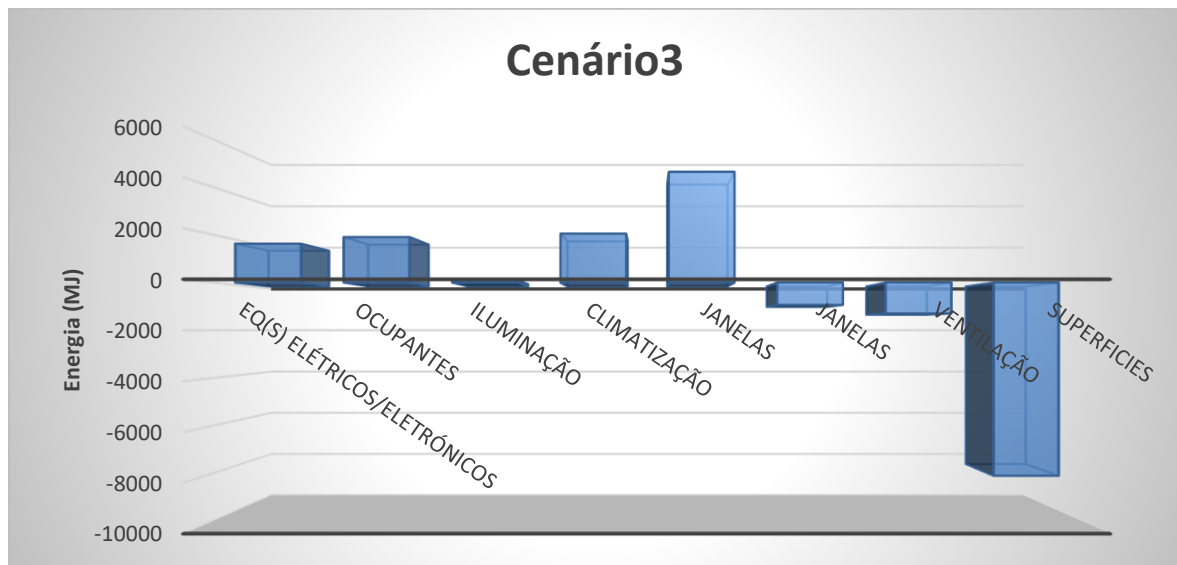


Figura 27 - Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 3.

A iluminação artificial representa o menor ganho térmico para a casa, com cerca de 100 MJ. Os equipamentos elétricos correspondem a cerca de 2000 MJ de ganhos térmicos no período de simulação. Os equipamentos elétricos, os ocupantes e a iluminação tem os mesmos valores de energia para todos os cenários.

O valor de energia térmica fornecido pela climatização é de 800 MJ para o cenário 1, para os restantes cenários o valor anda próximo dos 3000MJ.

Tirando o cenário 1, em que a climatização tem pouca influência nos ganhos energéticos, nos restantes cenários a climatização tem uma parcela importante, mesmo não sendo a mais elevada.

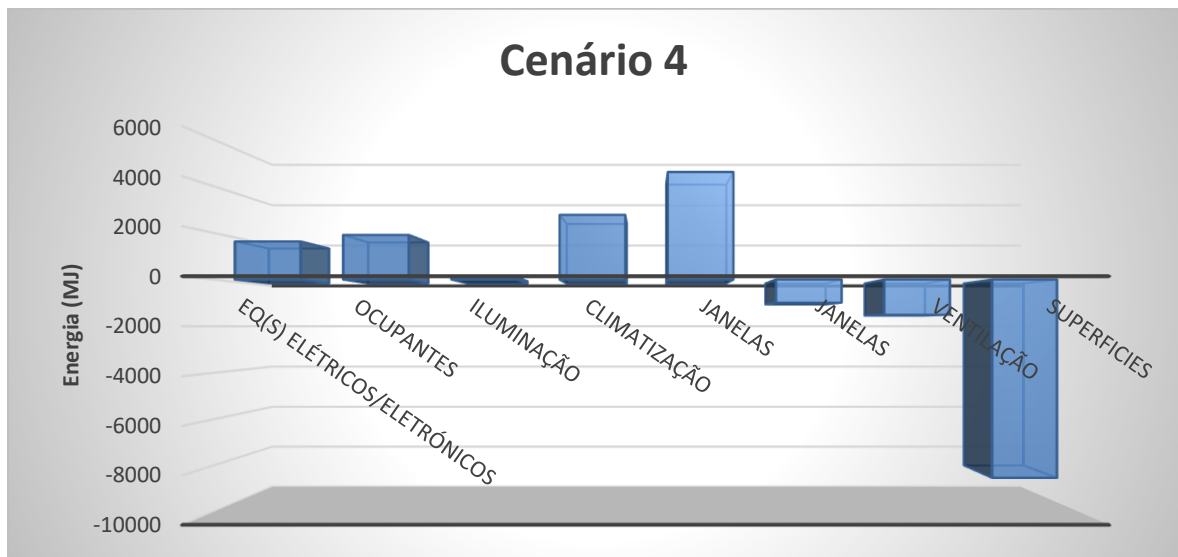


Figura 28 - Gráfico dos ganhos e perdas energéticas para o cenário 4.

5. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve por base a realização de um estudo de simulação de um sistema solar térmico no aquecimento ambiente de uma habitação.

Na primeira parte dos resultados é apresentada uma validação do modelo de simulação, para as condições reais do edifício (sem ocupação), usando para o efeito um ficheiro meteorológico adaptado com os dados meteorológicos da semana das medições. Através do ajuste das propriedades de alguns materiais construtivos, parâmetros da ventilação natural, propriedades do revestimento das paredes exteriores e propriedades das portadas das janelas foi possível obter uma boa correspondência de temperaturas no piso 1, mas no piso 2 o acerto revelou-se mais difícil.

Com o modelo validado, foram realizadas cinco simulações anuais, para o clima de Coimbra. A primeira conclusão é que a casa não é muito fria, pois mesmo sem climatização as temperaturas do ar mantêm-se sempre acima dos 15°C, em especial no piso 1. Isto pode resultar de vários fatores como os ganhos solares e os ganhos internos, mas também por a casa estar num local abrigado dos ventos, bem exposto à radiação solar, e com paredes em contacto com o solo. A simulação apresenta picos de temperatura até aos 30°C, o que para o inverno é um valor bastante elevado, mas que pode ocorrer devido aos ganhos solares e ganhos internos, e também devido à reduzida dimensão dos compartimentos.

Analisando as temperaturas médias do ar interior, constatou-se que a simulação energética que contém o piso radiante apresenta valores de temperatura mais elevados que as outras simulações (isto poderá estar relacionado com a maior inércia térmica devido à laje do piso).

Ao analisar as trocas e perdas de energia na casa conclui-se que a parte da climatização não tem grande influência na habitação. Para os três cenários os ganhos solares provenientes das janelas tem grande influência na temperatura da casa. A energia proveniente dos equipamentos elétricos e eletrónicos tal como os ocupantes tem também grande preponderância no aquecimento da habitação, no sentido inverso a iluminação

artificial tem pouca relevância. Às perdas energéticas acontecem na sua maioria pelas superfícies sendo que a ventilação também tem um contributo importante, pelo que uma medida interessante poderia ser isolar termicamente as paredes e telhado da habitação.

De acordo com os resultados obtidos com o programa *EnergyPlus*, o sistema de piso radiante é a melhor alternativa em termos energéticos com 97% de eficiência do sistema, seguindo-se o sistema com convetores com 90% e o de painéis radiantes com 52%.

