

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**Estudo do Funcionamento de uma Unidade de Tratamento de Ar
assistida por Energia Solar com Sistema de Arrefecimento
Exsicante-Evaporativo**

Mário Filipe Lopes de Atalayão Valença

Dissertação
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2014

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

**Estudo do Funcionamento de uma Unidade de Tratamento de Ar
assistida por Energia Solar com Sistema de Arrefecimento
Exsicante-Evaporativo**

Mário Filipe Lopes de Atalayão Valença

Dissertação
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Orientadores:

Prof. João Carlos Rodrigues, LNEG

Prof. João Farinha Mendes, FCUL

2014

Agradecimentos

Agradeço a possibilidade da realização desta dissertação ao Professor Eng. João Farinha Mendes, meu orientador neste trabalho e agradecer também pela sua disponibilidade e apoio.

Quero agradecer ainda aos engenheiros Rui Rodrigues e João Paulo Costa por me terem recebido no gabinete deles com um especial agradecimento ao engenheiro Rui Rodrigues pela sua ajuda e colaboração que foram muito úteis para o desenvolvimento deste trabalho.

Os meus agradecimentos ao Professor João Carlos Rodrigues pelo seu apoio, orientação, paciência, disponibilidade e por todo o material providenciado sem o qual seria difícil elaborar este trabalho.

Quero também agradecer à minha família, e muito em especial ao meu pai, Mário Lopes e à minha mãe, Angelina Atalayão pelo seu apoio, paciência e disponibilidade.

Resumo

Este trabalho é baseado no estudo detalhado, que efetuei, dos primeiros dez anos de funcionamento da unidade de tratamento de ar (UTA), experimental assistida por energia solar, com sistema de arrefecimento exsicante- evaporativo (DEC), instalada no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), e também na monitorização da mesma, durante o período de trabalho, com a ajuda do *software* “Agilent VEE Pro” que permite a visualização em tempo real da evolução do estado do ar na UTA.

Esta dissertação vem no seguimento de diversos artigos científicos, bem como de outras dissertações que abordam o tema, e vem de encontro aos estudos que têm sido feitos em instalações que utilizam tecnologias com arrefecimento solar, espalhadas pelo mundo. No entanto é o primeiro trabalho que faz uma análise do funcionamento desta UTA desde o seu início, o que é importante dado que, apesar do carácter experimental do sistema, este está a ser utilizado num contexto real, climatizando salas onde as pessoas estão a trabalhar.

Com os dados obtidos ao longo dos anos, recolhidos com o auxílio da folha de cálculo do LNEG desenvolvida especificamente para este sistema, foi possível fazer uma análise do desempenho do sistema ao longo dos anos ao nível do conforto obtido nas salas climatizadas pela UTA. Verifiquei, efetuando o cálculo de médias mensais, se o sistema atingia os níveis pedidos em termos de temperatura e humidade. Sendo que também pude contabilizar o número de dias em que, nos anos estudados, os valores estão dentro dos intervalos pretendidos.

Com estes dados pude também proceder a uma análise, ao nível energético, quer da parte do sistema solar, quer da parte do consumo elétrico, verificando, assim, como se distribui a energia fornecida pelo sistema solar e os consumos elétricos associados ao funcionamento da UTA ao longo do ano. Efetuei, também, comparações entre os diferentes tipos de energia utilizados verificando assim os benefícios energéticos e ambientais deste sistema.

Esta análise permitiu, assim, tirar conclusões e propor alterações para melhorar o desempenho do sistema.

Palavras-chave: Unidade de Tratamento de Ar, Arrefecimento Exsicante- evaporativo, Energia solar, Conforto Térmico, Análise Energética

Abstract

This work is based on the detailed study that I performed of the first ten years of operation of the experimental air handling unit (AHU), assisted by solar energy, with desiccant-evaporative cooling system (DEC), installed in the National Laboratory of Energy and Geology (LNEG), and also in monitoring the AHU during the period of work, with the help of "Agilent VEE Pro" software which allows real-time visualization of the evolution of the air status in the AHU.

This work follows on from several scientific articles and other essays addressing this subject, and comes in encounter of the studies that have been done in plants using solar cooling technologies, worldwide. However it is the first study that analyzes the functioning of this AHU since its beginning, which is important because, despite the experimental nature of the system, it is being used in a real context, air-conditioning rooms where people are working .

With the data obtained over the years, collected with the help of LNEG spreadsheet developed specifically for this system, it was possible to analyze the system performance over the years in terms of the comfort obtained in the rooms climatized by the AHU. Making the calculation of monthly averages, I verified if the system reached the requested levels in terms of temperature and humidity. Being that I could also count the number of days in the studied years, in wich the values are within the desired ranges.

With these data I could also carry out an energy analysis of the solar system and also of the power consumption, checking as well how the power supplied by the solar system and the electrical consumption associated with the operation of the UTA is distributed throughout the year. I have conducted also comparisons between the different types of energy used, thus verifying the energy and environmental benefits of this system.

This analysis made possible to draw conclusions and propose changes to improve system performance.

Keywords: Air Handling Unit, Desiccant-evaporative cooling, Solar Energy, Thermal Comfort, Energy Analysis

Índice

1. Objetivo	1
1.1. Descrição do trabalho.....	1
2. Introdução	2
2.1. Energia.....	4
2.1.1. Energia não renovável	4
2.1.2. Energia Renovável	5
2.1.2.1. Energia Solar	6
2.2. Tecnologia utilizada no Solar Térmico	9
2.2.1. Coletores Solares Térmicos	9
2.2.1.1. Coletor Plano	10
2.2.1.2. Coletor Concentrador	11
2.2.1.3. Coletor Concentrador Parabólico Composto (CPC)	11
2.2.1.4. Coletor de Tubos de Vácuo	12
2.3. Arrefecimento	13
2.3.1. Arrefecimento Evaporativo.....	14
2.3.2. Arrefecimento Solar.....	15
2.3.3. Tecnologias de Arrefecimento	15
2.3.3.1. Chillers de compressão ou elétrico	16
2.3.3.2. Chillers de absorção	16
2.3.3.3. Chiller de Adsorção.....	17
2.3.3.4. Sistemas de Arrefecimento Exsicante Evaporativo.....	18
2.4. Conforto Térmico	20
3. Trabalho Relacionado	22
4. Caso de Estudo.....	27
4.1. Descrição dos componentes do sistema.....	31
4.2. Descrição do Sistema de Monitorização e Controlo	38
4.2.1. Condições Importantes.....	42
4.2.2. Mudança de Modos.....	44
4.3. Análise do desempenho da UTA.....	45
4.3.1. Análise da Temperatura e Humidade	46
4.3.2. Análise Energética	56
4.3.2.1. Total das diferentes energias	69

4.3.3. Problemas detetados	74
5. Conclusão	77
6. Perspetivas Futuras.....	79
7. Bibliografia.....	80
Anexos	I
Anexo I.....	I
Anexo II	IV
Anexo III.....	VI
Anexo IV	VII

Índice de Figuras

Figura 1: Objetivos “20-20-20”	3
Figura 2: Distribuição da Radiação Solar.....	7
Figura 3: Espectro de Radiação Eletromagnética.....	7
Figura 4: Radiação solar incidente no plano horizontal em Portugal continental e número de horas de sol anuais	8
Figura 5: Radiação solar incidente no plano horizontal na Europa.....	8
Figura 6: Seleção do equipamento de acordo com a temperatura pretendida.....	10
Figura 7: Constituição de um coletor plano.....	11
Figura 8: Processo de funcionamento de um coletor plano.....	11
Figura 9: Constituição de um coletor CPC	12
Figura 10: Tubo de vácuo	12
Figura 11: Esquema de circulação em termossifão e com circulação forçada	13
Figura 12: Procura e disponibilidade	15
Figura 13: <i>Chiller</i> de absorção	17
Figura 14: <i>Chiller</i> de adsorção	18
Figura 15: Esquema de um sistema exsicante	19
Figura 16: Distribuição dos sistemas existentes na Europa em 2010	22
Figura 17: UTA e painéis solares instalados na universidade em Palermo	23
Figura 18: Painéis solares instalados na universidade Americana da Arménia	24
Figura 19: UTA no Centro de Informação Solar em Friburg.....	24
Figura 20: Edifício G: Instalações do Departamento de Energias Renováveis	27
Figura 21: Planta do Edifício G. A zona colorida a amarelo representa os 11 gabinetes a climatizar e as linhas azuis a rede de condutas de ar	28
Figura 22: UTA/DEC instalada no DER do LNEG, na sua configuração inicial.....	28
Figura 23: UTA instalada no LNEG	29
Figura 24: Campo de coletores	30
Figura 25: Configuração do campo de coletores, circuitos de água fria (azul), e quente (vermelho)	30
Figura 26: Circuito de água fria	31
Figura 27: Diagrama geral do Sistema UTA/DEC com os parâmetros monitorizados pelo sistema de controlo.....	32
Figura 28: Filtros de Ar	32
Figura 29: Roda Exsicante	33
Figura 30: Roda permutadora de calor.....	33
Figura 31: Sistema de controlo da bomba de calor.....	34
Figura 32: Ventilador.....	35
Figura 33: Depósito de Armazenamento de Energia	36
Figura 34: Permutador no interior da sala técnica junto à caldeira	36
Figura 35: Vaso de Expansão.....	37
Figura 36: Caldeira	38
Figura 37: Purgador de Ar	38
Figura 38: Piranómetro e higrómetro	39

Figura 39: Sonda de temperatura.....	39
Figura 40: Diagrama em árvore do arquivo de controlo C++	40
Figura 41: Configuração da UTA no LNEG com os parâmetros monitorizados pelo sistema de controlo	42
Figura 42: Fluxograma com as condições de mudança de modos	45
Figura 43: Danos detetados nos coletores	74

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Evolução do consumo de energia elétrica em Portugal entre 1994 e 2010	3
Gráfico 2: Produção de Energia Elétrica a Partir de Fontes Renováveis em Portugal entre 1995 e 2012	6
Gráfico 3: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2002.....	47
Gráfico 4: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2003.....	48
Gráfico 5: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2004.....	49
Gráfico 6: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2005.....	50
Gráfico 7: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2006.....	51
Gráfico 8: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2010.....	52
Gráfico 9: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2011.....	53
Gráfico 10: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2012.....	54
Gráfico 11: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2002	56
Gráfico 12: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2002	57
Gráfico 13: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2002.....	57
Gráfico 14: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2003	58
Gráfico 15: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do ano de 2003	58
Gráfico 16: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2003.....	59
Gráfico 17: Evolução da irradiação solar ao longo do Inverno 2003/2004	60
Gráfico 18: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do Inverno de 2003/2004.....	60
Gráfico 19: Evolução do consumo elétrico ao longo do Inverno de 2003/2004	60
Gráfico 20: Evolução da irradiação solar ao longo do Inverno 2004/2005	61
Gráfico 21: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do Inverno de 2004/2005.....	61
Gráfico 22: Evolução do consumo elétrico ao longo do Inverno de 2004/2005	61
Gráfico 23: Evolução da irradiação solar ao longo do Inverno 2005/2006.....	62
Gráfico 24: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do Inverno de 2005/2006.....	62
Gráfico 25: Evolução do consumo elétrico ao longo do Inverno de 2005/2006	62
Gráfico 26: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2010	63
Gráfico 27: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do ano de 2010.....	63
Gráfico 28: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2010.....	64
Gráfico 29: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2011	64
Gráfico 30: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2011	65
Gráfico 31: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2011.....	65
Gráfico 32: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2012	66
Gráfico 33: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do ano de 2012.....	66
Gráfico 34: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2012.....	66
Gráfico 35: E_Heatpump vs E_Heatpump S/ Stb By	68
Gráfico 36: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2002	69

Gráfico 37: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2003	70
Gráfico 38: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2010	70
Gráfico 39: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2011	71
Gráfico 40: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2012	71
Gráfico 41: Comparação entre a energia fornecida pelo sistema solar e a energia fornecida pelo apoio em percentagem	73
Gráfico 42: Fração solar registada ao longo dos anos	73
Gráfico 43: Problema com o caudal do circuito primário relacionado com o sistema de anti congelamento.....	75
Gráfico 44: Problema com o caudal do circuito primário relacionado com o sistema de armazenamento de energia.....	75
Gráfico 45: Problema com o caudal do circuito primário relacionado com o sistema de armazenamento de energia (continuação)	76
Gráfico 46: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2004	I
Gráfico 47: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2004	I
Gráfico 48: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2004.....	I
Gráfico 49: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2005	II
Gráfico 50: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2005	II
Gráfico 51: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2005.....	II
Gráfico 52: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2006	III
Gráfico 53: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2006	III
Gráfico 54: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2006.....	III
Gráfico 55: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2004	IV
Gráfico 56: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2005	IV
Gráfico 57: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2006	V

Índice de Tabelas

Tabela 1: Legenda dos gráficos.....	46
Tabela 2: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2002.....	47
Tabela 3: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2003.....	48
Tabela 4: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2004.....	49
Tabela 5: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2005.....	50
Tabela 6: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2006.....	51
Tabela 7: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2010.....	52
Tabela 8: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2011.....	53
Tabela 9: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2012.....	54
Tabela 10: E_Heatpump vs E_Heatpump S/ Stb By.....	68
Tabela 11: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2002.....	69
Tabela 12: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2003.....	70
Tabela 13: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2010.....	71
Tabela 14: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2011.....	71
Tabela 15: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2012.....	72
Tabela 16: Número de habitações T2 e T3 fornecidas pela energia produzida pelos coletores para AQS.....	72
Tabela 17: Emissões evitadas de CO ₂ para a atmosfera.....	73
Tabela 18: Comparação entre os valores com e sem perda da eficiência dos coletores ..	74
Tabela 19: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2004.....	IV
Tabela 20: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2005.....	V
Tabela 21: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2006.....	V
Tabela 22: Número convencional de ocupantes em função da tipologia da fração autónoma.....	VI
Tabela 23: Fatores de emissão de CO ₂	VII

Lista de Abreviaturas

AHU: Air Handling Unit
AIE: Agência Internacional de Energia
APA: Agência Portuguesa do Ambiente
AQS: Águas Quentes Sanitárias
Ar: Árgon
ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers
AUA: Universidade Americana da Arménia
BaU: Business as Usual
CE: Comissão Europeia
CH₄: Metano
CD: Condensador
CFC's: Clorofluorcarbonetos
CO₂: Dióxido de Carbono
COP: Coeficiente de Performance
CPC: Concentradores Parabólicos Compostos
DEC: Desiccant Evaporative Cooling (Arrefecimento Exsicante Evaporativo)
DER: Departamento de Energias Renováveis
DESODEC: Desenho e Instalação de um Sistema de Demonstração para Arrefecimento Ambiente com Tecnologia DEC Assistida por Energia Solar
DGEG: Direção Geral de Energia e Geologia
EDP: Energias de Portugal
EN: Norma Europeia
EV: Evaporador
GEE: Gases com Efeito de Estufa
H₂: Hidrogénio
ISO: Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)
IV: Radiação Infravermelha
LiBr: Brometo de Lítio
LiCl: Cloreto de Lítio
LNEG: Laboratório Nacional de Energia e Geologia
N₂: Azoto
N₂O: Óxido Nitroso
NO_x: Óxidos de Azoto
O₂: Oxigénio
O₃: Ozono
RCCTE: Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios
RPH: Renovação de ar Por Hora
rph: Rotações Por Hora
rpm: Rotações Por Minuto
RSECE: Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SHC: *Solar Heating and Cooling*
SO₂: Dióxido de Enxofre
EU: União Europeia
UTA: Unidade de Tratamento de Ar
UV: Ultravioleta
VEE: Ambiente de Engenharia Visual
WMO: Organização Meteorológica Mundial (*World Metereological Organization*)
γ: Radiação Gama

1. Objetivo

O objetivo desta dissertação é efetuar o estudo do funcionamento de uma unidade de tratamento de ar (UTA) assistida por energia solar com sistema de arrefecimento exsicante- evaporativo (DEC) que está instalada na cobertura do edifício G onde se localizam parte das instalações do Departamento de Energias Renováveis (DER) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), bem como fazer uma análise do desempenho da mesma, tanto ao nível do conforto obtido, como ao nível energético ao longo dos anos de funcionamento.