Se os parâmetros económicos também forem importantes, o sistema de piso radiante já não é a melhor alternativa. Ao ter em conta só os cenários com o sistema solar térmico ligado ao equipamento de climatização, o sistema com convetores parece ser uma solução mais viável. O sistema consegue verificar as condições de temperatura a maior parte do tempo, e é melhor que o sistema de piso radiante em termos de custos. A instalação do sistema de piso radiante tem custos mais elevados comparando com o sistema de convetores porque o piso da casa tem de ser modificado, o que aumenta bastante o preço.

Resumindo, face às incertezas das simulações não é possível garantir qual o sistema melhor mas pode-se afirmar que todos mostraram ser capazes de melhorar significativamente o conforto dos ocupantes. Se tiver de optar por um sistema de aquecimento alternativo e que provenha de uma energia limpa, o sistema com convetores é a melhor solução. Caso não tenhamos esse aspeto em consideração o aquecedor elétrico é a solução mais económica, mas menos amiga do ambiente, a menos que sejam instalados painéis fotovoltaicos para produzir a energia correspondente à consumida nos aquecedores, mas nesse caso também temos de contar com os custos do sistema solar fotovoltaico.

Como sugestão para trabalho futuro sugiro que se utilize um sistema solar térmico para aquecimento do ambiente e das águas quentes sanitárias. Nesta dissertação só foram feitas simulações para o sistema de aquecimento do ambiente, mas penso que se for feita uma junção com o sistema de aquecimento de águas quentes sanitárias será possível rentabilizar melhor os equipamentos. Caso sigam a sugestão, aconselho a utilizar uma habitação de maiores dimensões e que não tenha tanta influência de cargas internas.

6. REFERÊNCIAS

- Águas, Miguel P. N. “Conforto Termico.” Módulo da Disciplina de Mestrado, IST /DEM, 2000.
- Archiexpo. *Archiexpo*. 1 de 2017. <http://www.archiexpo.com/pt/prod/kampmann-gmbh/product-99452-1616779.html>.
- Archiexpo. *Archiexpo*. 2016. <http://pdf.archiexpo.es/pdf-en/jaga/tempo-freestanding/51728-285824.html> (acedido em 12 de 2017).
- ASHRAE. *ASHRAE HANDBOOK: Fundamentals (SI), Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. Atlanta, 2009.
- Awbi, H. *Ventilation of Buildings-Second Edition*. Spon Press, 2003.
- Bois, Du. *Tenth paper a formula to estimate the approximate surface are if*. Arch Intern Med 17(6–2):863–871, 1916.
- Borders Underfloor Heating Ltd. “Borders Underfloor Heating.” *Floor Construction Diagrams for Underfloor Heating*. 2009. http://www.bordersunderfloor.co.uk/underfloor_heating_diagrams.htm (acedido em 5 de 2016).
- BRANZ. *Process for template modelling*. s.d. http://www.branz.co.nz/cms_display.php?sn=169&st=1&pg=9706 (acedido em 6 de 2016).
- Brito, Nelson. “Residential buildings as expanded territory for ESCO’s.” 2015.
- BSR/ASHRAE Standard 55P. “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.” Public Review Draf, American Society of Heating,, 2003.
- Cengel, Yunus, e Michael Boles. *Thermodynamics An engineering approach*. Special India, 5ª edição, 2007.
- Department of Energy. *Energy.Gov*. 2015. <http://energy.gov/energysaver/radiant-heating> (acedido em 5 de 2016).
- Department of Energy. *Getting Started with EnergyPlus*. Department of Energy-United Sates: University of Illinois and the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laborator, 2015.
- Department of Energy. *Imput Output Reference- the encyclopedic reference to EnergyPlus Impt ad Output*. Department of Energy-United Sates: University of Illinois and the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laborator, 2015c.
- ElCortInglés. *elcorteingles.pt*. 2016. http://www.elcorteingles.pt/loja/electronica/browse/productDetailCultural.jsp?productId=A15212769&categoryId=993.1457020101&selectedSortBy=numSales&navAction=jump&navCount=0&brandId=&trail=&trailSize=0&isProduct=true&selectId=&utm_source=kuantokusta&.
- European Commission. “Analysis of options to move beyond 20% greenhouse gas emission reductions and assessing the risk of carbon leakage.” *EU law and Plublications*. 26 de 5 de 2010. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52010DC0265> (acedido em 6 de 2016).

- European Commission. “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions Energy Roadmap 2050.” *EU law and Publications*. 15 de 12 de 2011. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0885> (acedido em 6 de 2016).
- GARD Analytics and University of Illinois. “Lecture 13: HVAC Loops, Nodes, and Connections.” 2002.
- Google Maps. *Google Maps*. 2016. <https://www.google.pt/maps/place/Coimbra/@40.211726,-8.4280434,157m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xd22f8c2c7cbeeb7:0x400ebbde49031d0!8m2!3d40.2048286!4d-8.4403573> (acedido em 6 de 2016).
- GreenTerraFirma. 2008. http://greenterrafirma.com/evacuated_tube_collector.html (acedido em 9 de 2016).
- Henriques, Sara Patrícia Marques. “Soluções de Elevada Eficiência Energética na Reabilitação de um Edifício de Habitação.” Dissertação de Mestrado, Coimbra, 2015.
- HiperClima. *HiperClima.pt*. 2016. <http://www.hiperclima.pt/media/TabelaGeral17Fev2012.pdf>.
- INE. *Instituto Nacional de Estatística*. 2014. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0008223&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2 (acedido em 6 de 2016).
- INE. *Instituto Nacional de Estatística*. 2010. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0005984&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2 (acedido em 6 de 2016).
- INNOVA. 2002. http://www.labeee.ufsc.br/antigo/arquivos/publicacoes/Thermal_Booklet.pdf (acedido em 6 de 2016).
- ISO 7730/2005. “Ambientes Térmicos: Instrumentos e métodos para medição de parâmetros físicos.” 2005.
- Duffie A. John, William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- Lamberts, Roberto, Antonio Augusto Xavier, e Solange Goulart De Vecchi. “Conforto e stress térmico.” Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- LusoSol.pt. *LusoSol.pt*. 2015. <http://www.lusosol.com/colectores.htm> (acedido em 1 de 2017).
- Ofaclimatizacao. “Bomba de calor AQS - Manual de utilização.” 2014.
- Pereira, Alfredo Costa. “Simulação dinâmica do comportamento termo-higrométrico.” Artigo Técnico, ISEP-CIDEM, 2004.
- Pereira, H et al. *Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa EnergyPlus-8.0*. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- Santos, Carlos Pina, e Luis Matias. *Coeficientes de transmissão térmica da envolvente dos edifícios*. Editado por LNEC. Lisboa, 2006.
- SketchUp. *Sketchup*. 2017. <https://www.sketchup.com/>.

- Solar Rating & Certification Corporation. *secure.solar-rating*. 08 de 2016.
<https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsReport.aspx?device=100&units=METRICS>
- SPRA. *Scottish Plastics And Rubber Association*. 2011.
<http://www.spra.org.uk/news/201105/potential-plastics-and-rubber-low-cost-solar-thermal-collectors> (acedido em 5 de 2016).
- SZ FRICO. *Directindustry*. s.d. <http://www.directindustry.com/prod/frico/product-15991-541637.html> (acedido em 5 de 2016).
- Vulcano. *vulcano.pt*. 2016.
http://pre.pt/eurotubo/pdf/Produtos/Paineis%20Solares/Paineis%20Solares-Vulcano/Tabela/Tabela%20Precos%20Solar%20VULCANO%2010_2014.pdf.
- Watson, Richard D., Chapman, Kirby S. *Radiant Heating and Cooling Handbook*. United States of America: McGraw Hill Handbooks, 2002.

Anexo A – Taxas de ocupação e utilização das cargas internas

Este anexo contempla as tabelas com as taxas de ocupação dos ocupantes e as taxas de utilização dos equipamentos elétricos e iluminação artificial para os diferentes pisos da casa.

Tabela 8 - Fração de ocupação do piso 00 e 01 ao longo do ano (Henriques 2015).

Horas		Piso 00						Piso 01					
		Perfil de utilização habitual			Férias de Natal (20-27/12)			Perfil de utilização habitual			Férias de Natal (20-27/12)		
		Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00												
01:00	02:00												
02:00	03:00												
03:00	04:00												
04:00	05:00												
05:00	06:00												
06:00	07:00												
07:00	08:00												
08:00	09:00							0.5					
09:00	10:00												
10:00	11:00								0.5	0.5	1	0.5	0.5
11:00	12:00		0.25						0.375	0.5	1	0.5	0.5
12:00	13:00								0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
13:00	14:00										0	0.5	0.5
14:00	15:00					0.25					0.5	0.375	0.5
15:00	16:00											0.5	0.5
16:00	17:00												
17:00	18:00												
18:00	19:00							0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
19:00	20:00							0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20:00	21:00							1	1	1	1	1	1
21:00	22:00							1	1	1	1	1	1
22:00	23:00							1	1	1	1	1	1
23:00	00:00							1	1	1	1	1	1

Tabela 9 - Fração de ocupação do piso 02 ao longo do ano (Henriques 2015).

Piso 02		Perfil de utilização habitual			Férias de Natal (20-27/12)		
Horas		Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00	1	1	1	1	1	1
01:00	02:00	1	1	1	1	1	1
02:00	03:00	1	1	1	1	1	1
03:00	04:00	1	1	1	1	1	1
04:00	05:00	1	1	1	1	1	1
05:00	06:00	1	1	1	1	1	1
06:00	07:00	1	1	1	1	1	1
07:00	08:00	1	1	1	1	1	1
08:00	09:00	0.5	1	1	1	1	1
09:00	10:00		1	1	1	1	1
10:00	11:00		0.5	0.5		0.5	0.5
11:00	12:00		0.375	0.5		0.5	0.5
12:00	13:00		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
13:00	14:00		1	1	1	0.5	0.5
14:00	15:00		1	1	0.5	0.375	0.5
15:00	16:00					0.5	0.5
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
19:00	20:00	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20:00	21:00						
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Tabela 10 - Fração iluminação do piso 00 e 01 ao longo do ano (Henriques 2015).

Horas		Piso 00						Piso 01					
		Perfil de utilização habitual			Férias de Natal (20-27/12)			Perfil de utilização habitual			Férias de Natal (20-27/12)		
		Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00												
01:00	02:00												
02:00	03:00												
03:00	04:00												
04:00	05:00												
05:00	06:00												
06:00	07:00												
07:00	08:00												
08:00	09:00	0.05					0.15						
09:00	10:00							0.15	0.15				
10:00	11:00									0.11			
11:00	12:00		0.08								0.11	0.11	
12:00	13:00										0.11	0.11	
13:00	14:00												
14:00	15:00					0.08							
15:00	16:00												
16:00	17:00												
17:00	18:00	0.05											
18:00	19:00		0.03	0.03	0.03		0.03						
19:00	20:00						0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
20:00	21:00						0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
21:00	22:00						0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
22:00	23:00						0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
23:00	00:00						0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
							0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

Tabela 11 - Fração iluminação do piso 02 ao longo do ano (Henriques 2015).

Piso 02		Perfil de utilização habitual			Férias de Natal (20-27/12)		
Horas		Segunda a sexta	Sábado	Domingo	Segunda a sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00	0.08					
08:00	09:00	0.14					0.19
09:00	10:00					0.19	
10:00	11:00		0.19	0.19			
11:00	12:00						
12:00	13:00		0.38	0.38			
13:00	14:00		0.10	0.10			
14:00	15:00						
15:00	16:00						
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00	0.23					0.23
19:00	20:00	0.41	0.23	0.23		0.23	0.41
20:00	21:00		0.41	0.41		0.41	
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Anexo B – Fórmulas para o cálculo das radiações

Para o cálculo da radiação direta normal ($G_{o,n}$) e radiação difusa horizontal (G_d) é necessário calcular um conjunto de variáveis, obtidas através das seguintes fórmulas (John A. Duffie 2013).

- Hora solar
- Tempo solar aparente

$$\text{Hora solar} - \text{Hora civil} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (\text{diferença em minutos})$$

L_{st} : Meridiano de referência para o fuso horário da hora civil (Coimbra=0°);

L_{loc} : Meridiano do local (Coimbra=8,42°);

($L_{st} - L_{loc}$) é positivo se L_{loc} se situa a leste de L_{st}).

- Equação do tempo

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B)$$

, com $B = (n-1) \cdot \frac{360}{365}$

- Declinação

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left(360 \times \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right), \text{ n é o numero do dia do ano (0 a 365).}$$

- Ângulo zenital (θ_z)

$$\text{Cos} \theta_z = \text{cos} \phi \times \text{cos} \delta \times \text{cos} \omega + \text{sen} \phi \times \text{sen} \delta$$

- Radiação solar extraterrestre incidente no plano normal à radiação

$$G_{0,n} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \times \cos \frac{360n}{365} \right), G_{sn} \text{ constante solar (1367w/m}^2)$$

$$G_0 = G_{0,n} \times \cos \theta_z$$

- Modelo anisotrópico HDKR – Caso os dados meteorológicos não incluam a radiação difusa

$$k_t = \frac{G}{G_0}$$

$$\frac{G_d}{G} = \begin{cases} 1 - 0,09K_t, & \text{para } K_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604K_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4, & \text{para } 0,22 < K_t \leq 0,80 \\ 0,165, & \text{para } K_t > 0,80 \end{cases}$$

- Radiação global horizontal

$$G = G_b + G_d$$

- Radiação direta normal

$$\frac{G_{b,n}}{G_b} = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_z}$$

Anexo C – Tabelas com variáveis utilizadas no ficheiro meteorológico

Tabela 12 – Tabela com o valor de várias variáveis necessárias para o cálculo das radiações solares.