Esta dissertação aborda também diversos conceitos relacionados com o tema, o tipo de tecnologias existentes na área, bem como faz uma análise de diferentes trabalhos e também de outras instalações que utilizam tecnologias com arrefecimento solar.

1.1. Descrição do trabalho

Esta dissertação foi organizada do seguinte modo:

No Capítulo 1 estão apresentados os objetivos e a organização do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a introdução do trabalho, bem como uma descrição das energias renováveis e não renováveis, das diferentes formas de as obter, bem como das vantagens e desvantagens da utilização das mesmas. Dando mais relevância à energia solar e à tecnologia utilizada na obtenção de energia solar térmica.

Este capítulo também aborda a temática do arrefecimento, mais especificamente do arrefecimento evaporativo e solar e também das tecnologias associadas. Este capítulo termina com uma abordagem ao conceito do conforto térmico.

No Capítulo 3 procura-se fazer uma pesquisa bibliográfica relacionada com o tema e objetivos do trabalho

O Capítulo 4 aborda o caso de estudo onde é descrito e caracterizado todo o sistema DEC em funcionamento no LNEG, desde os seus componentes ao sistema de monitorização e controlo. Neste capítulo é também efetuada uma análise do desempenho da UTA tanto ao nível energético como ao nível de obtenção dos níveis de conforto ao longo do tempo analisado.

No Capítulo 5 são elaboradas as conclusões da dissertação.

No Capítulo 6 são apresentadas as perspetivas futuras relacionadas com a continuação deste trabalho.

2. Introdução

Na sociedade em que vivemos, devido a diversos fatores como as alterações do tipo de trabalho, o sedentarismo, entre outros, o maior período de tempo da população é passado no interior de edifícios, seja nos coletivos, seja nas suas habitações. E a tendência é no sentido de que haja um aumento desse tempo de ocupação e uma diminuição do tempo de permanência em espaços exteriores.

Assim há que ter em conta a existência de diversos fatores que são importantes para que as pessoas se sintam confortáveis nos edifícios, tais como ^{[1][2]}:

- a qualidade do ar;
- a iluminação;
- os níveis de ruído;
- o ambiente térmico circundante nos espaços.

Para manter os edifícios dentro dos níveis de conforto desejados é necessário recorrer a equipamentos de climatização, o que leva a elevados consumos energéticos e, por sua vez, a elevados consumos de recursos naturais necessários à produção dessa mesma energia, contribuindo assim para um aumento dos problemas ambientais derivados das emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

Os principais GEE são, o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonetos (CFC's) e o ozono (O₃). A produção do CO₂ é o principal problema, visto ser responsável por cerca de 64% do efeito de estufa, dando o aumento do efeito de estufa origem a um aumento do aquecimento global o que provoca a ocorrência de alterações climáticas tais como: alteração na precipitação, subida do nível dos oceanos (degelos) e ondas de calor ^{[2][3]}.

De facto, a produção de eletricidade é o sector que mais contribui para a emissão de CO₂ em todo o mundo, chegando a estar na origem de 37% das emissões mundiais ^[4].

O consenso científico predominante é o de que não poderemos evitar alterações climáticas catastróficas sem uma grande redução das emissões de CO₂ de atividades de origem humana nas próximas décadas. Para haver uma estabilização do CO₂ atmosférico a níveis aceitáveis (350 ppm) é necessário que as emissões desçam 95% até 2050 ^{[5][6]}. A maior parte da redução terá que vir do sector energético por ser este o responsável pela maior parte das emissões de CO₂. Esta redução tem que contemplar tanto os países desenvolvidos como os que estão em vias de desenvolvimento, visto que estes últimos estão a aumentar, em muito, as suas emissões. A zona Ásia Pacífico é já responsável por 45% das emissões ^{[7][6]}.

Em Portugal, no ano de 2010, o CO₂ foi o principal gás responsável pelos GEE, representando cerca de 75% do total de emissões, seguido do CH₄ (17%) e do N₂O (6%). O sector da energia incluindo transportes representou, nesse mesmo ano, 70% do total das emissões nacionais ^[9].

Estes elevados consumos de energia a nível mundial levaram à escassez de alguns recursos naturais, o que implicou um aumento significativo dos custos da mesma.

A taxa de crescimento da procura de energia para arrefecimento de edifícios, quer no sector residencial quer no sector terciário, é das mais elevadas. De acordo com diversos estudos, a nível Europeu, o aumento da área arrefecida nos edifícios deverá ser multiplicada por um fator de quatro entre os anos de 1990 e 2020. Este aumento da procura de energia para arrefecimento tem um impacto negativo, causado nos sistemas elétricos nacionais, devido à existência de uma deslocação das “pontas” de carga do Inverno para o Verão, altura do ano em que os níveis dos recursos hídricos são inferiores, sendo este um problema latente, principalmente nos países Mediterrâneos (onde se inclui Portugal) ^[10].

O rápido crescimento observado no consumo energético, onde Portugal não é exceção, com todos os problemas resultantes do modelo energético baseado nas energias não renováveis, faz com que seja imprescindível propor um novo modelo baseado na eficiência e na poupança energética e também na implementação das energias renováveis. Este crescimento do consumo levou a um aumento da necessidade de pensar no meio ambiente e na energia como um todo, podendo-se assim minimizar os efeitos negativos associados à produção e utilização de energia, bem como reduzir as consequências económicas desses efeitos.

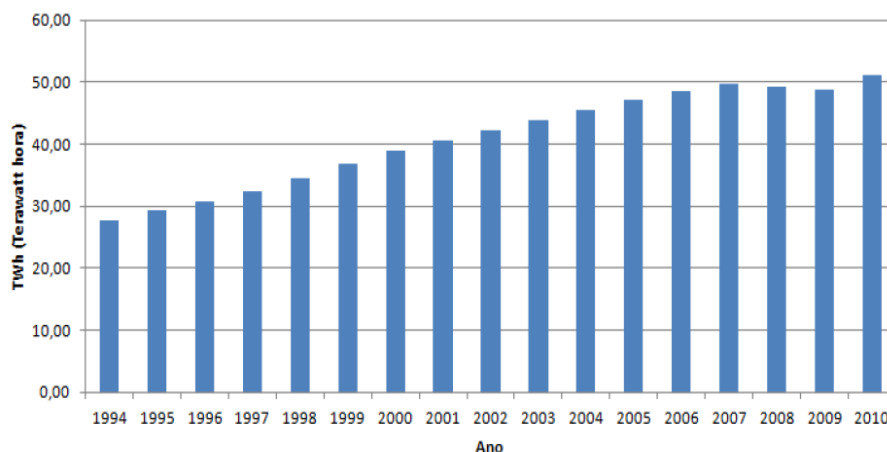


Gráfico 1: Evolução do consumo de energia elétrica em Portugal entre 1994 e 2010 ^[11]

O sector dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final na Europa e cerca de 30% para o caso de Portugal. No entanto, mais de 50% deste consumo pode ser reduzido através de medidas eficiência energética, o que pode representar uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂, o que é quase a totalidade do compromisso da União Europeia (UE) no âmbito do Protocolo de Quioto ^[11].

Existem diversas fontes de energia renovável no nosso planeta, com um elevado potencial energético, tais como a Solar, Eólica, Biomassa e Geotérmica, entre outras, através das quais é possível obter um aproveitamento energético rentável com um baixo nível de emissão de GEE.

Neste âmbito a União Europeia aprovou recentemente o pacote “20-20-20”, que tem como objetivos principais para 2020 atingir ^[12]:

- 20% de poupança do consumo de energia primária em 2020 (relativamente a BaU (*Business as Usual*));
- 20% de energia renovável na UE em 2020 (relativamente ao consumo total, (meta indicativa para Portugal: 31%));
- 20% de redução das emissões GEE em 2020 (relativamente a 1990).

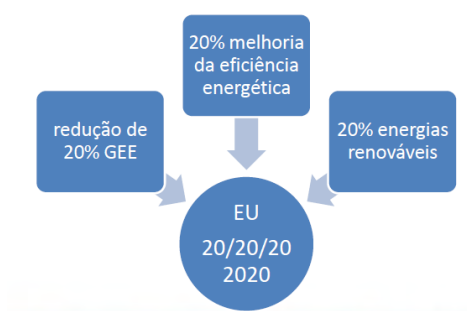


Figura 1: Objetivos “20-20-20” ^[13]

Um fator positivo neste aproveitamento é o facto de existir uma coincidência temporal entre a disponibilidade de energia solar e as necessidades de satisfazer a procura de energia para arrefecimento dos edifícios. Isto porque, no verão existe uma grande quantidade de recurso à energia solar que pode ser utilizada para a obtenção de arrefecimento. Sendo este processo chamado de arrefecimento solar que irá ser desenvolvido mais à frente.

Acresce a isto que os sistemas usados na produção de frio podem ser utilizados na produção de águas quentes sanitárias e também no aquecimento durante o Inverno através da circulação de água quente.

2.1. Energia

A Energia é um recurso imprescindível para que possa existir vida no nosso planeta. É necessária para nos movermos, comunicarmos, para o funcionamento da iluminação, para o conforto térmico nas nossas entre outras coisas.

Existem diferentes formas de energia tais como a térmica, química, nuclear e a mecânica. Podendo a energia ser designada por ^{[14][15]}:

- **Energia primária:** Em que as fontes de energia que se encontram diretamente na natureza (por exemplo: lenha, petróleo bruto, carvão mineral);
- **Energia final:** Que é a energia disponibilizada e utilizada pelos consumidores (por exemplo, a eletricidade que é consumida em casa, a gasolina consumida pelo automóvel).

As fontes de energia dividem-se em dois tipos ^[15]:

- Fontes não renováveis, fósseis ou convencionais;
- Fontes renováveis.

2.1.1. Energia não renovável

Atualmente, a procura de energia assenta fundamentalmente nas fontes de energia não renováveis, que se encontram na natureza em quantidades limitadas e a sua capacidade de renovação é muito reduzida quando comparadas com a utilização que lhes é dada. Estas têm uma tecnologia difundida, mas possuem um elevado impacto ambiental ^[15].

Consideram-se fontes de energia não renováveis os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e o urânio, que é a matéria-prima necessária para se obter energia nuclear. Todas estas fontes de energia além de possuírem reservas finitas têm uma distribuição geográfica não homogênea ^[16].

Os combustíveis fósseis são fortemente poluidores, sendo responsáveis pela destruição de ecossistemas, danos em bosques e aquíferos, doenças, redução da produtividade agrícola, corrosão de edificações, monumentos e infraestruturas, deterioração da camada de ozono, libertação de GEE e chuvas ácidas. Sem esquecer os efeitos indiretos provocados por acidentes em explorações petrolíferas e minas de carvão ou a contaminação através de derramamentos químicos ou de combustível ^[16].

O petróleo, o carvão e o gás natural provêm da acumulação de matéria orgânica animal e vegetal. O processo de formação dos combustíveis fósseis demora milhões de anos, sendo as suas principais características apresentadas de seguida ^[16]:

Carvão

O carvão é uma rocha orgânica com propriedades combustíveis, constituída maioritariamente por carbono. A exploração de jazidas de carvão é feita em mais de 50 países, o que demonstra a sua abundância. Esta situação leva a que este combustível seja também o mais barato.

Inicialmente, o carvão era utilizado em todos os processos industriais e, ao nível doméstico, em fornos, fogões, etc. Foi, inclusive o primeiro combustível fóssil a ser utilizado para a produção de energia elétrica nas centrais térmicas. Em 1950, o carvão era o combustível principal, tendo em conta que cobria 60% das necessidades energéticas mundiais. Atualmente esta percentagem sofreu uma redução significativa devido à utilização do petróleo e dos seus derivados. Estima-se que, com o atual ritmo de consumo, as reservas estejam ainda disponíveis para os próximos 120 anos. O principal problema da utilização do carvão prende-se com os poluentes resultantes da sua combustão. De facto, a sua queima, conduz à formação de cinzas, dióxido de carbono, dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de azoto (NO_x), em maiores quantidades do que os produzidos na combustão dos restantes combustíveis fósseis.

Petróleo

O petróleo é um óleo mineral, constituído basicamente por hidrocarbonetos. A refinação do petróleo bruto (crude) consiste na sua separação em diversos componentes e permite obter os mais variados combustíveis e matérias-primas. Um dos principais objetivos das refinarias é obter a maior quantidade possível de gasolina. Esta é a fração mais utilizada do petróleo e, também, a mais rentável. É de referir que, todos os transportes, a nível mundial, dependem da gasolina, do *jet fuel* (usado pelos aviões) e do gasóleo. Por esta razão, as refinarias têm vindo a desenvolver, cada vez mais, os processos de transformação das frações mais pesadas do petróleo bruto em gasolina e gasóleo.

Estima-se que, com o atual ritmo de consumo, as reservas planetárias de petróleo se esgotem nos próximos 30 ou 40 anos. Trata-se de um combustível muito nocivo para o ambiente em todas as fases do consumo.

Gás Natural

O gás natural é um combustível fóssil com origem muito semelhante à do petróleo bruto, ou seja, formou-se durante milhões de anos a partir dos sedimentos de animais e plantas. Tal como o petróleo, encontra-se em jazidas subterrâneas, de onde é extraído. A principal diferença prende-se com a possibilidade de ser usado tal como é extraído na origem, sem necessidade de refinação.

Atualmente, Portugal recebe o gás natural proveniente da Argélia através de um gasoduto.

Constituído por pequenas moléculas de carbono e hidrogénio, o gás natural apresenta uma combustão mais limpa do que qualquer outro derivado do petróleo. Acresce também, que no que respeita à emissão de GEE, a combustão do gás natural emite dióxido de carbono e uma quantidade de óxidos de azoto muito inferior à que resulta da combustão da gasolina ou do fuelóleo.

Energia Nuclear

A energia nuclear é produzida através das reações de fissão ou fusão dos átomos, durante as quais são libertadas grandes quantidades de energia que podem ser utilizadas para produzir energia elétrica. A fissão nuclear utiliza o urânio, um mineral presente na Terra em quantidades limitadas, como combustível e consiste na partição de um núcleo pesado em dois núcleos de massa aproximadamente igual.

Ainda que a quantidade de energia produzida através da fissão nuclear seja significativa, este processo apresenta diversos problemas de difícil resolução, como, o perigo de explosão nuclear e de fugas radioativas e a produção de resíduos radioativos. O que leva a que exista um risco elevado na sua utilização.

2.1.2. Energia Renovável

Uma fonte de energia é considerada renovável quando não é possível estabelecer um fim temporal para a sua utilização. É o caso do calor emitido pelo sol, do vento, das marés ou dos cursos de água. As energias renováveis são virtualmente inesgotáveis, mas são limitadas em termos da quantidade de energia que é possível extrair em cada momento ^[16].