n (dia do ano)	δ -declinação	Hora civil	B	E	Atraso (min.)	Hora solar (verão)	w	$\cos\theta_z$	$G_{o,n}$ (w/m ²)	G_o (w/m ²)	kt	G_b (w/m ²)
256	3.02	01:00	251.5	3.89	0:29	0.98	-189.25	-0.72	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	02:00	251.5	3.89	0:29	0.02	-174.25	-0.72	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	03:00	251.5	3.89	0:29	0.06	-159.25	-0.68	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	04:00	251.5	3.89	0:29	0.10	-144.25	-0.59	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	05:00	251.5	3.89	0:29	0.15	-129.25	-0.45	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	06:00	251.5	3.89	0:29	0.19	-114.25	-0.28	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	07:00	251.5	3.89	0:29	0.23	-99.25	-0.09	1384.78		0.0	0.0
256	3.02	08:00	251.5	3.89	0:29	0.27	-84.25	0.11	1384.78	152.9	0.2	0.5
256	3.02	09:00	251.5	3.89	0:29	0.31	-69.25	0.30	1384.78	421.3	0.3	3.1
256	3.02	10:00	251.5	3.89	0:29	0.35	-54.25	0.48	1384.78	664.2	0.9	471.8
256	3.02	11:00	251.5	3.89	0:29	0.40	-39.25	0.62	1384.78	865.0	0.3	20.7
256	3.02	12:00	251.5	3.89	0:29	0.43	-24.25	0.73	1384.78	1010.1	0.2	2.5
256	3.02	13:00	251.5	3.89	0:29	0.47	-9.25	0.79	1384.78	1089.6	0.7	618.2
256	3.02	14:00	251.5	3.89	0:29	0.52	5.75	0.79	1384.78	1098.0	0.1	2.0
256	3.02	15:00	251.5	3.89	0:29	0.56	20.75	0.75	1384.78	1034.8	0.8	680.8
256	3.02	16:00	251.5	3.89	0:29	0.60	35.75	0.65	1384.78	904.3	0.2	3.3
256	3.02	17:00	251.5	3.89	0:29	0.64	50.75	0.52	1384.78	715.4	0.2	2.9
256	3.02	18:00	251.5	3.89	0:29	0.68	65.75	0.35	1384.78	480.9	0.3	5.2
256	3.02	19:00	251.5	3.89	0:29	0.72	80.75	0.16	1384.78	216.9	0.3	1.6
256	3.02	20:00	251.5	3.89	0:29	0.77	95.75	-0.04	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	21:00	251.5	3.89	0:29	0.81	110.75	-0.24	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	22:00	251.5	3.89	0:29	0.85	125.75	-0.41	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	23:00	251.5	3.89	0:29	0.89	140.75	-0.56	1384.78	0.0	0.0	0.0
256	3.02	00:00	251.5	3.89	0:29	0.93	155.75	-0.66	1384.78	0.0	0.0	0.0
257	2.62	01:00	252.5	4.27	0:29	0.97	-189.25	-0.72	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	02:00	252.5	4.27	0:29	0.02	-174.25	-0.73	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	03:00	252.5	4.27	0:29	0.06	-159.25	-0.68	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	04:00	252.5	4.27	0:29	0.10	-144.25	-0.59	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	05:00	252.5	4.27	0:29	0.14	-129.25	-0.45	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	06:00	252.5	4.27	0:29	0.18	-114.25	-0.28	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	07:00	252.5	4.27	0:29	0.22	-99.25	-0.09	1342.23	0.0	0.0	0.0

257	2.62	08:00	252.5	4.27	0:29	0.27	-84.25	0.11	1342.23	142.2	0.2	0.7
257	2.62	09:00	252.5	4.27	0:29	0.31	-69.25	0.30	1342.23	402.4	0.6	109.1
257	2.62	10:00	252.5	4.27	0:29	0.35	-54.25	0.48	1342.23	637.9	0.7	340.3
257	2.62	11:00	252.5	4.27	0:29	0.39	-39.25	0.62	1342.23	832.6	0.9	639.6
257	2.62	12:00	252.5	4.27	0:29	0.43	-24.25	0.73	1342.23	973.3	0.8	666.3
257	2.62	13:00	252.5	4.27	0:29	0.47	-9.25	0.78	1342.23	1050.4	0.2	3.2
257	2.62	14:00	252.5	4.27	0:29	0.52	5.75	0.79	1342.23	1058.5	0.2	2.9
257	2.62	15:00	252.5	4.27	0:29	0.56	20.75	0.74	1342.23	997.3	0.5	123.6
257	2.62	16:00	252.5	4.27	0:29	0.60	35.75	0.65	1342.23	870.7	0.8	561.8
257	2.62	17:00	252.5	4.27	0:29	0.64	50.75	0.51	1342.23	687.5	0.7	344.6
257	2.62	18:00	252.5	4.27	0:29	0.68	65.75	0.34	1342.23	460.2	0.3	10.4
257	2.62	19:00	252.5	4.27	0:29	0.72	80.75	0.15	1342.23	204.2	0.3	1.9
257	2.62	20:00	252.5	4.27	0:29	0.77	95.75	-0.05	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	21:00	252.5	4.27	0:29	0.81	110.75	-0.24	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	22:00	252.5	4.27	0:29	0.85	125.75	-0.42	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	23:00	252.5	4.27	0:29	0.89	140.75	-0.56	1342.23	0.0	0.0	0.0
257	2.62	00:00	252.5	4.27	0:29	0.93	155.75	-0.67	1342.23	0.0	0.0	0.0
258	2.22	01:00	253.5	4.64	0:29	0.97	-189.25	-0.73	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	02:00	253.5	4.64	0:29	0.02	-174.25	-0.73	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	03:00	253.5	4.64	0:29	0.06	-159.25	-0.69	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	04:00	253.5	4.64	0:29	0.10	-144.25	-0.59	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	05:00	253.5	4.64	0:29	0.14	-129.25	-0.46	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	06:00	253.5	4.64	0:29	0.18	-114.25	-0.29	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	07:00	253.5	4.64	0:29	0.22	-99.25	-0.10	1321.89	0.0	0.0	0.0
258	2.22	08:00	253.5	4.64	0:29	0.27	-84.25	0.10	1321.89	134.1	0.4	8.1
258	2.22	09:00	253.5	4.64	0:29	0.31	-69.25	0.30	1321.89	390.4	0.2	1.4
258	2.22	10:00	253.5	4.64	0:29	0.35	-54.25	0.47	1321.89	622.5	0.3	16.6
258	2.22	11:00	253.5	4.64	0:29	0.39	-39.25	0.62	1321.89	814.3	0.5	181.8
258	2.22	12:00	253.5	4.64	0:29	0.43	-24.25	0.72	1321.89	952.9	0.4	34.2
258	2.22	13:00	253.5	4.64	0:29	0.47	-9.25	0.78	1321.89	1028.8	0.2	6.2
258	2.22	14:00	253.5	4.64	0:29	0.52	5.75	0.78	1321.89	1036.8	0.2	4.5
258	2.22	15:00	253.5	4.64	0:29	0.56	20.75	0.74	1321.89	976.5	0.2	3.7
258	2.22	16:00	253.5	4.64	0:29	0.60	35.75	0.64	1321.89	851.8	0.1	1.2
258	2.22	17:00	253.5	4.64	0:29	0.64	50.75	0.51	1321.89	671.3	0.3	19.0
258	2.22	18:00	253.5	4.64	0:29	0.68	65.75	0.34	1321.89	447.4	0.1	0.9
258	2.22	19:00	253.5	4.64	0:29	0.72	80.75	0.15	1321.89	195.2	0.2	0.7
258	2.22	20:00	253.5	4.64	0:29	0.77	95.75	-0.05	1321.89	68.1	0.0	0.0
258	2.22	21:00	253.5	4.64	0:29	0.81	110.75	-0.25	1321.89	324.4	0.0	0.0
258	2.22	22:00	253.5	4.64	0:29	0.85	125.75	-0.42	1321.89	556.4	0.0	0.0
258	2.22	23:00	253.5	4.64	0:29	0.89	140.75	-0.57	1321.89	748.3	0.0	0.0
258	2.22	00:00	253.5	4.64	0:29	0.93	155.75	-0.67	1321.89	886.9	0.0	0.0
259	1.81	01:00	254.5	5.02	0:28	0.97	-189.25	-0.73	1341.99	983.7	0.0	0.0
259	1.81	02:00	254.5	5.02	0:28	0.02	-174.25	-0.74	1341.99	991.9	0.0	0.0
259	1.81	03:00	254.5	5.02	0:28	0.06	-159.25	-0.69	1341.99	930.6	0.0	0.0