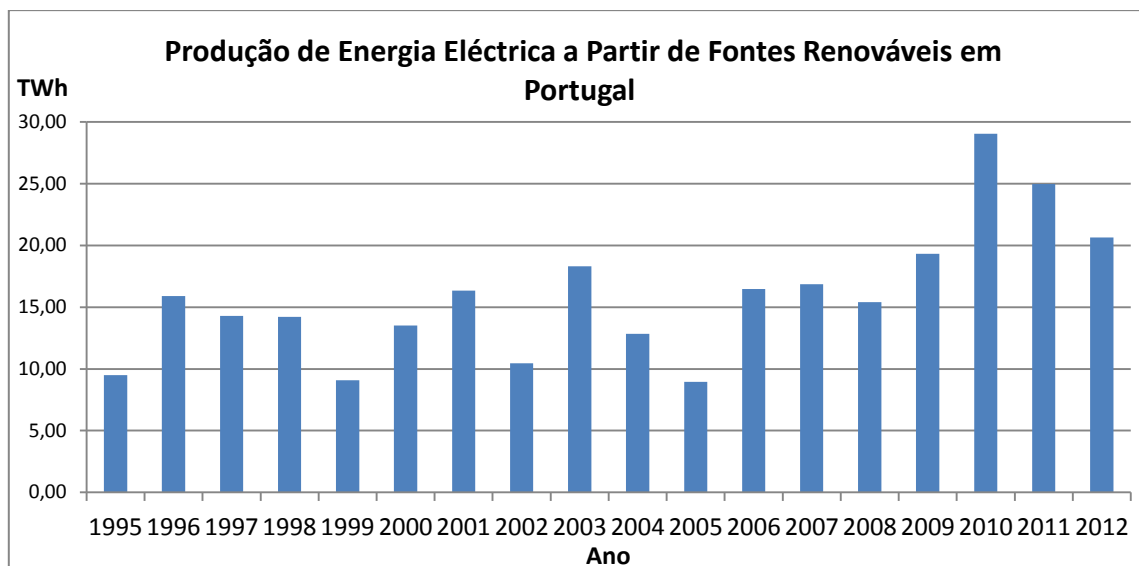


Gráfico 2: Produção de Energia Elétrica a Partir de Fontes Renováveis em Portugal entre 1995 e 2012 ^[11]

As energias renováveis, incluem a:

- Energia solar;
- Energia eólica
- Energia geotérmica;
- Energia hídrica;
- Energia dos oceanos;
- Biomassa.

Entre as vantagens da utilização das energias renováveis pode-se dizer que são pouco ou nada poluentes, são descentralizadas, estando assim mais próximo dos consumidores de energia, e estão disponíveis em todos os países, ainda que cada um tenha recursos e potenciais distintos ^[16].

Um problema resultante de um sistema energético baseado na utilização de combustíveis fósseis é a dependência económica dos países não produtores das matérias-primas. Em alternativa, as energias renováveis são geralmente consumidas no local onde são geradas, isto é, são fontes de energia autóctones. Assim, é possível diminuir a dependência externa e contribuir ainda para a criação de postos de trabalho. Atualmente estima-se que as energias renováveis são responsáveis pela criação de cinco vezes mais postos de trabalho do que as convencionais ^[16].

A utilização das energias renováveis conduz também a uma redução dos custos energéticos, visto que a utilização da maioria dos recursos renováveis é gratuita.

Em termos de desvantagens que impedem uma utilização mais generalizada, a mais importante diz respeito ao elevado custo inicial. As energias renováveis necessitam de equipamentos que normalmente tem um custo mais elevado no momento da sua aquisição, representando um entrave para as pessoas interessadas na sua utilização. Este custo mais elevado é normal tendo em conta que as tecnologias associadas aos combustíveis fósseis tiveram muitos anos de grande desenvolvimento e de utilização generalizada ^[16].

Tendo em conta que o tema desta dissertação envolve a utilização de energia solar, vou abordar mais detalhadamente este tipo de energia renovável.

2.1.2.1. Energia Solar

Em 20 minutos, chega à Terra energia em quantidade igual à que toda a humanidade consome durante um ano. O sol fornece esta energia de forma natural, gratuita e sem prejudicar o meio ambiente. A energia produzida pelo Sol transmite-se no espaço na forma de radiação eletromagnética. Esta

radiação é produzida através de reações nucleares e vai incidir na superfície da Terra. O total da Energia Solar incidente na superfície da Terra no período de ano é superior está avaliado em $1,5 \times 10^{18}$ kWh, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo anual de energia bruta da humanidade ^{[11][17]}.

Esta energia, ao atingir a atmosfera terrestre pode ser, absorvida ou refletida pelos seus diferentes componentes. Segundo a WMO (*World Meteorological Organization*) a radiação solar incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol, situada no topo da atmosfera, é de 1367 W/m^2 .

Após atravessar a atmosfera, num dia de céu relativamente limpo, a radiação solar atinge a superfície terrestre com uma potência inferior em cerca de 30% da registada no topo da mesma, ou seja, aproximadamente, de 1000 W/m^2 ^[11].

A radiação que atinge a superfície terrestre após atravessar a atmosfera é constituída por três componentes ^[11]:

- **Radiação direta:** atinge diretamente a superfície
- **Radiação difusa:** desviada em diferentes direções pelos componentes da atmosfera
- **Radiação refletida:** proveniente da reflexão no solo e objetos circundantes

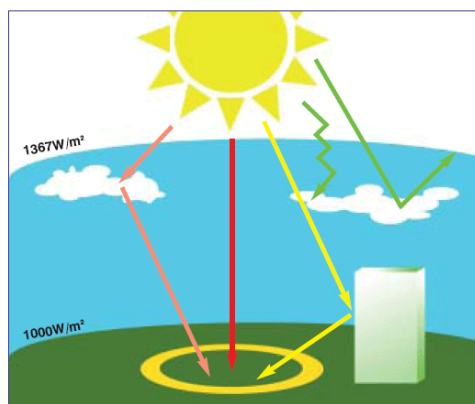


Figura 2: Distribuição da Radiação Solar

A energia solar é a origem de todos os processos físicos e químicos que ocorrem na Terra, que são responsáveis pelas condições meteorológicas, circulações oceânicas, fenómenos biológicos, entre outros ^[18].

Esta radiação é um conjunto contínuo de ondas de diversos comprimentos, dos quais a luz visível é apenas uma pequena parte, correspondendo a um pequeno intervalo do espectro (comprimentos de onda entre cerca de 400 nm e 800 nm). As diferentes bandas do espectro eletromagnético designam-se por radiação Gama (γ), X, Ultravioleta (UV), Visível, Infravermelha (IV), Micro-ondas e Ondas de Rádio ^[19].

Na Figura seguinte apresenta-se o espectro eletromagnético.

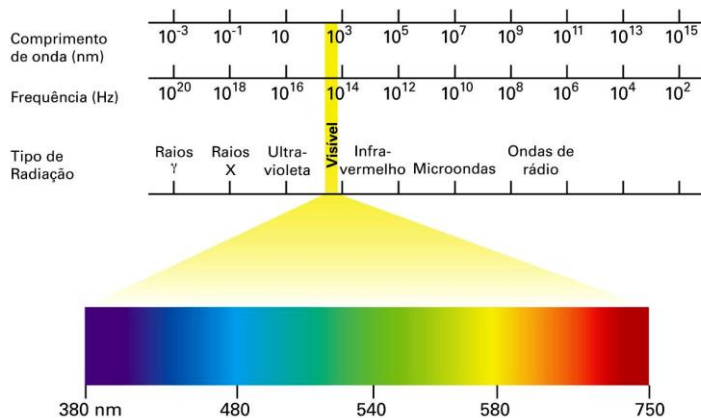


Figura 3: Espectro de Radiação Eletromagnética ^[19]

A energia solar pode ser utilizada para diversas finalidades como a produção de eletricidade ou de calor, diminuindo assim a utilização de outras energias prejudiciais para o meio ambiente. A utilização deste tipo de energia começou a ser levada mais a sério nos últimos anos, assim que os recursos convencionais começaram a falhar, e a sofrer um grande aumento de preço.

A intensidade da energia disponível num determinado ponto na Terra depende do dia do ano, hora e latitude. Além disso, a quantidade de energia que pode ser recolhida depende da orientação do dispositivo recetor ^[20].

Portugal é um dos países da Europa com maior potencial nesta área visto que apresenta um dos recursos mais elevados em energia solar. Uma forma de dar ideia desse facto é em termos do número médio anual de horas de Sol, que varia entre 2.200 e 3.000 h para Portugal e, por exemplo, para Alemanha varia entre 1.200 e 1.700 h ^[11].

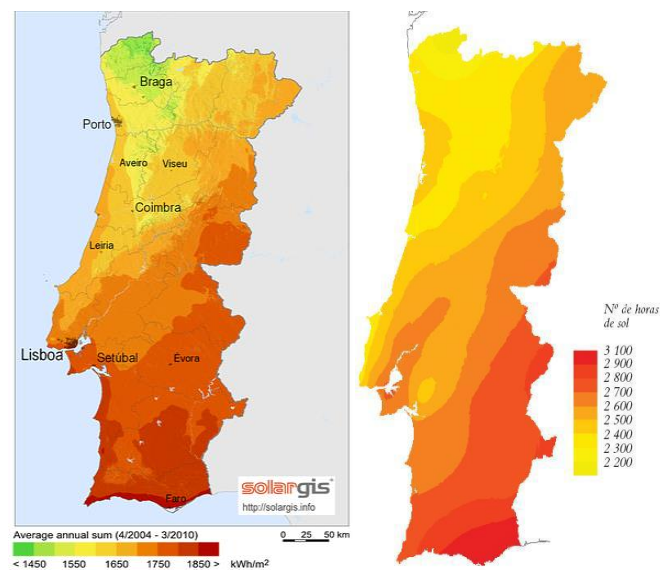


Figura 4: Radiação solar incidente no plano horizontal em Portugal continental e número de horas de sol anuais ^{[21] [22]}

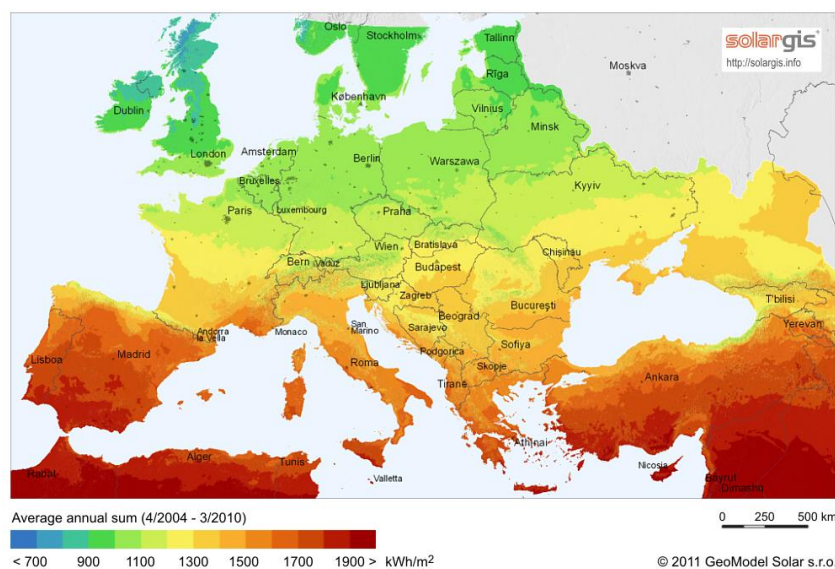


Figura 5: Radiação solar incidente no plano horizontal na Europa ^[21]

No entanto, é um recurso que tem sido mal aproveitado. Olhando para alguns dos números relativos à difusão dos coletores solares térmicos na Europa, constata-se que é uma tecnologia com maior difusão em países como a Alemanha e a Áustria, com um potencial muito inferior ao português ^[22].

Atualmente existem dois métodos para a captura da energia solar ^[23]:

- **Método direto:** significa que existe apenas uma transformação para converter a energia solar num tipo de energia aproveitável pelo Homem. Um exemplo claro deste método é a transformação da energia solar recebida pelas células fotovoltaicas em eletricidade ou a transformação de energia solar em calor através de um coletor solar térmico em que a água doméstica é aquecida diretamente pelo coletor solar.
- **Método indireto:** a energia solar irá sofrer mais do que uma transformação até que se obtenha energia utilizável pelo homem, como por exemplo: nos coletores é aquecido um fluido que através de um permutador de calor aquece a água doméstica. Existem também sistemas que controlam automaticamente as cortinas, que funcionam de acordo com a disponibilidade da energia solar.

A energia solar pode ser aproveitada através de diversas formas, existindo normalmente a distinção entre sistemas passivos e ativos ^[23]:

- **Sistemas passivos:** são geralmente diretos, São designados sistemas passivos quando ocorre a transformação de energia calorífica em energia mecânica. Num coletor quando a circulação do fluido (água ou outro) é feita naturalmente, o sistema é passivo.
- **Sistemas ativos:** são sistemas que necessitam do auxílio de dispositivos elétricos, mecânicos ou químicos para aumentar a efetividade da captação de energia. Num coletor, quando a circulação é forçada (com uma bomba ou ventilador), o sistema é ativo.

Assim sendo a grande maioria dos métodos diretos ocorrem em sistemas passivos e a maioria dos métodos indiretos ocorrem em sistemas ativos.

2.2. Tecnologia utilizada no Solar Térmico

2.2.1. Coletores Solares Térmicos

Os coletores solares convertem a radiação solar, que passa através da superfície do coletor, em energia térmica, ou seja, em calor, permitindo assim aquecer o fluido térmico que circula no seu interior.

Ao fazer circular o fluido através dos coletores retira-se calor destes, podendo este ser aproveitado para aquecer um depósito de acumulação de água. Geralmente este calor é transferido para a água potável através de um permutador de calor.

Ao arrefecer, o fluido de transferência escoo através de uma segunda conduta de volta ao coletor, enquanto a água potável, entretanto aquecida, sobe no depósito de acumulação, criando uma estratificação térmica, ficando a água aquecida no topo (onde está localizada a tomada de água quente) e a água fria no fundo (onde está localizado o abastecimento de água para aquecimento) ^{[24] [25]}.

Para aproveitar a energia que provém da radiação solar interessa que a superfície, sobre a qual vai incidir a radiação, consiga absorver o máximo da energia radiante incidente. O absorsor é o componente do coletor que absorve e converte a radiação solar em energia térmica, através do fluido térmico referido anteriormente.

Para uma melhor conversão deve possuir uma elevada absorvidade para maximizar a captação de energia radiante incidente, ser isolado termicamente de forma a reduzir as perdas por convecção-condução e possuir uma baixa emissividade na gama dos infravermelhos. A cobertura transparente deve possuir uma elevada transmissividade e consequentemente uma baixa refletividade ^{[24] [25]}.

O isolamento deve poder suportar temperaturas elevadas visto que o coletor, quando não está em funcionamento, pode atingir temperaturas superiores a 150°C ^[26]. Quando a temperatura de saída é igual à temperatura de entrada, ou quando o caudal for nulo, o rendimento é nulo e o coletor atinge a temperatura de estagnação (temperatura máxima que o coletor pode atingir) ^[25].

A área de coletores solares a instalar depende do consumo de água quente e da temperatura de utilização, sendo tanto maior quanto maiores forem as necessidades de energia.

Ao contrário do que ocorre quando é utilizada, por exemplo, uma caldeira ou uma bomba de calor, a quantidade de energia recebida por um painel solar não está dependente do sistema de controlo do equipamento, dependendo das condições climatéricas sobre as quais o utilizador não tem controlo, donde este sistema não satisfazer, durante todo o ano, as necessidades de aquecimento de água, tendo em conta que não existe radiação solar disponível para as satisfazer, o que leva a que estes sistemas tenham de ser de ser complementados por equipamento auxiliar, mais concretamente, por sistemas de energia de apoio que podem consistir numa resistência elétrica (normalmente colocada no interior do depósito), ou numa caldeira ou um esquentador ^[25].

Existem vários tipos de coletores que podem ser utilizados consoante a utilização que se pretende, dos quais podemos destacar ^{[25][27]}:

- **Coletor plano;**
- **Coletor concentrador;**
- **Coletor CPC (Concentrador Parabólico Composto);**
- **Coletor de tubos de vácuo.**

O principal critério utilizado para a seleção dos coletores deve ter em consideração a gama de temperaturas pretendidas para o projeto. Consoante a gama de temperaturas, existem coletores mais apropriados a cada uma delas. Na figura seguinte podem-se ver as gamas de temperaturas e os respetivos coletores.

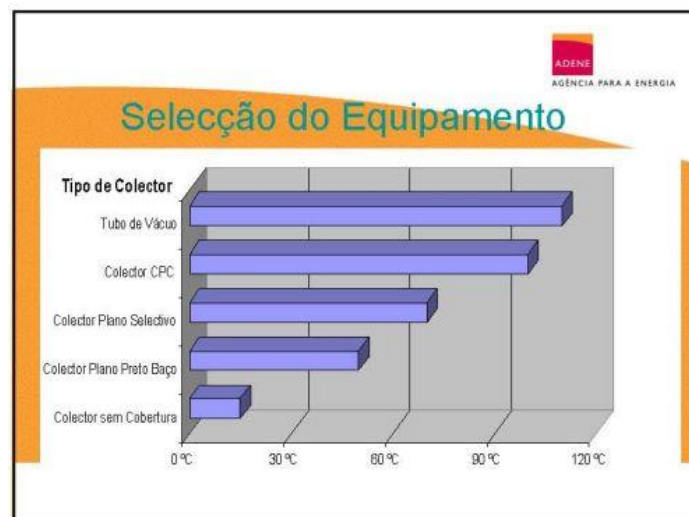


Figura 6: Seleção do equipamento de acordo com a temperatura pretendida ^[27]

2.2.1.1. Coletor Plano

Este é formado por ^[25]:

- **Cobertura transparente/vidro:** para provocar o efeito de estufa e reduzir as perdas de calor e ainda assegurar a estanquidade do coletor.
- **Placa absorsora/absorvedor:** serve para receber a energia e transforma-la em calor, transmitindo-a para o fluido térmico que circula por uma série de tubos em paralelo ou serpentina. Para obter maiores rendimentos existem superfícies seletivas que absorvem como um corpo negro mas perdem menos radiação.
- **Isolamento:** serve para evitar perdas de calor
- **Caixa isolada:** serve para dar rigidez e proteger o interior do coletor, dos agentes externos.

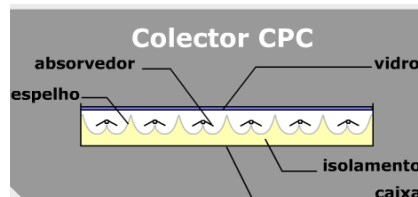


Figura 9: Constituição de um coletor CPC [29]

2.2.1.4. Coletor de Tubos de Vácuo

Um tubo de vácuo consiste geralmente num tubo de vidro transparente de borossilicato de parede dupla, estando o seu interior em vácuo. A parede interna está coberta de nitrato de alumínio, material com excelente capacidade de absorção de calor. No interior existe um tubo de cobre, denominado de *heat-pipe* ou tubo de calor, ao qual estão fixos recetores solares de alumínio seletivo [25].

O transporte do calor para a água é efetuado pelo tubo de calor. Este tubo contém no seu interior um gás facilmente evaporável que sofre um ciclo evaporação/condensação. A condensação ocorre na parte superior do tubo de calor, que se encontra em contacto com a água, transmitindo-lhe assim o calor. O facto do interior dos tubos se encontrar em vácuo leva a que sejam eliminadas as perdas por convecção, elevando assim o rendimento a altas temperaturas devido a menores coeficientes de perda a eles associados [25].

Comparados com os coletores planos, os coletores de tubos garantem um maior poder de absorção da energia solar disponível. A tecnologia de tubos de vácuo garante não só a absorção da energia solar direta, mas devido à sua cobertura seletiva garantem também a absorção da energia radiante, muito importante nos dias de maior nebulosidade. A existência de um espaço sob vácuo entre o coletor e o vidro exterior possibilitam uma captação de energia constante mesmo em temperaturas negativas, desde que haja luz solar [25].

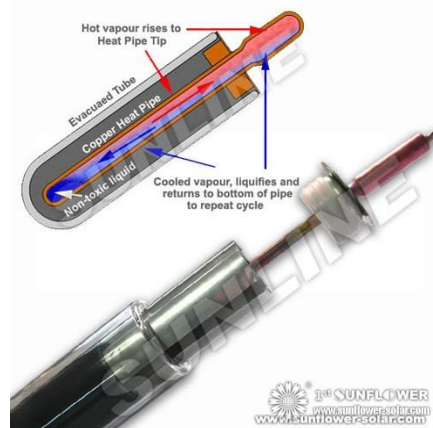


Figura 10: Tubo de vácuo [31]

A ligação e transferência de calor entre a área de captação e o depósito é efetuada por um circuito hidráulico. Este circuito pode ser classificado como [26] [32].

- **Circuito direto:** o fluido que circula nos coletores solares é a água de consumo (a água, visto poder ser consumida, não pode ser sujeita a nenhum tipo de tratamento para preservação do equipamento).
- **Circuito indireto:** nos coletores existe um circuito fechado (primário) onde circula um determinado fluido térmico, e com permuta térmica para o circuito de consumo (secundário) num permutador de calor interior ou exterior ao depósito.

Os circuitos do painel solar e das águas sanitárias são distintos, logo é possível efetuar o tratamento da água que circula no painel tendo em vista a preservação dos equipamentos (uso de inibidores, uso de anticongelante, regulação do pH da água).

A circulação do fluido térmico no circuito primário pode ser efetuada de acordo com uma das seguintes configurações ^{[26] [32]}:

- **Termossifão:** que é do tipo passivo, em que existe circulação natural do fluido térmico, com base na diferença de densidades. Pode se dizer que é autorregulada, estabelecendo-se sempre que existe suficiente irradiação.
- **Circulação forçada:** que é do tipo ativo, em que é necessário a utilização de uma bomba circuladora para vencer perdas de carga do circuito.

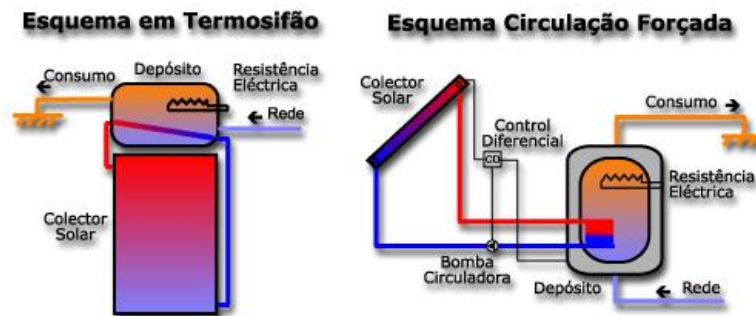


Figura 11: Esquema de circulação em termossifão e com circulação forçada ^[33]

A área de captação necessária a uma determinada aplicação implica, muitas vezes, a ligação de vários coletores solares, ligação essa que pode ser efetuada de acordo com as seguintes configurações ^{[32] [34]}:

- Ligação em série;
- Ligação em paralelo;
- Ligação em paralelo de canais;

O aproveitamento da energia solar é usualmente empregue em conversões térmicas a baixa temperatura, nomeadamente na produção de águas quentes para ^[32]:

- Habitações;
- Hotéis;
- Lares de idosos;
- Aquecimento ambiente (piso radiante);
- Aquecimento de piscinas;
- Água quente de processos industriais.

A conversão térmica a alta temperatura por via de concentração, de utilização menos frequente, é aplicada na ^[32]:

- Produção de eletricidade;
- Produção de vapor de processos industriais;
- Destoxificação de efluentes/águas residuais.

2.3. Arrefecimento

Cada vez mais as pessoas estão habituadas a viver e a trabalhar em ambientes climatizados, o que levou a um grande aumento do número de edifícios com equipamentos de ar condicionado, sendo que está provado que a capacidade de trabalho dos seres humanos decresce consideravelmente num espaço com temperaturas acima dos 24°C ^[35].

Tendo em conta este facto devem-se procurar e avaliar as melhores estratégias de arrefecimento de forma a seleccionar as mais corretas para o clima do local em questão.

Para se projetar um sistema de arrefecimento calcula-se a potência de arrefecimento com base na carga térmica no Verão, que é a soma de todas as cargas internas e externas que afetam o equilíbrio entre o ambiente interior a arrefecer e o ambiente exterior (não apenas o espaço exterior, mas também os

espaços contíguos não climatizados). No Verão, a quantidade de calor a ser rejeitado é dependente de diversos fatores, alguns dos quais variáveis ao longo do dia, tal como a radiação solar incidente ^[36].

Os fatores que têm maior impacte nas necessidades de arrefecimento são ^[36]:

- Efeito da radiação solar através das superfícies transparentes;
- Efeitos da transferência de calor por condução através de superfícies claras e opacas;
- Inércia térmica do edifício;
- Cargas térmicas internas, tanto sensíveis como latentes, devido à presença de pessoas e fontes produtoras de calor (tais como iluminação, maquinaria, etc.);
- Ganhos de calor, sensível e latente, devido à infiltração de ar e ventilação do local.

As necessidades de arrefecimento no Verão são fortemente influenciadas pelos elementos arquitetónicos que definem a envolvente do edifício. Um sistema de arrefecimento projetado para os meses de Verão deve ser capaz de remover tanto o calor sensível como o calor latente do edifício ^[36].

Existem algumas estratégias de arrefecimento, tais como o arrefecimento pelo solo, o radiativo, o evaporativo e o solar, dos quais estes dois últimos são objeto do seguinte aprofundamento:

2.3.1. Arrefecimento Evaporativo

Este tipo de arrefecimento é baseado na diminuição de temperatura associada à mudança de fase da água do estado líquido ao estado de vapor. Quando o decréscimo é acompanhado de um aumento do conteúdo do vapor de água, dá origem a um arrefecimento evaporativo direto. Neste caso, o ar exterior entra em contacto com a água, sendo arrefecido por evaporação da mesma.

O processo de arrefecimento evaporativo direto provoca, para além do desejado arrefecimento do ar, também a sua humedificação, o que poderá ser indesejável para certas aplicações, nomeadamente, as que se destinam ao conforto em espaços cujos ganhos de calor latentes sejam elevados. Por este motivo existe a alternativa de promover o arrefecimento através do transporte em condutas cuja face exterior está em contacto com a água arrefecendo a face interior, estando-se então na presença de arrefecimento evaporativo indireto, assim designado por se contribuir para uma diminuição da temperatura do ar interior sem o aumento do conteúdo de vapor de água ^{[37] [38] [39]}.

No processo de arrefecimento evaporativo o arrefecimento do ar é obtido através da perda de calor para a água que, por sua vez, evapora, ou seja, é fornecida energia para evaporar a água. Um parâmetro importante deste processo é o calor latente de vaporização. A água, devido a seu elevado calor latente de vaporização (2257 kJ/kg a 25°C), demora a vaporizar-se, logo a sua eficiência em retirar energia do ar é elevada quando comparada com outros líquidos com calores latentes de vaporização mais baixos ^[40].

A redução de temperatura será tanto maior, quanto menor for a humidade relativa do ar exterior, assim, para uma mesma temperatura de entrada, podemos ter diferentes temperaturas de saída conforme varie a humidade relativa do ar à entrada, o que faz com que o processo de arrefecimento seja ineficiente quando o ar não tem uma humidade relativa baixa, sendo o processo de arrefecimento evaporativo mais eficiente em zonas quentes e secas ^[41].

Nos casos em que a humidade é elevada é necessário proceder a uma pré-desumidificação do ar, com vista a aumentar a eficácia do processo evaporativo.

Para proceder a uma pré-desumidificação do ar é utilizado a tecnologia do arrefecimento exsicante evaporativo, tecnologia essa utilizada na UTA/DEC do LNEG e que é aprofundada mais à frente nesta dissertação.

É importante referir que a renovação de ar é uma condição essencial para qualquer sistema de arrefecimento evaporativo, exceto quando o objetivo for apenas a humedificação do ambiente (como no caso de câmaras frigoríficas, estufas de produtos diversos ou câmaras de fermentação de massas). A renovação do ar é imprescindível para que ocorra a diminuição da temperatura no ambiente ^[42].

2.3.2. Arrefecimento Solar

A utilização de energia solar para o arrefecimento é um conceito atrativo, pois as necessidades de arrefecimento coincidem, na maior parte do tempo, com a disponibilidade de radiação solar.

Antes da crise energética dos anos 70, do século passado, a ideia da utilização de energia solar para como meio de refrigeração era conhecida mas ainda pouco utilizada. De facto, na Exibição Mundial de 1878 em Paris, Augustin Mouchot produziu o primeiro bloco de gelo com energia solar, utilizando uma máquina de absorção periódica de Edmund Carré ^[43].

Com a subida dos preços de combustíveis, estes sistemas tornaram-se uma opção a considerar, devido à vantagem da fonte de energia ser gratuita.

As tecnologias de arrefecimento solar têm a capacidade de suprir a maioria das exigências dos sistemas clássicos de compressão, com as seguintes vantagens: a energia primária usada é menor, permite um menor custo fixo da potência elétrica contratada, visto que o consumo de energia elétrica pode ser até 20 vezes inferior. Os sistemas não utilizam CFC nem HCFC, como fluido refrigerante, utilizando normalmente água e soluções salinas. Tendo também a vantagem de anular o incómodo sonoro provocado pelo compressor ^{[36] [44]}.

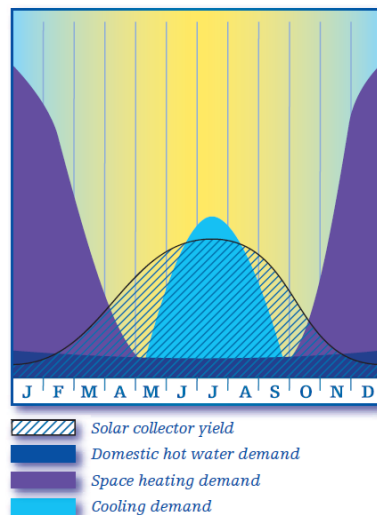


Figura 12: Procura e disponibilidade ^[45]

2.3.3. Tecnologias de Arrefecimento

Existem equipamentos destinados ao arrefecimento denominados de *chillers*. Este tipo de equipamento consiste numa máquina frigorífica que tem como função arrefecer um fluido. São amplamente usados em sistemas de ar condicionado de grandes capacidades e em processos industriais que necessitam de uma grande potência de arrefecimento.

Este efeito é obtido através do processo cíclico de refrigeração, no qual o fluido refrigerante vai circular sofrendo algumas interações, desde mudanças de temperatura e pressão, até se obterem as temperaturas indicadas para a produção de frio ^[46].

Atualmente os sistemas mais comuns de arrefecimento que utilizam o solar térmico para produzir frio podem ser classificados em duas grandes famílias ^[36]:

- **Sistemas fechados:** *Chillers* térmicos que produzem água refrigerada para alimentação de unidades de tratamento de ar (arrefecimento e desumidificação) ou para uma rede de água refrigerada de alimentação de sistemas descentralizados (por exemplo, ventilo-convetores).
- **Sistemas abertos:** O ar é diretamente tratado (arrefecido e desumidificado) em função das condições de conforto desejadas. O refrigerante continua a ser a água, dado que está em contacto direto com o ar a arrefecer e é dispensada do sistema depois de providenciar o efeito de

arrefecimento sendo então um novo fluido refrigerante colocado em substituição. Os sistemas mais comuns utilizam uma roda exsicante rotativa.

Os principais tipos de *chiller* existentes são ^[47]:

- *chillers* de compressão ou elétrico;
- *chillers* de absorção;
- *chillers* de adsorção.

2.3.3.1. Chillers de compressão ou elétrico

Os chillers de compressão utilizam um compressor mecânico, normalmente ativado por um motor elétrico, para aumentar a pressão no circuito do sistema. Este processo tem como desvantagem o relativamente elevado consumo energético do compressor ^[46].

2.3.3.2. Chillers de absorção

Os chillers de absorção têm a capacidade para produzir água gelada a partir de uma fonte de calor. Os sistemas de produção de frio por ciclo de absorção foram os primeiros a ser utilizados comercialmente mesmo antes dos comuns sistemas de compressão de vapor. O primeiro equipamento de arrefecimento foi desenvolvido por Edmond Carré, funcionava por ciclo de absorção e foi colocado em operação por volta de 1850 ^[47].