259	1.81	04:00	254.5	5.02	0:28	0.10	-144.25	-0.60	1341.99	804.0	0.0	0.0
259	1.81	05:00	254.5	5.02	0:28	0.14	-129.25	-0.46	1341.99	620.8	0.0	0.0
259	1.81	06:00	254.5	5.02	0:28	0.18	-114.25	-0.29	1341.99	393.3	0.0	0.0
259	1.81	07:00	254.5	5.02	0:28	0.22	-99.25	-0.10	1341.99	137.2	0.0	0.0
259	1.81	08:00	254.5	5.02	0:28	0.27	-84.25	0.10	1341.99	130.1	0.2	0.3
259	1.81	09:00	254.5	5.02	0:28	0.31	-69.25	0.29	1341.99	390.4	0.7	228.8
259	1.81	10:00	254.5	5.02	0:28	0.35	-54.25	0.47	1341.99	626.0	0.9	475.1
259	1.81	11:00	254.5	5.02	0:28	0.39	-39.25	0.61	1341.99	820.8	0.8	505.0
259	1.81	12:00	254.5	5.02	0:28	0.43	-24.25	0.72	1341.99	961.5	0.8	648.8
259	1.81	13:00	254.5	5.02	0:28	0.47	-9.25	0.77	1341.99	1038.6	0.8	642.2
259	1.81	14:00	254.5	5.02	0:28	0.52	5.75	0.78	1341.99	1046.8	0.8	645.6
259	1.81	15:00	254.5	5.02	0:28	0.56	20.75	0.73	1341.99	985.5	0.7	587.1
259	1.81	16:00	254.5	5.02	0:28	0.60	35.75	0.64	1341.99	858.9	0.7	437.4
259	1.81	17:00	254.5	5.02	0:28	0.64	50.75	0.50	1341.99	675.6	0.7	355.9
259	1.81	18:00	254.5	5.02	0:28	0.68	65.75	0.33	1341.99	448.2	0.5	61.9
259	1.81	19:00	254.5	5.02	0:28	0.72	80.75	0.14	1341.99	192.1	0.6	51.4
259	1.81	20:00	254.5	5.02	0:28	0.77	95.75	-0.06	1341.99	75.2	0.0	0.0
259	1.81	21:00	254.5	5.02	0:28	0.81	110.75	-0.25	1341.99	335.5	0.0	0.0
259	1.81	22:00	254.5	5.02	0:28	0.85	125.75	-0.43	1341.99	571.1	0.0	0.0
259	1.81	23:00	254.5	5.02	0:28	0.89	140.75	-0.57	1341.99	765.9	0.0	0.0
259	1.81	00:00	254.5	5.02	0:28	0.93	155.75	-0.68	1341.99	906.7	0.0	0.0
260	1.41	01:00	255.5	5.40	0:28	0.97	-189.25	-0.74	1384.51	1021.4	0.0	0.0
260	1.41	02:00	255.5	5.40	0:28	0.02	-174.25	-0.74	1384.51	1029.8	0.0	0.0
260	1.41	03:00	255.5	5.40	0:28	0.06	-159.25	-0.70	1384.51	966.6	0.0	0.0
260	1.41	04:00	255.5	5.40	0:28	0.10	-144.25	-0.60	1384.51	835.9	0.0	0.0
260	1.41	05:00	255.5	5.40	0:28	0.14	-129.25	-0.47	1384.51	646.8	0.0	0.0
260	1.41	06:00	255.5	5.40	0:28	0.18	-114.25	-0.30	1384.51	412.2	0.0	0.0
260	1.41	07:00	255.5	5.40	0:28	0.22	-99.25	-0.11	1384.51	147.9	0.0	0.0
260	1.41	08:00	255.5	5.40	0:28	0.27	-84.25	0.09	1384.51	127.9	0.1	0.3
260	1.41	09:00	255.5	5.40	0:28	0.31	-69.25	0.29	1384.51	396.6	0.9	287.2
260	1.41	10:00	255.5	5.40	0:28	0.35	-54.25	0.46	1384.51	639.7	0.7	365.6
260	1.41	11:00	255.5	5.40	0:28	0.39	-39.25	0.61	1384.51	840.7	0.8	540.5
260	1.41	12:00	255.5	5.40	0:28	0.43	-24.25	0.71	1384.51	985.9	0.7	577.3
260	1.41	13:00	255.5	5.40	0:28	0.47	-9.25	0.77	1384.51	1065.4	0.8	658.5
260	1.41	14:00	255.5	5.40	0:28	0.52	5.75	0.78	1384.51	1073.9	0.7	647.1
260	1.41	15:00	255.5	5.40	0:28	0.56	20.75	0.73	1384.51	1010.6	0.7	539.6
260	1.41	16:00	255.5	5.40	0:28	0.60	35.75	0.64	1384.51	880.0	0.6	369.5
260	1.41	17:00	255.5	5.40	0:28	0.64	50.75	0.50	1384.51	690.9	0.6	174.1
260	1.41	18:00	255.5	5.40	0:28	0.68	65.75	0.33	1384.51	456.2	0.4	20.8
260	1.41	19:00	255.5	5.40	0:28	0.72	80.75	0.14	1384.51	192.0	0.2	0.4
260	1.41	20:00	255.5	5.40	0:28	0.77	95.75	-0.06	1384.51	83.9	0.0	0.0
260	1.41	21:00	255.5	5.40	0:28	0.81	110.75	-0.25	1384.51	352.5	0.0	0.0
260	1.41	22:00	255.5	5.40	0:28	0.85	125.75	-0.43	1384.51	595.6	0.0	0.0
260	1.41	23:00	255.5	5.40	0:28	0.89	140.75	-0.58	1384.51	796.6	0.0	0.0