Os *chillers* de absorção subdividem-se em dois tipos principais ^[46]:

- **Chiller de absorção de queima direta:** que podem ser de simples ou duplo efeito e em que o calor necessário para o processo é obtido através da queima direta de um combustível, normalmente gás natural.
- **Chiller de absorção de queima indireta:** que também podem ser de simples ou duplo efeito e em que o calor necessário é fornecido tipicamente na forma de vapor a baixa pressão, água quente ou através de outros processos que forneçam calor ao gerador do chiller.

Os *chillers* de absorção são muitas vezes integrados em sistemas de cogeração, de forma a permitir o aproveitamento do calor que noutras circunstâncias seria desperdiçado. O *chiller* de absorção de queima indireta que utiliza a água quente como fonte de calor representa o tipo de *chiller* mais apropriado para a integração em sistemas de micro-cogeração, já que estes sistemas produzem água quente a temperaturas adequadas para este tipo de *chillers*, podendo-se utilizar coletores solares térmicos para a obtenção de água quente ^{[46] [48]}.

Existem essencialmente dois tipos distintos de *chillers* de absorção de queima indireta, sendo que o processo base consiste em, pelo menos, dois componentes químicos diferentes, em que um deles funciona como refrigerante e o outro como absorvente ^{[36] [46]}:

- Sistemas onde o fluido refrigerante é a amónia e o fluido absorvente é a água. Estes sistemas têm um investimento relativamente elevado, e são normalmente aplicados apenas em instalações que necessitem de uma grande capacidade de refrigeração.
- Sistemas onde o fluido refrigerante é a água e o absorvente é o brometo de lítio (LiBr). Este é o sistema mais utilizado nos casos de integração com sistemas de micro-cogeração, devido essencialmente a uma melhor relação custo/eficiência energética.

Na sua conceção mais simples o *chiller* de absorção consiste num evaporador, um condensador, um absorvedor, um gerador e uma bomba.

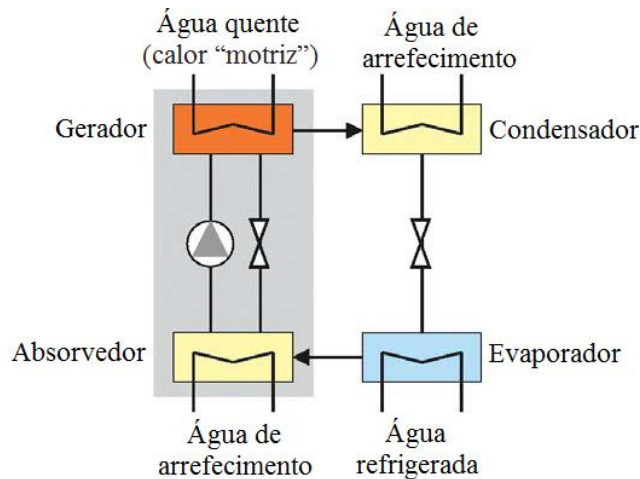


Figura 13: *Chiller* de absorção ^[49]

O funcionamento do sistema descreve-se do seguinte modo ^[49] ^[50] ^[51]:

No gerador (Figura 13) há um consumo de calor do exterior, a uma temperatura relativamente elevada, com a finalidade de produzir vapor de água. Este vapor é gerado a partir da solução brometo de lítio/água, ocorrendo então uma separação da solução.

Ao sair do gerador, o vapor segue para o condensador onde é arrefecido ocorrendo rejeição de calor. Ao ser arrefecido o vapor fica no estado líquido a alta pressão, passando em seguida por uma válvula de expansão, onde ocorre uma brusca queda de pressão.

Esse fenómeno faz com que a temperatura do refrigerante diminua, seguindo então para o evaporador, onde se evapora através do calor proveniente do meio que se deseja arrefecer. Neste processo o efeito de refrigeração é conseguido em condições de pressão muito baixas.

Voltando ao início, no gerador, após a separação da solução, o absorvente regenerado, ou mais concentrado, vai passar, a uma alta temperatura e pressão, através de uma válvula redutora de pressão, com o objetivo de reduzir a sua pressão ao nível da pressão de evaporação, após o que é devolvido ao absorvedor. O absorvedor trabalha a uma temperatura moderadamente baixa e necessita de água de arrefecimento para refrigeração.

O vapor que tinha sido gerado no evaporador é absorvido pelo líquido absorvente no absorvedor. O absorvente que retirou o refrigerante, mais diluído por essa ação, é bombeado para o gerador onde o processo se inicia de novo.

O arrefecimento solar por absorção foi o primeiro tipo de sistema de refrigeração solar e é hoje o mais utilizado.

Para sistemas de absorção de simples efeito a temperatura exigida à fonte de calor situa-se, normalmente, acima dos 80°C ^[49] ^[51]. Os valores típicos para o COP destes sistemas estão compreendidos entre 0,6 e 0,8 ^[49].

Já os equipamentos de absorção de duplo efeito, com dois geradores, exigem temperaturas da fonte quente superiores a 140°C, podendo atingir valores de COP superiores a 1, obtendo-se assim um desempenho superior ao sistema de simples efeito ^[49] ^[51].

2.3.3.3. *Chiller* de Adsorção

A adsorção consiste na retenção, à superfície de um sólido (adsorvente), de partículas líquidas ou gasosas (fluido), devido a uma atração entre as moléculas da superfície do adsorvente e as do fluido ^[52]. A principal diferença da absorção é que num processo de adsorção o fluido não se incorpora no volume do material, mas antes fica retido na sua superfície. O grau de adsorção depende da temperatura, da pressão e da área da superfície ^[53].

As máquinas disponíveis no mercado utilizam água como refrigerante e a sílica gel como adsorvente, apesar de atualmente existirem alguns fabricantes que utilizam zeolite como adsorvente ^[49].

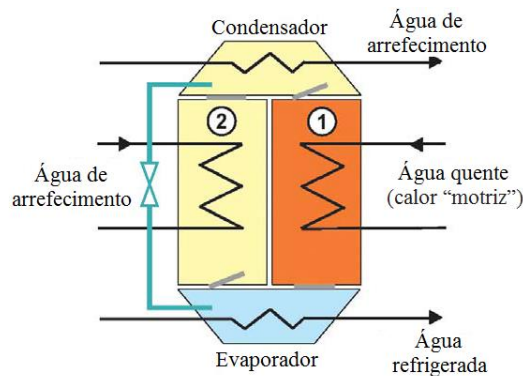


Figura 14: *Chiller* de adsorção ^[49]

O funcionamento do sistema descreve-se do seguinte modo ^{[36] [49] [54]}:

Quando a água quente é fornecida ao compartimento adsorvente 1 (Figura 14), o adsorvente é regenerado por aquecimento (esta água pode ser fornecida por um sistema solar térmico), ocorrendo a dessorção. A água na forma de vapor vai ser enviada para o condensador onde se condensa.

A água vai passar por uma válvula de expansão, sendo enviada a baixa pressão, para o evaporador onde se evapora, ocorrendo a fase de produção de frio.

O vapor de água proveniente do evaporador vai ser adsorvido no segundo compartimento que se mantém a baixa pressão. Este compartimento tem de ser arrefecido para permitir uma adsorção contínua.

Quando a "produção de frio" diminui, devido à saturação do adsorvente no vapor de água, as funções dos dois compartimentos são trocadas

Existem poucas centenas de máquinas em todo o mundo, mas com um interesse crescente para a sua utilização com sistemas solares, dada a possibilidade de funcionamento do gerador a baixa temperatura ^[49].

2.3.3.4. Sistemas de Arrefecimento Exsicante Evaporativo

O conceito de arrefecimento exsicante foi introduzido, em 1935, por Helmuth Hausen. Este utilizava exsiccantes sólidos que eram regenerados, periodicamente, para desumidificar o ar ^[55]. No entanto, a roda exsicante foi inventada em 1933 por Ernest Miller e Bayard Fonda ^[56].

Os sistemas de arrefecimento exsiccantes são sistemas de ciclo aberto, em que o refrigerante está em contacto direto com o ar ambiente, o que torna possível utilizar apenas água como refrigerante. O refrigerante é rejeitado do sistema, depois de produzir o efeito de arrefecimento, sendo substituído por uma nova quantidade ^[36]. O ciclo de arrefecimento funciona através de uma combinação de arrefecimento evaporativo, com uma desumidificação, utilizando um material exsicante. Este material é higroscópico, que tanto pode ser líquido como sólido, e é seleccionado com base na sua capacidade de reter grandes quantidades de água, na sua capacidade de ser reativado e no seu custo inerente ^[36].

Comparando com os sistemas exsiccantes que utilizam um material sólido, os sistemas com material líquido apresentam diversas vantagens, tais como uma maior taxa de desumidificação do ar para a mesma temperatura e a possibilidade de um grande nível de armazenamento de energia, sob a forma de uma solução concentrada ^[36].

Estes sistemas são uma ferramenta para controlar os níveis de humidade nos espaços a climatizar ^[36].

A tecnologia mais atual utiliza rodas exsiccantes rotativas, equipadas com sílica gel, ou com cloreto de lítio (LiCl) como material exsicante ^[36].

A figura seguinte apresenta um esquema de um sistema exsiccante ^[36]:

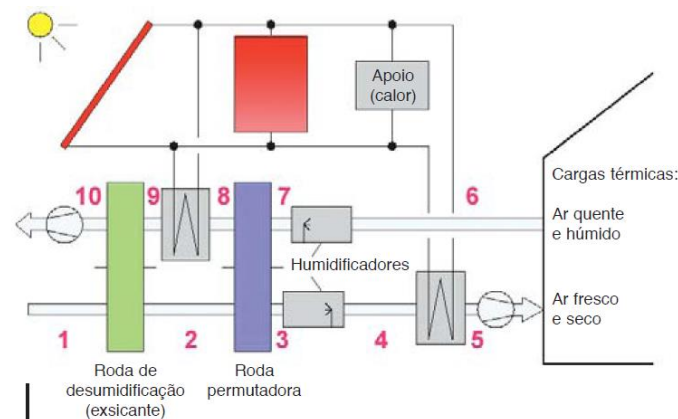


Figura 15: Esquema de um sistema exsiccante ^[36]

Modo de Arrefecimento ^[36]:

1-2: O ar ambiente do exterior é primeiro desumidificado adiabaticamente numa roda exsiccante, ficando sob a forma de ar quente e seco;

2-3: É então arrefecido (arrefecimento sensível) numa roda permutadora de calor pelo ar mais frio proveniente do interior do edifício, que circula em contracorrente. A humidade mantém-se;

3-5: Segue-se o processo de humificação, (arrefecimento evaporativo), que promove um maior arrefecimento do ar antes deste no espaço a climatizar. Neste processo ocorre um aumento da humidade;

5-6: A circulação de ar, no espaço a arrefecer, remove as cargas térmicas internas, calor sensível e calor latente, proveniente de computadores, pessoas, máquinas e ganhos solares/ambiente através de janelas, envidraçados, paredes, tetos, etc. Estas cargas e ganhos levam ao aquecimento do ar e também a um aumento da humidade do ar devido ao vapor de água produzido;

6-7: O ar é sugado para fora do edifício, e é arrefecido por humificação;

7-8: É depois aquecido na roda recuperadora;

8-9: É novamente aquecido por uma fonte de calor externa ligada ao sistema térmico solar;

9-10: O material exsiccante vai acumulando água até saturar tornando-se ineficiente. Pelo que o ar quente vai atravessar a roda exsiccante para promover a regeneração do elemento exsiccante removendo a água.

Modo de Aquecimento ^[36]:

2-3: O ar ambiente do exterior passa na roda permutadora e é aquecido com o ar proveniente do interior do edifício em contracorrente;

4-5: O ar proveniente do exterior é também aquecido no permutador de calor água-ar, que está acoplado ao sistema térmico solar. Se a temperatura do depósito solar for insuficiente a fonte de calor será então o apoio energético convencional;

5-6: O ar arrefece ao longo do seu percurso no interior do espaço a climatizar devido às perdas térmicas (paredes, janelas, etc.);

7-8: O ar arrefece também ao atravessar a roda recuperadora pré-aquecendo o ar proveniente do exterior.

O desumidificador (1-2) pode estar ativo funcionando como permutador de calor ou inativo o que diminui o consumo de eletricidade pois ao desumidificador poderá ser feito um “bypass”: serão as condições climáticas que determinarão o seu estado de funcionamento.

O humidificador (3-4) em geral está desativado podendo ser usado na humidificação do ar proveniente do exterior se necessário.

O humidificador de ar (6-7) e o permutador de calor (8-9) estão desativados.

Este sistema tem diversas vantagens tais como, o controlo mais preciso da temperatura e da humidade e a melhoria da qualidade do ar, o que leva a um aumento do conforto dos ocupantes dos locais climatizados ^[57].

2.4. Conforto Térmico

Em condições normais a temperatura do corpo humano é aproximadamente de $37 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$ ^[58]. De forma a manter as funções vitais, em condições ideais, o corpo procura manter a temperatura interior constante, graças a um equilíbrio entre a produção interna de calor devida ao metabolismo e à libertação de calor para o meio ambiente ^[59].

A transferência de calor do corpo humano para o exterior é efetuada por condução, convecção, radiação e através da respiração e transpiração ^[59].

De acordo com a norma internacional de conforto térmico (EN ISO 7730), que utiliza o trabalho de investigação de Fanger, existe conforto térmico sempre que há equilíbrio térmico e os mecanismos de termo regulação estão em atividade reduzida, e também quando não existem condições de desconforto local devido a fatores como, correntes de ar, assimetria radiativa, elevado gradiente de temperatura na vertical e também devido à temperatura do pavimento. Assim, a sensação de conforto térmico está associada a um estado de neutralidade térmica, o qual é induzido pelo balanço térmico das trocas de calor entre o corpo humano e o meio que o rodeia.

O conforto térmico nos edifícios é uma condição essencial a alcançar tendo em vista a nossa saúde. A nossa produtividade também é condicionada pelo conforto térmico. O desconforto é um indicador importante, porque é o primeiro sintoma que nos indica que as condições em que nos encontramos não são as mais adequadas, pelo que devemos atuar para criar condições mais confortáveis.

O conceito de conforto é bastante subjetivo e varia muito de pessoa para pessoa, podendo num determinado ambiente umas pessoas sentirem-se confortáveis, enquanto outras acham que está frio ou quente. Por isso a norma ISO 7730 determina que existe conforto térmico, desde que 10% da população não se sinta desconfortável.

Existem vários parâmetros com influência no conforto térmico tanto a nível individual como ambiental ^[60].

Parâmetros Individuais:

Incluem o tipo de atividade, ou seja, se este exige mais ou menos esforço. Inclui também um fator muito importante para o conforto térmico, que é o vestuário utilizado por cada pessoa, e se o isolamento do mesmo é adequado para a situação em questão. O tipo de metabolismo da pessoa também tem uma influência importante no conforto térmico ^{[59] [60]}.

Parâmetros Ambientais:

- **Temperatura do Ar:** De acordo com o RCCTE, a temperatura de conforto recomendada no Verão é de 25°C e no Inverno de 20°C . Segundo a American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Inc (ASHRAE) é de $22,8^{\circ}\text{C}$ a $26,1^{\circ}\text{C}$ no Verão e de $20,0^{\circ}\text{C}$ a $23,6^{\circ}\text{C}$ no Inverno.
- **Temperatura Média Radiante das Superfícies Vizinhas:** é a temperatura média à superfície dos elementos que envolvem um espaço. Influencia tanto o calor perdido através da radiação do corpo como a perda de calor por condução, quando o corpo está em contacto com superfícies mais frias ^[61].

- **Humidade Relativa:** Se a humidade relativa for muito alta vai provocar desconforto (transpiração excessiva, sentimentos de "proximidade", etc) e se for muito baixo, pode causar problemas respiratórios como sinusite ^[62].

Em termos de legislação o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) estabelece que a humidade relativa deve ser de 50% para a estação de arrefecimento ^[63]. Já segundo a ASHRAE, os valores ótimos estão entre 40 % e 60%, e na Norma 7730 estes podem estar entre 30% e 70%.