260	1.41	00:00	255.5	5.40	0:28	0.93	155.75	-0.68	1384.51	941.9	0.0	0.0
261	1.01	01:00	256.4	5.77	0:27	0.97	-189.25	-0.74	1411.33	1047.7	0.0	0.0
261	1.01	02:00	256.4	5.77	0:27	0.02	-174.25	-0.75	1411.33	1056.3	0.0	0.0
261	1.01	03:00	256.4	5.77	0:27	0.06	-159.25	-0.70	1411.33	991.9	0.0	0.0
261	1.01	04:00	256.4	5.77	0:27	0.10	-144.25	-0.61	1411.33	858.7	0.0	0.0
261	1.01	05:00	256.4	5.77	0:27	0.14	-129.25	-0.47	1411.33	665.9	0.0	0.0
261	1.01	06:00	256.4	5.77	0:27	0.18	-114.25	-0.30	1411.33	426.6	0.0	0.0
261	1.01	07:00	256.4	5.77	0:27	0.22	-99.25	-0.11	1411.33	157.2	0.0	0.0
261	1.01	08:00	256.4	5.77	0:27	0.27	-84.25	0.09	1411.33	124.0	0.2	0.3
261	1.01	09:00	256.4	5.77	0:27	0.31	-69.25	0.28	1411.33	397.9	0.8	271.4
261	1.01	10:00	256.4	5.77	0:27	0.35	-54.25	0.46	1411.33	645.7	0.7	301.8
261	1.01	11:00	256.4	5.77	0:27	0.39	-39.25	0.60	1411.33	850.7	0.8	526.9
261	1.01	12:00	256.4	5.77	0:27	0.43	-24.25	0.71	1411.33	998.7	0.7	562.4
261	1.01	13:00	256.4	5.77	0:27	0.47	-9.25	0.77	1411.33	1079.8	0.7	653.0
261	1.01	14:00	256.4	5.77	0:27	0.52	5.75	0.77	1411.33	1088.4	0.7	656.1
261	1.01	15:00	256.4	5.77	0:27	0.56	20.75	0.73	1411.33	1023.9	0.7	606.3
261	1.01	16:00	256.4	5.77	0:27	0.60	35.75	0.63	1411.33	890.8	0.7	538.3
261	1.01	17:00	256.4	5.77	0:27	0.64	50.75	0.49	1411.33	698.0	0.6	299.1
261	1.01	18:00	256.4	5.77	0:27	0.68	65.75	0.33	1411.33	458.7	0.7	235.2
261	1.01	19:00	256.4	5.77	0:27	0.72	80.75	0.13	1411.33	189.3	0.1	0.3
261	1.01	20:00	256.4	5.77	0:27	0.77	95.75	-0.07	1411.33	91.9	0.0	0.0
261	1.01	21:00	256.4	5.77	0:27	0.81	110.75	-0.26	1411.33	365.8	0.0	0.0
261	1.01	22:00	256.4	5.77	0:27	0.85	125.75	-0.43	1411.33	613.7	0.0	0.0
261	1.01	23:00	256.4	5.77	0:27	0.89	140.75	-0.58	1411.33	818.6	0.0	0.0
261	1.01	00:00	256.4	5.77	0:27	0.93	155.75	-0.68	1411.33	966.7	0.0	0.0
262	0.61	01:00	257.4	6.15	0:27	0.97	-189.25	-0.75	1398.42	1044.6	0.0	0.0
262	0.61	02:00	257.4	6.15	0:27	0.02	-174.25	-0.75	1398.42	1053.1	0.0	0.0
262	0.61	03:00	257.4	6.15	0:27	0.06	-159.25	-0.71	1398.42	989.2	0.0	0.0
262	0.61	04:00	257.4	6.15	0:27	0.10	-144.25	-0.61	1398.42	857.3	0.0	0.0
262	0.61	05:00	257.4	6.15	0:27	0.14	-129.25	-0.48	1398.42	666.2	0.0	0.0
262	0.61	06:00	257.4	6.15	0:27	0.18	-114.25	-0.31	1398.42	429.1	0.0	0.0
262	0.61	07:00	257.4	6.15	0:27	0.22	-99.25	-0.12	1398.42	162.1	0.0	0.0
262	0.61	08:00	257.4	6.15	0:27	0.27	-84.25	0.08	1398.42	116.5	0.1	0.2
262	0.61	09:00	257.4	6.15	0:27	0.31	-69.25	0.28	1398.42	387.9	0.8	269.7
262	0.61	10:00	257.4	6.15	0:27	0.35	-54.25	0.45	1398.42	633.5	0.7	348.9
262	0.61	11:00	257.4	6.15	0:27	0.39	-39.25	0.60	1398.42	836.6	0.7	434.2
262	0.61	12:00	257.4	6.15	0:27	0.43	-24.25	0.70	1398.42	983.3	0.8	618.4
262	0.61	13:00	257.4	6.15	0:27	0.47	-9.25	0.76	1398.42	1063.7	0.7	592.5
262	0.61	14:00	257.4	6.15	0:27	0.52	5.75	0.77	1398.42	1072.2	0.7	646.4
262	0.61	15:00	257.4	6.15	0:27	0.56	20.75	0.72	1398.42	1008.3	0.8	626.0
262	0.61	16:00	257.4	6.15	0:27	0.60	35.75	0.63	1398.42	876.3	0.8	559.3
262	0.61	17:00	257.4	6.15	0:27	0.64	50.75	0.49	1398.42	685.3	0.7	357.7
262	0.61	18:00	257.4	6.15	0:27	0.68	65.75	0.32	1398.42	448.2	0.4	41.2
262	0.61	19:00	257.4	6.15	0:27	0.72	80.75	0.13	1398.42	181.2	0.2	0.7

262	0.61	20:00	257.4	6.15	0:27	0.77	95.75	-0.07	1398.42	97.5	0.0	0.0
262	0.61	21:00	257.4	6.15	0:27	0.81	110.75	-0.26	1398.42	368.9	0.0	0.0
262	0.61	22:00	257.4	6.15	0:27	0.85	125.75	-0.44	1398.42	614.5	0.0	0.0
262	0.61	23:00	257.4	6.15	0:27	0.89	140.75	-0.58	1398.42	817.5	0.0	0.0
262	0.61	00:00	257.4	6.15	0:27	0.93	155.75	-0.69	1398.42	964.3	0.0	0.0
263	0.20	01:00	258.4	6.52	0:27	0.97	-189.25	-0.75	1357.34	1020.2	0.0	0.0
263	0.20	02:00	258.4	6.52	0:27	0.02	-174.25	-0.76	1357.34	1028.4	0.0	0.0
263	0.20	03:00	258.4	6.52	0:27	0.06	-159.25	-0.71	1357.34	966.4	0.0	0.0
263	0.20	04:00	258.4	6.52	0:27	0.10	-144.25	-0.62	1357.34	838.3	0.0	0.0
263	0.20	05:00	258.4	6.52	0:27	0.14	-129.25	-0.48	1357.34	652.9	0.0	0.0
263	0.20	06:00	258.4	6.52	0:27	0.18	-114.25	-0.31	1357.34	422.7	0.0	0.0
263	0.20	07:00	258.4	6.52	0:27	0.22	-99.25	-0.12	1357.34	163.6	0.0	0.0
263	0.20	08:00	258.4	6.52	0:27	0.27	-84.25	0.08	1357.34	107.0	0.1	0.1
263	0.20	09:00	258.4	6.52	0:27	0.31	-69.25	0.27	1357.34	370.4	0.2	2.3
263	0.20	10:00	258.4	6.52	0:27	0.35	-54.25	0.45	1357.34	608.8	0.7	361.6
263	0.20	11:00	258.4	6.52	0:27	0.39	-39.25	0.59	1357.34	805.9	0.7	422.6
263	0.20	12:00	258.4	6.52	0:27	0.43	-24.25	0.70	1357.34	948.3	0.8	595.9
263	0.20	13:00	258.4	6.52	0:27	0.47	-9.25	0.76	1357.34	1026.3	0.7	626.4
263	0.20	14:00	258.4	6.52	0:27	0.52	5.75	0.76	1357.34	1034.6	0.7	625.2
263	0.20	15:00	258.4	6.52	0:27	0.56	20.75	0.72	1357.34	972.6	0.7	545.6
263	0.20	16:00	258.4	6.52	0:27	0.60	35.75	0.62	1357.34	844.5	0.7	439.3
263	0.20	17:00	258.4	6.52	0:27	0.64	50.75	0.49	1357.34	659.0	0.6	228.5
263	0.20	18:00	258.4	6.52	0:27	0.68	65.75	0.32	1357.34	428.9	0.7	211.5
263	0.20	19:00	258.4	6.52	0:27	0.72	80.75	0.13	1357.34	169.7	0.3	1.8
263	0.20	20:00	258.4	6.52	0:27	0.77	95.75	-0.07	1357.34	100.8	0.0	0.0
263	0.20	21:00	258.4	6.52	0:27	0.81	110.75	-0.27	1357.34	364.2	0.0	0.0
263	0.20	22:00	258.4	6.52	0:27	0.85	125.75	-0.44	1357.34	602.6	0.0	0.0
263	0.20	23:00	258.4	6.52	0:27	0.89	140.75	-0.59	1357.34	799.7	0.0	0.0
263	0.20	00:00	258.4	6.52	0:27	0.93	155.75	-0.69	1357.34	942.2	0.0	0.0

Na Tabela 12, os nomes com preenchimento a verde significa que foram valores fornecidos pelo Arquiteto Nelson Brito, que possui uma estação meteorológica na casa em estudo. Os nomes que estão em amarelo são valores retirados da estação meteorológica do ADAI, e os nomes em azul são valores calculados com as fórmulas descritas no início do Anexo B.

Tabela 13 – Tabela com as variáveis usadas no ficheiro meteorológico.

year	month	day	hour	drybulb (c°)	dewpoint (c°)	relhum (%)	atmos_pressure(Pa)	glo_hor_rad (w/m2)	dir_nor_rad (w/m2)	dif_hor_rad (w/m2)
------	-------	-----	------	--------------	---------------	------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

2016	9	13	1	19.70	17.1	85	1011100	0	0	0
2016	9	13	2	20.30	17.5	84	101070	0	0	0
2016	9	13	3	18.20	16.2	88	101140	0	0	0
2016	9	13	4	17.70	16.2	91	101110	0	0	0
2016	9	13	5	17.2	16.1	93	100970	0	0	0
2016	9	13	6	16.9	15.9	94	100970	0	0	0
2016	9	13	7	17.1	16.1	94	101040	0	0	0
2016	9	13	8	17.2	16.1	93	101170	28	4	28
2016	9	13	9	17.7	16.5	93	101240	108	10	105
2016	9	13	10	19.2	16.4	84	101380	565	740	93
2016	9	13	11	19.7	15.3	76	101440	283	33	262
2016	9	13	12	21.6	14.2	63	101480	168	3	165
2016	9	13	13	20.2	15.4	74	101550	786	786	168
2016	9	13	14	21.8	12.9	57	101580	158	3	156
2016	9	13	15	21.6	13	58	101580	815	911	134
2016	9	13	16	21.3	13.2	60	101650	181	5	178
2016	9	13	17	20.1	15.1	73	101650	153	6	150
2016	9	13	18	20.1	14.2	69	101680	134	15	129
2016	9	13	19	19.5	13.7	69	101720	56	11	54
2016	9	13	20	19	13.6	71	101750	8	0	8
2016	9	13	21	16.9	13.6	81	101820	0	0	0
2016	9	13	22	16.1	13.3	84	101820	0	0	0
2016	9	13	23	15.3	13.2	87	101820	0	0	0
2016	9	13	24	15.3	13.5	89	101850	0	0	0
2016	9	14	1	14.8	13.4	91	101850	0	0	0
2016	9	14	2	14.3	13.2	93	101780	0	0	0
2016	9	14	3	14.3	13.2	93	101780	0	0	0
2016	9	14	4	13.9	13	94	101780	0	0	0
2016	9	14	5	13.4	12.3	93	101780	0	0	0
2016	9	14	6	13	11.9	93	101780	0	0	0
2016	9	14	7	12.6	11.4	93	101820	0	0	0
2016	9	14	8	12.5	11.6	94	101880	32	6	31
2016	9	14	9	13.6	12.9	96	101850	227	364	118
2016	9	14	10	16.8	14.4	86	101920	448	716	108
2016	9	14	11	19.4	13.6	69	101990	766	830	126
2016	9	14	12	19.7	12.2	62	101950	798	919	132
2016	9	14	13	20.7	12.4	59	101920	194	4	191
2016	9	14	14	21.2	10.7	51	101880	186	4	183
2016	9	14	15	22	10.5	48	101850	462	166	338
2016	9	14	16	22.1	10.9	49	101820	675	866	113
2016	9	14	17	21.6	11.9	54	101780	471	673	126
2016	9	14	18	21.1	10.8	52	101820	149	30	139
2016	9	14	19	19.3	11.6	61	101880	55	12	53
2016	9	14	20	18.6	11.6	64	101880	0	0	0

2016	9	14	21	17.2	12.1	72	101880	0	0	0
2016	9	14	22	16.2	12.2	77	101920	0	0	0
2016	9	14	23	15.9	12.6	81	101880	0	0	0
2016	9	14	24	15.8	12.7	82	101880	0	0	0
2016	9	15	1	15.6	12.7	83	101850	0	0	0
2016	9	15	2	14.8	12.6	87	101820	0	0	0
2016	9	15	3	14.9	12.7	87	101820	0	0	0
2016	9	15	4	14.6	12.6	88	101780	0	0	0
2016	9	15	5	14.6	12.4	87	101750	0	0	0
2016	9	15	6	14.7	12.4	86	101750	0	0	0
2016	9	15	7	14.7	12.6	87	101750	0	0	0
2016	9	15	8	14.9	13.3	90	101850	53	80	45
2016	9	15	9	15.2	13.4	89	101880	77	5	76
2016	9	15	10	16.4	14.3	87	101850	208	35	191
2016	9	15	11	19.3	14.9	76	101880	436	295	254
2016	9	15	12	20.3	14.8	71	101920	338	47	304
2016	9	15	13	20.8	14.9	69	101880	251	8	245
2016	9	15	14	20.4	15.2	72	101880	228	6	223
2016	9	15	15	20.3	15.6	74	101820	201	5	197
2016	9	15	16	20.6	15.8	74	101780	107	2	106
2016	9	15	17	21	16.4	75	101820	227	37	208
2016	9	15	18	21	15.6	71	101820	66	3	65
2016	9	15	19	20.7	15.3	71	101850	40	5	39
2016	9	15	20	19.4	16.1	81	101950	0	0	0
2016	9	15	21	19.2	16.2	83	101990	0	0	0
2016	9	15	22	18.7	16.1	85	102020	0	0	0
2016	9	15	23	17.9	16.2	90	102120	0	0	0
2016	9	15	24	17.6	15.9	90	102120	0	0	0
2016	9	16	1	17.1	15.4	90	102160	0	0	0
2016	9	16	2	16.3	14.8	91	102160	0	0	0
2016	9	16	3	16.2	14.7	91	102160	0	0	0
2016	9	16	4	15.9	14.3	90	102160	0	0	0
2016	9	16	5	15.5	14.1	91	102190	0	0	0
2016	9	16	6	15.5	14.1	91	102220	0	0	0
2016	9	16	7	15.6	13.8	89	102260	0	0	0
2016	9	16	8	15.3	13.7	90	102320	20	3	20
2016	9	16	9	15.8	13.4	86	102390	286	786	57
2016	9	16	10	17.9	14.2	79	102430	569	820	94
2016	9	16	11	19.4	14.6	74	102390	617	826	112
2016	9	16	12	22.2	14.8	63	102360	777	750	128
2016	9	16	13	22.8	14.7	60	102360	783	830	141
2016	9	16	14	23.7	14.7	57	102290	788	828	142
2016	9	16	15	25.7	14.4	50	102190	728	800	141
2016	9	16	16	26.7	15.4	50	102120	592	683	155