A Norma 7730 diz que em ambientes moderados a humidade do ar tem apenas um modesto impacto na sensação de calor. Tipicamente, um aumento da humidade relativa em 10% é considerado equivalente a ter havido um aumento de 0,3 °C na temperatura operativa. Para temperaturas e atividades mais elevadas, a influência é maior.

- **Velocidade do Ar:** Segundo o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) a velocidade do ar interior não deve exceder os 0,2 m/s ^[64]. A utilização da ventilação para promover um maior conforto térmico é adequada para o Verão. Podendo ser aproveitada através do aumento da velocidade do ar, o que resulta num aumento das perdas de calor por convecção pelo corpo humano e aumentam a taxa de evaporação ao nível da pele. Também pode ser utilizada para arrefecimento do edifício durante a noite, também chamado de ventilação noturna aproveitando a massa estrutural arrefecida durante o dia de forma a diminuir a temperatura interior ^[65].

Segundo o RCCTE a taxa de referência para a renovação do ar, para garantia da qualidade do ar interior, é de 0,6 renovações por hora (RPH).

3. Trabalho Relacionado

A climatização com apoio solar tem dado origem a vários projetos de apoio a este tipo de tecnologia, bem como a diversas publicações nesta área.

Neste capítulo procura-se fazer uma pesquisa bibliográfica relacionada com o tema e objetivos do trabalho.

Vários países, incluindo Portugal, estão envolvidos no desenvolvimento de tecnologias de climatização com apoio solar, no âmbito dos projetos SOLAIR e *Task 38*.

A *Task 38* do Programa *Solar Heating and Cooling* (SHC), da Agência Internacional da Energia (AIE), tem como objetivo estudar sistemas de climatização assistidos por energia solar e contribuir para melhorar as condições para a introdução no mercado destes sistemas. Segundo a SHC a refrigeração solar assistida é mais promissora para grandes edifícios com sistemas centrais de ar condicionado. No entanto, a crescente procura de ar condicionado nas casas e prédios de escritórios de pequena dimensão é também importante para o desenvolvimento desta tecnologia ^[66].

O SOLAIR foi um projeto financiado pelo Programa Europeu *Intelligent Energy Europe*. O objetivo deste projeto era promover e aumentar a penetração no mercado de sistemas de ar condicionado, alimentados por energia solar, para pequenas e médias aplicações em edifícios residenciais e comerciais. Este projeto procurou superar os obstáculos de mercado, como a falta de sensibilização, de conhecimentos e de uma informação coerente, através da realização de estudos de mercado, de desenvolvimento de capacidades e de promoção ^[49].

Em 2010 estavam documentadas, na Europa, perto de 280 instalações de climatização que utilizam apoio solar, 14 na Ásia, 12 na América, 3 na Austrália e 3 em África (*Task 38*). Em instalações de larga escala, 74% utilizam sistemas de absorção, 12% de adsorção e 14% de sistemas DEC (11% utilizam exsicante sólido). Em instalações de pequena escala, 89% são de absorção, 10% de adsorção e 1% sistema DEC (com exsicante líquido) ^[66].

Em 2010, a distribuição dos sistemas existentes na Europa era a seguinte:

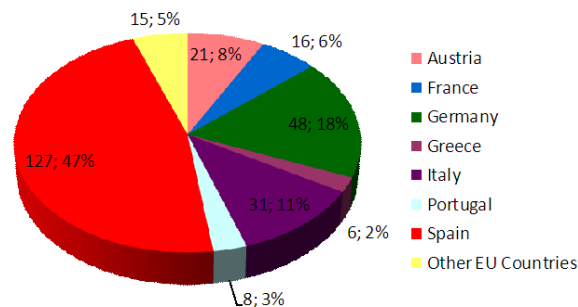


Figura 16: Distribuição dos sistemas existentes na Europa em 2010 ^[66]

As aplicações típicas podem incluir, por exemplo, edifícios de escritórios, hotéis, escolas e indústria ^[66].

Existe também o projeto MEDISCO. Esta iniciativa da Comissão Europeia (CE) financiou, desenvolveu e testou um sistema de refrigeração apoiado por energia solar para a indústria agroalimentar na região do Mediterrâneo ^[67].

Um dos países abrangidos foi Marrocos, onde foi desenvolvido um projeto para uma fábrica de lacticínios em Marraquexe, onde o clima quente tem dado origem a que, em áreas rurais do país, onde não há recursos energéticos suficientes disponíveis para fazer funcionar equipamentos de refrigeração, muitas vezes, se estraguem, grandes quantidades de leite fresco que deixam de poder ser vendidos ao público ^[67]. Este sistema é composto por um *chiller* de água-amónia de efeito simples, um sistema de armazenamento de frio e coletores CPC. O *chiller* é arrefecido pelo ar, pelo que não existem problemas com consumo de água ^[67].

Tal como referido anteriormente existem diversos sistemas DEC no mundo, sendo que a roda exsicante é uma peça fundamental destes sistemas, tendo sido alvo de diversos estudos ao longo dos anos. O potencial de arrefecimento do sistema DEC é baseado no desempenho da roda exsicante, em que o exsicante, que tal como já foi referido, pode ser sólido ou líquido remove a humidade do ar exterior para aumentar o potencial do humidificador.

Num estudo do impacto de diversos fatores que tem influência na taxa de desumidificação, como a temperatura e a humidade exterior, bem como a temperatura e a humidade do ar de regeneração chegou-se aos seguintes resultados ^[68]:

Como seria de esperar a temperatura de regeneração tem o impacto mais significativo no impacto sobre o desempenho da roda, sendo que se aumentarmos a temperatura, a desumidificação aumenta também. Os outros fatores também são importantes visto que, se a temperatura exterior aumentar, a desumidificação vai diminuir. Em relação à taxa de humidade do ar exterior, se esta aumentar, aumenta também o desempenho da roda. Por fim, se houver um aumento da taxa de humidade do ar de regeneração, o desempenho da roda exsicante vai diminuir.

Este estudo mostrou claramente as limitações do sistema de arrefecimento exsicante em relação às condições exteriores e que o sistema é uma opção interessante para climas moderadamente quentes e moderadamente húmidos.

Em Itália, numa universidade em Palermo, existe um sistema DEC que está em pleno funcionamento desde Março de 2008, especialmente projetado para ser aplicado num clima húmido e que é composto de uma unidade exsicante de refrigeração para tratamentos primários, equipada com coletores solares (líquidos), um *chiller* e um teto radiante. O ar é desumidificado através de uma roda exsicante que é regenerada pelo calor proveniente dos coletores solares bem como pelo calor rejeitado do *chiller*. Se os valores da temperatura e de humidade não forem os desejados, pode-se obter uma temperatura mais baixa, bem como uma nova desumidificação do ar através de duas serpentinas de arrefecimento. Segundo os dados obtidos conseguiu-se, já, atingir poupanças significativas de energia ^[69].



Figura 17: UTA e painéis solares instalados na universidade em Palermo ^[70]

Na Universidade Americana da Arménia (AUA) em Yerevan foi desenvolvido o projeto DESODEC (Desenho e Instalação de um Sistema de Demonstração para Arrefecimento Ambiente com Tecnologia DEC Assistida por Energia Solar), financiado pela UE e coordenado pelo LNEG. O projeto teve como principal objetivo a demonstração da viabilidade de climatização de edifícios utilizando uma fonte de energia alternativa e amiga do ambiente, como a energia solar, nas condições económicas e climáticas da Arménia. É um sistema bastante semelhante ao instalado no LNEG, que inclui um campo de coletores solares planos para captação da energia solar que é armazenada e depois distribuída para fornecer ar condicionado a um Auditório da Universidade utilizado regularmente para aulas, bem como para a realização de seminários e conferências abertas ao público. O sistema também pode fornecer AQS à cantina sempre que a máquina DEC não esteja a requerer essa energia, uma vez que a prioridade é dada ao sistema de climatização.

Segundo os dados respeitantes aos primeiros meses de operação, o sistema funcionou bem, sendo mesmo o único sistema existente para fazer o acondicionamento ambiente do Auditório ^[71].



Figura 18: Painéis solares instalados na universidade Americana da Arménia ^[71]

Em Espanha, a Biblioteca *Pompeu Fabra*, localizada em *Mataro*, utiliza tecnologia de ciclo aberto, que recorre a tecnologia DEC com material exsicante sólido de sílica gel. Este sistema, que está em funcionamento desde Julho de 2002, integra módulos fotovoltaicos para produzir eletricidade e coletores solares térmicos a ar, não tem armazenamento de calor e uma capacidade de arrefecimento de 81 kW para uma área a climatizar de 471 m² ^[49].

Na Alemanha, o Centro de Informação Solar em *Friburg* utiliza tecnologia de ciclo aberto, recorrendo à tecnologia DEC, utilizando cloreto de lítio como exsicante líquido. Este sistema que está em funcionamento desde 2004 e integra coletores solares térmicos planos para arrefecimento dos gabinetes e das salas de aulas, tem uma capacidade de arrefecimento de 10 kW, um depósito de acumulação de calor de 1500 litros e climatiza gabinetes e uma sala de conferências que totalizam uma área de 300 m² ^[49].



Figura 19: UTA no Centro de Informação Solar em Friburg ^[49]

Quanto ao sistema DEC do LNEG, este já foi objeto de artigos ^[72] ^[73] ao longo dos anos, que foram apresentados em diversos congressos pelo mundo, de modo a apresentar este sistema de carácter experimental fazendo uma descrição da UTA, bem como das alterações que têm vindo a ser feitas e dos resultados obtidos.

Nestes artigos refere-se que, desde o início de funcionamento, o sistema tem tido resultados satisfatórios no que diz respeito à climatização dos gabinetes, quer em termos de aquecimento, quer em termos de arrefecimento, embora, no início tivessem ocorrido problemas com os primeiros coletores instalados, que eram protótipos e que foram depois substituídos pelos atuais CPC. O *software* foi substituído em 2002, sendo ainda este que é atualmente utilizado.

Em ^[72] detetou-se que a utilização alargada da bomba de calor reduzia a fração solar. Outro problema detetado, inerente à utilização da bomba, decorreu do facto do condensador da bomba de calor estar situado antes do permutador água-ar de Verão. Esta localização permite que o calor resultante da condensação seja aproveitado para regenerar a roda exsicante. No entanto, foi analisado num artigo ^[72], que a temperatura necessária no ar de exaustão para desumidificar a roda exsicante era inferior à temperatura do ar após a sua passagem pelo condensador da bomba de calor o que tornava inútil a contribuição solar. Em consequência a energia no depósito não era libertada e este aumentava a sua temperatura com repercussões ao nível da temperatura de funcionamento do sistema solar, do que decorria, mais uma vez, a redução da fração solar. Concluiu-se, então, que seria necessário alterar o sistema de modo a que a bomba de calor funcionasse apenas nas situações mais extremas de carga térmica a remover, permitindo que o funcionamento exsicante/evaporativo promovesse o

arrefecimento do ar de forma mais sistemática. Para resolver estes problemas chegou-se à conclusão que seria necessário a introdução de um humidificador na secção de entrada que foi instalado no ano de 2008 ^{[72] [73]}.

No capítulo seguinte é elaborada uma descrição mais detalhada da UTA com todos os componentes que a constituem.

Este sistema também já foi tema de outras dissertações de mestrado ao longo destes anos de funcionamento. Por exemplo, em 2010 foi elaborada a dissertação “Monitorização e caracterização de uma UTA com tecnologia exsicante- evaporativa assistida por energia solar de acordo com a metodologia definida no âmbito da AIE SHC Task 38” pelo engenheiro André Pereira, que fez a análise do sistema de Janeiro a Julho de 2010 e que concluiu que o desempenho global do sistema foi bastante positivo, tendo uma boa resposta nos modos de aquecimento e arrefecimento, que o grau de satisfação dos utilizadores é bom e o sistema demonstra capacidade para manter o conforto térmico dos espaços a climatizar de acordo com as normas e regulamentos em vigor ^[74].

Também aí se refere que, com a introdução do humidificador na entrada da conduta de admissão de ar, conseguiu-se uma componente extra de arrefecimento, o que permitiu reduzir a utilização da bomba de calor e controlar melhor a temperatura dos gabinetes. Esta dissertação menciona ainda o facto de alguns dos coletores estarem mais fragilizados estruturalmente ^[74].

A dissertação mais recente foi elaborada em 2011 pelo engenheiro Tiago Correia com o nome “Estudo de Funcionamento de um Sistema de Arrefecimento Exsicante-Evaporativo assistido por Energia Solar”. Esta teve como objetivos proceder a alterações de *hardware*, bem como de software com o intuito de simplificar e melhorar o processo de funcionamento do sistema e de melhorar a interpretação e análise do mesmo ^[75].

As alterações efetuadas ao nível do *hardware* basearam-se na introdução de um piranómetro na fachada do edifício, com o intuito de analisar de forma mais detalhada os ganhos solares apresentados, e na substituição da bomba de água acoplada ao humidificador da conduta de admissão de ar.

Ao nível de *software* foram efetuadas alterações do código de programação do sistema, tendo por base a alteração do horário de funcionamento do sistema, como também alterações ao nível do controlo da ventilação, modos de operação e a introdução do método de climatização “*free cooling*”.

Inicialmente a UTA tinha os seguintes modos de funcionamento:

Modo -2: Aquecimento ativo

Modo -1: Recuperação de calor

Modo 0: Ventilação Livre

Modo 1: Arrefecimento evaporativo

Modo 2: Arrefecimento exsicante

Devido à presença do humidificador na secção de entrada foi efetuada uma alteração no âmbito dessa dissertação que consistiu em adicionar um novo modo (modo 3) em que o arrefecimento exsicante evaporativo tem apoio da bomba de calor, o que permite a existência de um modo (modo 2) que dá prioridade ao arrefecimento exsicante.

Ao nível da ventilação foi efetuada uma alteração que resultou do facto do sistema ter uma determinada condição que fazia com que os ventiladores apenas aumentassem de velocidade caso a temperatura de insuflação pretendida fosse atingida mas a temperatura do interior dos gabinetes continuava a não ser a temperatura de conforto pretendida, do que decorria que enquanto a temperatura de entrada nas salas não atingisse o valor desejado, os ventiladores funcionavam à velocidade estabelecida até então. Esta condição não permitia retirar o máximo de proveito do processo de arrefecimento exsicante evaporativo, uma vez que, na maioria das vezes os ventiladores atingiam o modo de funcionamento 2 a operarem a uma potência baixa, o que não permitia atingir

temperaturas de insuflação muito baixas. Deste modo, existe uma condição que foi adicionada à já existente que obriga os ventiladores a aumentarem mais rapidamente a sua velocidade, quando a temperatura de insuflação calculada é igual ao valor mínimo (18°C) ou ao máximo estabelecido (30°C), permitindo assim aproveitar da potencialidade máxima do arrefecimento exsicante evaporativo.

O método de climatização “*free cooling*” foi implementado para promover a ventilação noturna dos gabinetes associada ao arrefecimento evaporativo com vista a reduzir a temperatura dos mesmos. Para tal, efetuou-se a ativação do modo de funcionamento 0, também para o período da noite, ocorrendo o funcionamento conjunto dos ventiladores com o humidificador da conduta de admissão de ar.

Também foram feitas alterações no funcionamento da roda exsicante, que resultaram do facto de a mesma, em certas situações e ao contrário daquilo que está programado, arrefecer e humidificar o ar de entrada na UTA, problema que já foi corrigido.

É importante referir que nesta dissertação é mencionado que por vezes, ao longo dos anos, as salas não atingiram a temperatura pretendida apesar de estar tudo a funcionar corretamente. Tal facto é devido à constatação, de as salas terem as portas abertas e por vezes também as janelas o que impede uma climatização correta.

No capítulo seguinte é abordado, com mais detalhe, o funcionamento da UTA já com estas alterações implementadas.

É também importante mencionar a dissertação do engenheiro André Reis, de 2012 “Aplicação de um sistema solar térmico a uma unidade de climatização em Portugal”, que concluiu, no estudo que fez sobre os coletores utilizados na UTA, que estes tiveram uma quebra de produção de cerca de 30% ^[76].

Esta dissertação é de todo o interesse visto proceder ao seguimento do acompanhamento da monitorização que tem vindo a ser feita ao longo dos anos o que, dado o carácter experimental do sistema em estudo, é de grande importância que seja realizado.

4. Caso de Estudo

A unidade de tratamento de ar assistida por energia solar com sistema de arrefecimento excicante-evaporativo foi instalada no edificio G do LNEG em 1999, onde se localizam parte das instalações do Departamento de Energias Renováveis, com o intuito de promover a climatização dos 11 gabinetes de trabalho, situados no R/C do edificio ^[73].

Em termos de utilização, o edificio tem desde gabinetes de escritório, a laboratórios e apresenta uma inércia térmica elevada. O pé direito médio é de 3 m, e a área a ser climatizada é 182 m². A área envidraçada tem orientação W (oeste) – SW (sudoeste) e representa cerca de 70% da área de contacto para o exterior. No Verão há uma incidência direta dos raios solares a partir de meio da tarde. No Inverno, a incidência é bastante mais reduzida visto que a altura do sol é menor ^[73].



Figura 20: Edifício G: Instalações do Departamento de Energias Renováveis

O dimensionamento e desenho da UTA, bem como o do sistema de distribuição de ar tiveram algumas limitações devido ao facto de o edificio ter sido inicialmente construído para outro fim e tendo tido de sofrer algumas alterações devido ao novo tipo de ocupação. Estas limitações fizeram com que o espaço ocupado pela UTA fosse limitado ao espaço disponível na sala técnica, e também com que existissem condicionamentos no desenho da rede de condutas de ar, devido à sua instalação não estar contemplada na construção inicial do edificio ^[73].

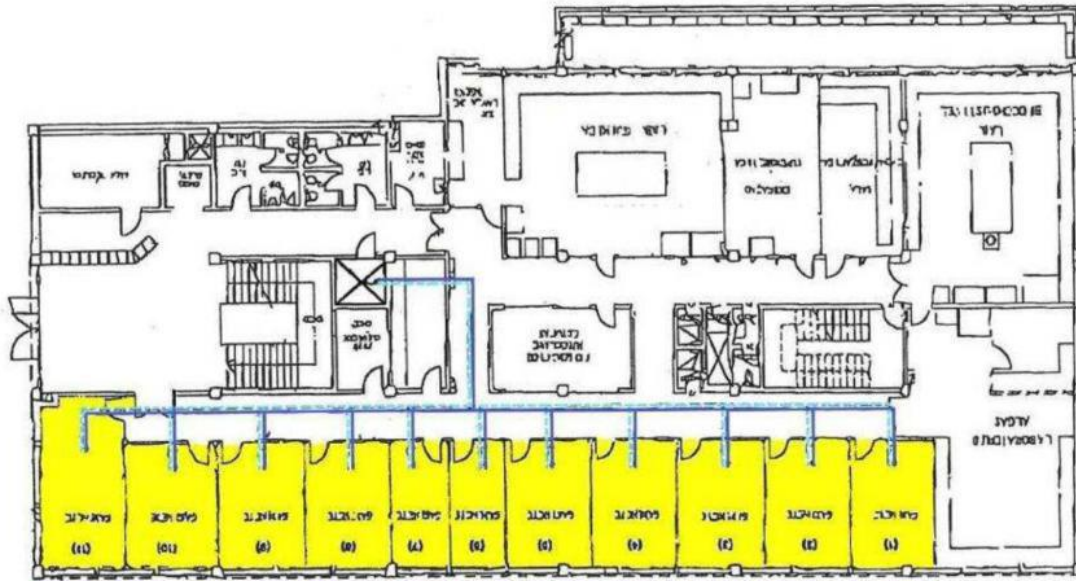


Figura 21: Planta do Edifício G. A zona colorida a amarelo representa os 11 gabinetes a climatizar e as linhas azuis a rede de condutas de ar [75]

A configuração inicial desta UTA possuía assim alguns detalhes que a diferenciam de outras que foram instaladas pelo mundo ao longo da última década [77]. Esse desenho foi o resultado das limitações já referidas, mas também foram tomadas decisões quanto a esse desenho, tendo em vista o estudo de diferentes soluções, para procurar a melhor configuração tendo também em conta o local em questão [73].

As principais inovações da configuração inicial da UTA consistiam em não instalar o humidificador da secção de entrada que as UTA's tradicionais deste tipo incorporam e na introdução de uma bomba de calor como elemento de apoio ao processo de arrefecimento excicante- evaporativo nas alturas de Verão em que o sistema DEC não tinha capacidade de injetar ar a temperaturas mais baixas para cumprir os requisitos de conforto pretendidos. Sem a bomba de calor seria necessário aumentar o caudal de ar para conseguir remover os ganhos térmicos. Contudo, as dimensões das condutas de ar e da própria UTA não permitem que se atinjam os elevados caudais necessários. Deste modo, optou-se por esta solução, em que a bomba de calor permite obter baixas temperaturas de injeção de ar, funcionando apenas quando o arrefecimento evaporativo não for capaz de remover os ganhos térmicos [73].

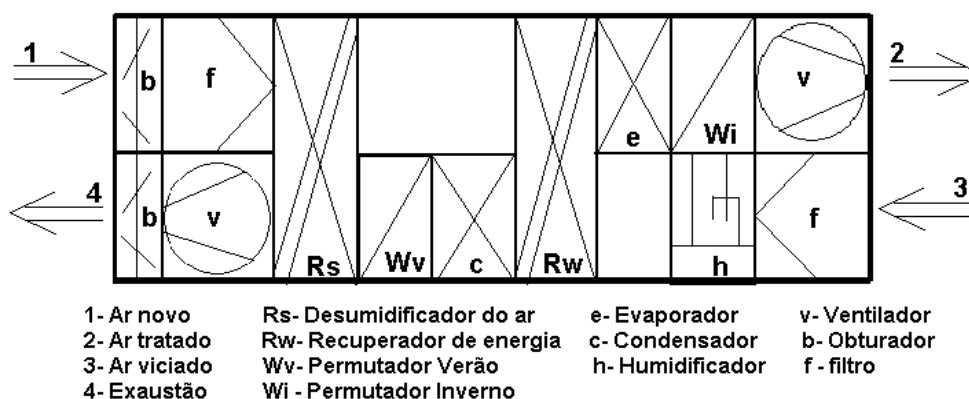


Figura 22: UTA/DEC instalada no DER do LNEG, na sua configuração inicial [73]

Em 2008, como já foi referido anteriormente, foi introduzido um humidificador na secção de admissão de ar da UTA, na sequência da constatação da baixa fração solar no Verão em consequência do funcionamento alargado da bomba de calor.

Características principais do sistema ^[73]:

- Dimensões globais da UTA: 1290 x 1315 x 7060 mm;
- Caudal de ar: 5000 m³/h (8 RPH);
- Potência dos Ventiladores: 2,2 kW_e;
- Potência da bomba de calor: 7,5 kW_e;
- Potência elétrica restante (roda exsicante, roda permutadora e bombas): 1,0 kW_e;
- Sistema de coletores solares do tipo CPC com 54 m² de área bruta;
- Depósito de armazenamento de água de 2000 L;
- Caldeira a gás de 23,25 kW de potência.

A unidade foi dimensionada para uma potência de arrefecimento de 28,6 kW. Para se atingir este arrefecimento é necessário fornecer à UTA uma potência térmica de 38,2 kW que é necessária à regeneração da roda exsicante. Esta potência contabiliza a soma das potências térmicas do condensador da bomba de calor e do permutador de calor. Este permutador é alimentado pelo sistema solar, pelo depósito e também pela caldeira auxiliar quando a disponibilidade de energia de origem solar não é suficiente. Para estes valores de potência encontra-se um COP de 0,75 para a UTA/DEC ^[73].



Figura 23: UTA instalada no LNEG

O sistema solar é constituído, mais detalhadamente, por um circuito primário e um secundário. O primário é constituído por 24 coletores do tipo CPC, sem vácuo, que funcionam em paralelos de 2 coletores em série, que aquecem a água, passando depois por um permutador de placas que cede energia ao circuito secundário. A instalação está equilibrada hidraulicamente através de retorno invertido. Os coletores têm uma área bruta de 2,24 m², o que equivale aproximadamente a 54 m² de área ocupada só pelos coletores e a 47 m² de área de abertura. A distância entre filas é de 2,10 m e os coletores têm uma inclinação de 30°, com orientação Sul ^[75].



Figura 24: Campo de coletores

A circulação de água no circuito primário é acionada por uma bomba e só se efetua se a radiação solar instantânea, medida ao nível dos coletores, for igual ou superior a 300W/m^2 , e enquanto a temperatura à saída dos coletores for superior à temperatura de entrada, o que permite também reduzir o consumo de eletricidade da bomba circuladora associada ao circuito primário, evitando que esta esteja ligada sem necessidade, como por exemplo em dias de chuva ou durante a noite ^[75].

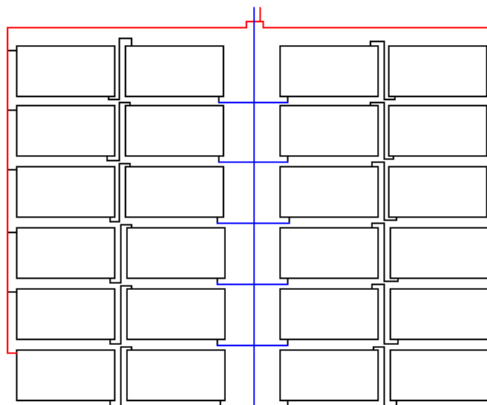


Figura 25: Configuração do campo de coletores, circuitos de água fria (azul), e quente (vermelho) ^[75]



Figura 26: Circuito de água fria

No circuito secundário a energia captada é transferida diretamente à UTA ou então ao depósito com capacidade de 2000 L que a armazena, sendo que a energia armazenada pode ser utilizada conforme as necessidades do sistema. Contudo, a água quente é armazenada no depósito somente quando as seguintes condições são cumpridas:

- A temperatura à saída dos coletores ($T_{SC_collector}$) for superior à temperatura de entrada nos mesmos (T_{SC_pump}) em 3°C ($T_{SC_collector} > (T_{SC_pump} + dt_{collector})$).
- A temperatura à saída dos coletores for superior à temperatura na parte inferior do depósito ($T_{storage_bottom}$) em 10°C ($T_{SC_collector} > (T_{storage_bottom} + dt_{storage})$).
- A temperatura de entrada no permutador (T_{SC_valve}) for superior à temperatura na parte inferior do depósito em 10°C ($T_{SC_valve} > (T_{storage_bottom} + dt_{storage})$). Esta última é que, se as outras se verificarem, vai permitir recolher energia no depósito ou não.

O depósito é um cilindro disposto na vertical, existindo estratificação da água dentro do mesmo em função da temperatura. Quando a UTA necessita de água quente e esta é fornecida pelo depósito dá-se prioridade à água proveniente da zona inferior, onde esta se encontra mais fria, e só em situações em que seja necessário uma temperatura ainda mais elevada, é que se recorre à zona superior.

O circuito secundário incorpora, ainda, outro permutador de placas onde a caldeira a gás fornece o apoio energético quando a temperatura da água não é suficientemente elevada para satisfazer as necessidades do sistema. A utilização da água armazenada no depósito permite reduzir o consumo de gás na caldeira.

O sistema solar tem como vantagem o facto de funcionar de forma independente do controlo da UTA, entregando energia no depósito mesmo quando a UTA não necessita de calor, o que permite um maior aproveitamento do recurso solar disponível.

4.1. Descrição dos componentes do sistema

A figura seguinte ajuda a mostrar a localização dos componentes descritos neste ponto, sendo que a parte esquerda da figura faz uma representação esquemática do sistema solar, onde se pode observar o

campo de coletores, o permutador de calor externo, o depósito de armazenamento de água quente, bem como a caldeira.

Na parte direita está representada a UTA com a roda excicante a verde, a roda permutadora de calor a azul e vermelho, o evaporador (EV) e o condensador (CD) da bomba de calor a azul e a vermelho respetivamente. Os humidificadores encontram-se na secção de admissão e de saída e estão representados a azul-escuro. Também na secção de admissão e de saída situam-se os filtros representados a branco, bem como os ventiladores de insuflação e extração representados por um círculo de cor branca com uma seta preta.

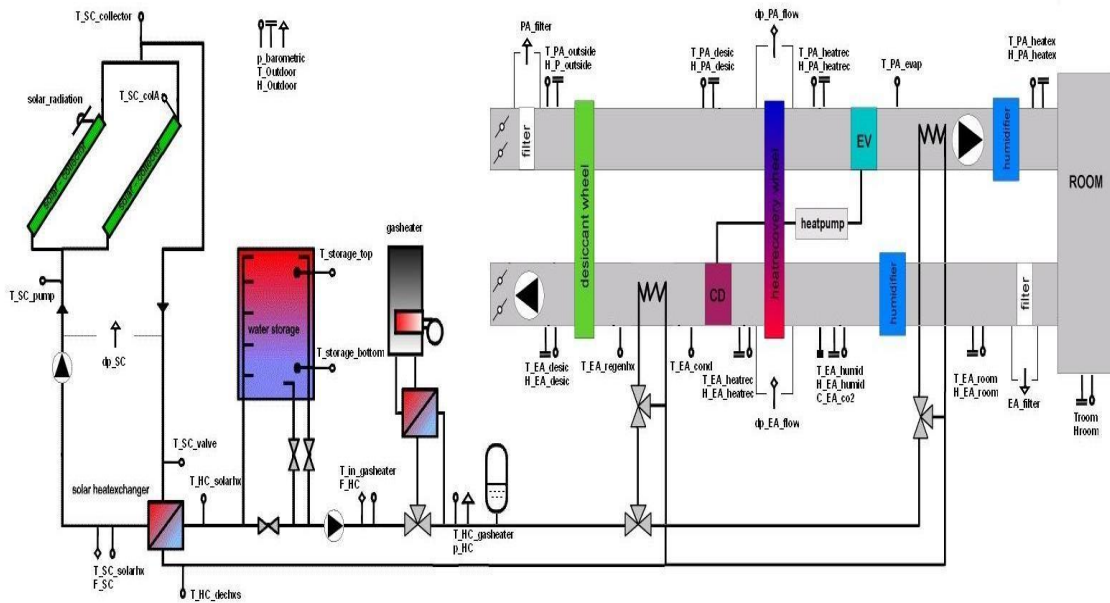


Figura 27: Diagrama geral do Sistema UTA/DEC com os parâmetros monitorizados pelo sistema de controlo ^[78]

Filtros de Ar

Existem filtros de ar sintéticos do tipo *multi bag* (com um aspeto semelhante a um saco) na UTA, um na secção de entrada e outro na secção de saída da conduta. A sua principal função é remover as impurezas presentes na atmosfera, retendo as partículas, E proporcionando assim uma melhor qualidade do ar. As bolsas são autossustentáveis impedindo a separação de partículas por vibração ou pelo ligar/desligar do sistema.



Figura 28: Filtros de Ar ^[75]

Roda Exsicante

A roda exsicante com o rotor SECO 1500 da marca *Klingenburg* é o principal componente da UTA, podendo funcionar como desumidificador ou permutador de entalpia (embora no nosso caso isto não se aplique).

O material exsicante usado é o cloreto de lítio e está impregnado numa estrutura de suporte que é composta de celulose, sendo parecida com um favo de mel, aberto em ambas as extremidades.

O ar de entrada passa através da roda e é desumidificado pelo exsicante, saindo dela mais seco, mas mais quente do que quando entrou na roda, enquanto o fluxo de ar em contracorrente, também chamado de ar de regeneração, previamente aquecido passa pela roda, conduzindo à secagem do exsicante.