2016	9	16	17	25.4	16	56	102120	472	707	116
2016	9	16	18	23.5	15.3	60	102190	213	185	151
2016	9	16	19	22.5	15.6	65	102220	108	359	57
2016	9	16	20	20.4	15.4	73	102260	0	0	0
2016	9	16	21	19.7	15.3	76	102290	0	0	0
2016	9	16	22	17.9	14.8	82	102290	0	0	0
2016	9	16	23	17	14.3	84	102320	0	0	0
2016	9	16	24	15.8	14	89	102290	0	0	0
2016	9	17	1	15.4	13.8	90	102260	0	0	0
2016	9	17	2	14.7	13.3	91	102290	0	0	0
2016	9	17	3	14.5	13.1	91	102260	0	0	0
2016	9	17	4	13.7	12.4	92	102220	0	0	0
2016	9	17	5	13.7	12.6	93	102190	0	0	0
2016	9	17	6	13.4	12.3	93	102160	0	0	0
2016	9	17	7	13.2	12.1	93	102190	0	0	0
2016	9	17	8	13.3	12.4	94	102160	19	3	19
2016	9	17	9	19.9	13.6	67	102190	344	878	57
2016	9	17	10	20.9	13.1	61	102190	463	791	97
2016	9	17	11	23	14.3	58	102160	650	890	109
2016	9	17	12	24.4	14.8	55	10210	722	811	145
2016	9	17	13	27.6	14.6	45	10200	803	856	145
2016	9	17	14	28.7	15.2	44	102050	798	834	151
2016	9	17	15	30.2	15.1	40	101990	710	739	170
2016	9	17	16	28.7	16.9	49	101920	566	581	197
2016	9	17	17	27.9	15.5	47	101880	382	349	208
2016	9	17	18	26.2	14.6	49	101880	170	63	149
2016	9	17	19	24.6	14.7	54	101920	29	3	29
2016	9	17	20	22.7	14	58	101920	0	0	0
2016	9	17	21	20.2	13.7	66	101950	0	0	0
2016	9	17	22	18.9	13.8	72	101950	0	0	0
2016	9	17	23	17.1	13.8	81	101950	0	0	0
2016	9	17	24	16.4	13.7	84	101950	0	0	0
2016	9	18	1	15.3	13.2	87	101950	0	0	0
2016	9	18	2	14.9	12.9	88	101950	0	0	0
2016	9	18	3	14.1	12.3	89	101950	0	0	0
2016	9	18	4	13.6	12	90	101920	0	0	0
2016	9	18	5	13.9	12.6	92	101880	0	0	0
2016	9	18	6	14.9	12	83	101920	0	0	0
2016	9	18	7	17.3	10.6	65	101920	6	0	6
2016	9	18	8	17.8	10.6	63	101950	19	3	19
2016	9	18	9	19.6	10.8	57	102020	325	801	54
2016	9	18	10	20.6	10.9	54	102050	431	660	129
2016	9	18	11	22.8	11.8	50	102050	642	874	115
2016	9	18	12	24.1	12.4	48	102020	718	795	156

2016	9	18	13	27.3	12.5	40	101950	804	853	151
2016	9	18	14	28.2	12.9	39	101920	809	851	153
2016	9	18	15	29.6	12.1	34	101850	754	836	148
2016	9	18	16	30.1	11.6	32	101820	663	853	125
2016	9	18	17	28.2	13.7	41	101850	452	605	153
2016	9	18	18	27.5	13.8	43	101850	317	724	82
2016	9	18	19	24.3	12.6	48	101880	24	2	24
2016	9	18	20	22.5	12.4	53	101920	0	0	0
2016	9	18	21	20.1	12.6	62	101990	0	0	0
2016	9	18	22	18.8	12.1	65	101990	0	0	0
2016	9	18	23	17.2	12.3	73	102020	0	0	0
2016	9	18	24	15.4	12.3	82	101990	0	0	0
2016	9	19	1	14.1	11.6	85	101990	0	0	0
2016	9	19	2	13.6	11.4	87	101990	0	0	0
2016	9	19	3	13.1	11	87	101950	0	0	0
2016	9	19	4	12.7	11.1	90	101950	0	0	0
2016	9	19	5	12.4	10.8	90	101920	0	0	0
2016	9	19	6	12.3	10.7	90	101950	0	0	0
2016	9	19	7	11.7	10.1	90	101950	0	0	0
2016	9	19	8	11.2	9.6	90	101950	16	2	16
2016	9	19	9	13.9	12	88	101990	323	809	53
2016	9	19	10	17.2	12.9	76	102020	451	770	102
2016	9	19	11	20.5	12.4	60	102020	581	726	147
2016	9	19	12	24.9	12.1	45	101950	749	879	131
2016	9	19	13	26.8	11.7	39	101880	761	779	168
2016	9	19	14	28.4	10.6	33	101780	797	843	151
2016	9	19	15	29.6	9.2	28	101720	762	868	136
2016	9	19	16	30.3	11.8	32	101680	674	892	115
2016	9	19	17	28.8	13.8	40	101650	477	730	119
2016	9	19	18	26.9	13.2	43	101650	194	129	153
2016	9	19	19	25.3	12.9	46	101650	38	6	37
2016	9	19	20	23.6	12.5	50	101680	0	0	0
2016	9	19	21	19	13.1	65	101720	0	0	0
2016	9	19	22	16.6	12.6	76	101720	0	0	0
2016	9	19	23	15.8	12.3	80	101680	0	0	0
2016	9	19	24	14.6	11.9	84	101680	0	0	0
2016	9	20	1	13.9	12.7	92	101650	0	0	0
2016	9	20	2	14	12.7	92	101610	0	0	0
2016	9	20	3	13.8	12.7	93	101610	0	0	0
2016	9	20	4	135	12.6	94	101550	0	0	0
2016	9	20	5	13.3	12.3	94	101580	0	0	0
2016	9	20	6	12.8	11.8	94	101550	0	0	0
2016	9	20	7	12.4	11.5	94	101580	0	0	0
2016	9	20	8	12.4	11.6	95	101610	8	1	8

2016	9	20	9	12.7	11.9	95	101610	91	8	89
2016	9	20	10	14.4	13.4	94	101650	449	806	87
2016	9	20	11	17.3	13.6	79	101650	562	712	139
2016	9	20	12	21.9	13.2	58	101580	722	853	126
2016	9	20	13	23.5	13.3	53	101550	768	828	142
2016	9	20	14	25.1	15.1	54	101510	770	820	145
2016	9	20	15	27.1	16.1	51	101440	698	761	152
2016	9	20	16	27	17.4	56	101410	587	706	148
2016	9	20	17	25.7	16.5	57	101440	399	471	171
2016	9	20	18	25.1	16	57	101440	292	669	80
2016	9	20	19	23.1	14.9	60	101480	47	14	45
2016	9	20	20	20.2	14.3	69	101550	0	0	0
2016	9	20	21	18.2	13.9	76	101650	0	0	0
2016	9	20	22	17.3	13.8	80	101680	0	0	0
2016	9	20	23	16	13.3	84	101680	0	0	0
2016	9	20	24	15.2	12.9	86	101680	0	0	0