A rotação da roda permite um valor mínimo de 20 rotações por hora (rph) no processo de regeneração. A velocidade de rotação ao ser mais lenta permite absorver mais humidade e também minimizar a quantidade de calor que passa do ar de reativação para o ar de entrada.



Figura 29: Roda Exsicante ^[75]

Roda Permutadora de Calor

Para que exista uma troca de energia térmica entre o ar de entrada e o de saída, utiliza-se uma roda permutadora, cuja matriz é constituída por lâminas de alumínio.

No Verão é utilizado o ar de retorno para arrefecer o ar de insuflação, visto que este está mais quente do que o ar de exaustão e no Inverno o processo inverso, tendo em conta que o ar de exaustão é mais quente do que o de admissão.



Figura 30: Roda permutadora de calor ^[75]

Permutadores de Calor (Água-Ar)

Na conduta de admissão existe um permutador situado antes do humidificador que serve para aquecer o ar de entrada no inverno. Na conduta de exaustão existe um permutador situado antes da roda exsicante que serve para aquecer o ar de regeneração da roda.

O ar é aquecido através da permuta de calor proveniente da água que é aquecida pelos coletores. Ou que provenha do depósito de acumulação. Em ambos os casos pode ser necessário recorrer ao apoio da caldeira.

Bomba de Calor

A bomba de calor é um sistema de refrigeração convencional por compressão. Nesta aplicação o processo de funcionamento é irreversível sendo utilizada apenas para arrefecimento. O circuito compõe-se basicamente por, um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador. A bomba é da marca *DORIN*, modelo K500 CS tem uma potência de 7,5 kW, utiliza o fluido refrigerante R134a e tem um COP de 2.

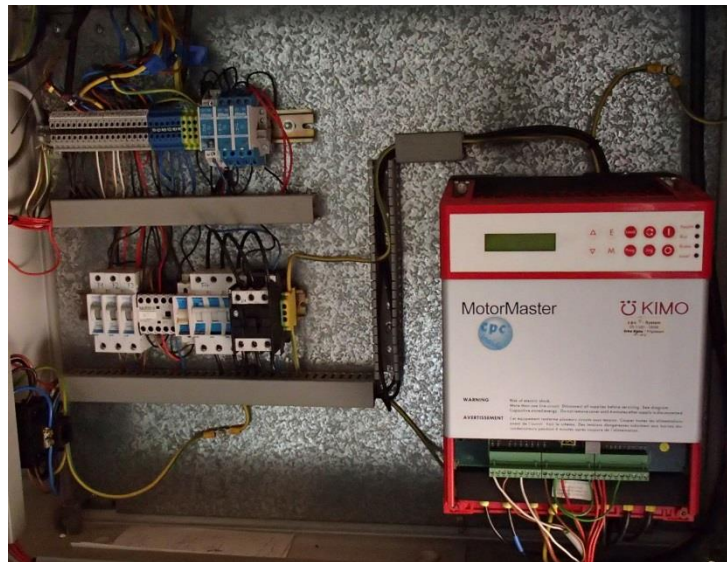


Figura 31: Sistema de controlo da bomba de calor

Ventiladores (Insuflação e Extração)

A circulação do ar na UTA é feita com a utilização de dois ventiladores, cada um com uma potência de 1,1 kW. O ar é insuflado por um ventilador na conduta de insuflação e é extraído por um ventilador na conduta de extração.

Os ventiladores têm como objetivos principais a renovação do ar nos gabinetes e a remoção de elementos existentes no ar interior tais como poeiras, gases, fumos e odores.

O caudal de ar que entra no espaço a climatizar é superior ao caudal de ar de exaustão, de modo a criar uma ligeira sobrepressão que ajuda a reduzir a entrada de elementos como poeiras provenientes dos espaços exteriores. O ventilador tem uma eficiência na ordem dos 77% e é capaz de cumprir com o caudal nominal (5000 m³/h). O maior consumo de eletricidade deve-se aos ventiladores. Por isso estes estão a funcionar à velocidade mínima (40%) o maior tempo possível.



Figura 32: Ventilador ^[75]

Humidificador e Bomba de Água

Para reduzir a temperatura do ar, recorre-se a humidificadores quer na conduta de insuflação, quer na conduta de extração. Um humidificador é um componente constituído por um material poroso no qual se injeta água, através de bombas de água. A água evapora e conseqüentemente diminui a temperatura do ar. O humidificador também serve para controlar a humidade no interior dos espaços a climatizar.

As bombas de água usadas são tipo submersível da *Sterwins* VC 350 ECL (conduta de admissão) e da *Grundfos* KP 150 (conduta de exaustão), que funcionam numa gama de temperaturas de líquido de 0°C até 35°C e cuja eficiência do humidificador é de 85% (dados do fabricante).

Coletores

Estes coletores são conhecidos como concentradores do tipo CPC devido à configuração da superfície refletora em forma de parábola e cujas características já foram referidas no Capítulo 2.2.1.3. Coletor Concentrador Parabólico Composto (CPC)).

Dados Técnicos do CPC:

- Área do Absorção: 1,97 m²
- Rendimento Ótico: 0,71
- Temperatura de Estagnação: 151°C
- Pressão de Funcionamento: 6 bar
- Área total de Captação: 47,3 m²
- Coeficiente global de Perdas: 3,8 W/°C.m²

Depósito de Armazenamento de Energia

Para armazenar a energia térmica gerada para poder ser utilizada quando a radiação proveniente dos coletores solares não é suficiente para alimentar o sistema, utiliza-se um depósito de acumulação de energia nos períodos onde existe uma grande disponibilidade do recurso solar, com uma capacidade de 2000 litros. Tal como já foi referido anteriormente o depósito tem estratificação da água dentro do mesmo em função da temperatura, o que faz com que quando se acumula energia a água vai entrar no depósito consoante a temperatura a que estiver (quanto mais quente mais elevada a posição). O facto de ser vertical favorece a estratificação. A água fria deve entrar a baixa velocidade para impedir o máximo possível que se misture com a água quente já acumulada.

O facto de ser um depósito com estratificação permite maior eficiência e rendimento do sistema, visto que permite que quando se necessita de água quente a temperaturas mais baixas retira-se água do fundo do depósito e quando se necessita de temperaturas mais elevadas retira-se do topo do depósito.



Figura 33: Depósito de Armazenamento de Energia

Permutadores Externos

Existe um permutador junto ao depósito que está no exterior e que separa o circuito primário do secundário e outro no interior da sala técnica junto à caldeira. Este equipamento funciona de um modo simples e tem uma eficiência $> 90\%$, o que é essencial, de modo a não prejudicar o rendimento da instalação, pois a eficácia do permutador deve ser tanto maior quanto possível para que o fluido térmico regresse aos coletores com uma temperatura baixa.

Os fluxos dos dois líquidos cruzam-se um com o outro em contracorrente, o que permite o elevado grau de eficiência. Os permutadores externos são isolados com coberturas isoladoras de calor pré-fabricadas. Os dois permutadores são da marca *Arsopi*, têm uma pressão máxima de trabalho de 25 bar, temperatura máxima de funcionamento de 180°C , coeficiente de transferência de calor entre os $4652\text{-}8141 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e um caudal máximo de $5000 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 34: Permutador no interior da sala técnica junto à caldeira

Vaso de Expansão

O vaso de expansão é um reservatório de metal fechado. No meio existe uma membrana flexível que separa dois meios: o nitrogénio ou azoto que está a uma pressão pré-estabelecida e o fluido de transferência térmica que entra no vaso de expansão quando aquecido.

O vaso é necessário porque o fluido aumenta de volume quando é aquecido. E como o circuito solar é fechado, o vaso de expansão permite compensar essa dilatação, absorvendo a dilatação do fluido e impedindo assim que a válvula de segurança descarregue. O tamanho do recipiente de expansão deve ser suficiente para a quantidade de fluido no circuito solar. O vaso de expansão é da marca *Caleffi* e tem uma capacidade de 150 litros.



Figura 35: Vaso de Expansão

Caldeira

A caldeira da marca ROCA funciona a gás natural, tem uma potência útil de cerca de 23,25 kW e tem uma eficiência perto dos 90% (dados do fabricante), sendo utilizada apenas como apoio para aumentar a temperatura da água no período de Inverno para aquecer o ar de entrada e no Verão para a regeneração da roda exsicante. O modelo da caldeira é o R-20.

No início a caldeira inicialmente encontrava-se no exterior do edifício, contudo visto poder-se degradar mais rapidamente devido por exemplo, à chuva e ao vento, foi decidido colocá-la no interior da sala técnica. Foi então necessário incorporar uma chaminé para libertar para o exterior os gases produzidos. No entanto, a conduta de entrada de ar na UTA encontra-se dentro da sala, sendo o ar sugado proveniente de todas as entradas de ar para a sala. Isto fez com que, os gases produzidos pela caldeira não fossem expelidos pela chaminé, o que levava a que a caldeira se desligasse imediatamente, após a sua ativação. Para resolver este problema foi instalado um ventilador de baixa potência na chaminé, que é ativado apenas quando a caldeira é ligada.



Figura 36: Caldeira

Purgador de Ar

Os purgadores servem para retirar o ar de dentro do circuito solar e devem ser instalados nos pontos mais altos do circuito pois o ar tem tendência a subir e acumular-se nesses mesmos pontos mais altos.



Figura 37: Purgador de Ar

Bombas

A circulação do fluido térmico no circuito primário e secundário realiza-se com a ajuda de duas bombas circuladoras (da marca *Grundfos*, do tipo UPS 25-50), acionadas por um motor elétrico.

É de referir que em termos de tubagens estas são de cobre, visto que este resiste à corrosão e a sua maleabilidade e ductilidade permitem uma maior facilidade para realizar traçados complexos. Em termos de isolamento todas as tubagens estão protegidas com isolamento *Armaflex*. O sistema contempla ainda diversos tipos de válvulas, tais como, válvulas de segurança, de retenção, de corte e regulação ou de passagem, antirretorno, redutora de pressão e de três vias.

O custo de replicar a instalação de uma unidade destas é de 30 000€^[79].

4.2. Descrição do Sistema de Monitorização e Controlo

O sistema UTA/DEC possui uma série de instrumentos utilizados para monitorizar e analisar de forma permanente os processos, tais como, termómetros e manómetros para monitorizar a temperatura e a pressão do sistema respetivamente, higrómetros para medir a humidade, medidores de caudal e aparelhos de medição de energia. Existem também outros equipamentos de medição tais como, dois

piranómetros que servem para medir a irradiação solar global, sendo que o primeiro encontra-se no mesmo plano dos coletores e o segundo, na fachada do edifício do DER ao nível dos gabinetes a climatizar, com o objetivo de medir os ganhos solares que atingem as salas. O sistema tem também um quadro elétrico associado.



Figura 38: Piranómetro e higrómetro



Figura 39: Sonda de temperatura

Os dados obtidos são armazenados de forma a poderem ser tratados posteriormente. O sistema através do *software* “Agilent VEE Pro”, permite a visualização em tempo real da evolução do estado do ar na UTA, bem como do estado de funcionamento dos equipamentos e do sistema solar.

A figura apresentada no ponto 4.1. representa o ecrã de interface onde se encontram todos os equipamentos, bem como vários parâmetros que estão permanentemente a ser monitorizados pelo sistema de controlo.

A linguagem de programação utilizada é o C++, que é responsável por todo o funcionamento do sistema DEC, enviando todas as indicações que são necessárias ao sistema. O programa de controlo tem como principal função controlar a temperatura e humidade dos gabinetes em função da temperatura ambiente. E tem como prioridade o consumo mínimo de energia, por isso a bomba de calor e os ventiladores devem funcionar sempre ao nível mais baixo possível, visto que são os responsáveis pelo maior consumo de eletricidade do sistema.

O programa de controlo divide-se em dois principais ciclos ^[80]:

- **Ciclo contínuo:** Este ciclo contém todos os ficheiros que estão sempre a trabalhar, como o controlo solar e o controlo de serviço.

O controlo solar tem de estar sempre a funcionar pois mesmo quando a máquina DEC não está a trabalhar (como nos fins de semana) utiliza-se a potência térmica solar disponível para armazenamento no depósito de acumulação.

O controlo de serviço tem a função de tomar a decisão da operação ou não da máquina DEC e também de verificar todos os processos de segurança, desde falhas que podem ocorrer em qualquer componente do sistema (serviço de alarmes) até ao sistema de proteção anti congelamento.

- **Ciclo de funcionamento:** Neste ciclo encontramos todos os ficheiros que são necessários para o controlo do sistema, enquanto a máquina está em funcionamento.

Aqui localiza-se o ficheiro que efetua todos os cálculos necessários para o controlo do sistema, o ficheiro que efetua o controlo do sistema DEC, bem como o ficheiro necessário para o controlo do ciclo de aquecimento.

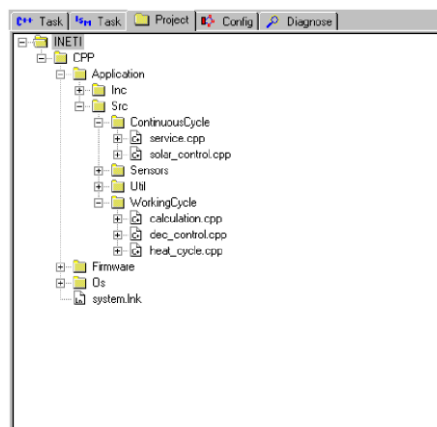


Figura 40: Diagrama em árvore do arquivo de controlo C++ ^[80]

O sistema calcula as temperaturas ótimas de conforto dentro dos gabinetes em função da temperatura exterior através da seguinte fórmula:

$$T_{room_set} = 17,6 + (T_{out} \times 0,2)$$

Esta temperatura está limitada contudo pelos valores mínimos e máximo em relação à temperatura admitida para as salas (T_{room}), que são, respetivamente, 20 e 26°C. Caso contrário, poderiam ocorrer valores fora das situações de conforto.

De seguida, é definida uma temperatura de insuflação do ar ideal ($T_{PA_Heatex_set}$) para atingir a temperatura desejada na sala. Esta temperatura depende da temperatura exterior e também da temperatura de conforto calculada anteriormente, sendo expressa da seguinte maneira:

$$\text{Se } T_{out} > T_{room_set}: T_{PA_Heatex_set} = T_{room_set} - 6^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Se } T_{out} < T_{room_set}: T_{PA_Heatex_set} = 24^{\circ}\text{C}$$

Esta condição é aplicada somente no início do processo e encontra-se também ela limitada por valores mínimos e máximos estabelecidos, neste caso de 18°C e 30°C respetivamente.

Quando T_PA_Heatex_set for igual à do ar que está a ser injetado (T_PA_Heatex), o sistema está 4 minutos nestas condições, sendo então medida a temperatura na sala. Se esta continuar a não ser a desejada ($T_{room} \neq T_{room_set}$) então calcula-se uma nova temperatura de injeção do ar que se pretende atingir, ao mesmo tempo que se passa para um novo valor de caudal através do aumento de velocidade dos ventiladores (apenas e só nesta situação é que se verifica o aumento de velocidade dos ventiladores).

Para ser atingida a temperatura de injeção de ar pretendida e assim conseguir responder às necessidades de conforto, o controlo da UTA considera os seguintes seis modos diferentes de funcionamento:

Modo -2: Aquecimento ativo

Modo -1: Recuperação de calor

Modo 0: Ventilação Livre

Modo 1: Arrefecimento evaporativo

Modo 2: Arrefecimento exsiccante

Modo 3: Arrefecimento exsiccante com apoio

O **modo -2** é designado por aquecimento ativo e corresponde ao aquecimento do ar através da permuta de calor no permutador água-ar de Inverno (permutador da conduta de insuflação/admissão de ar). Tal como já foi referido a água quente pode vir dos coletores, do depósito, da caldeira ou um misto destas situações. Neste modo, a roda permutadora de calor pode operar à sua capacidade máxima (10 rotações por minuto (rpm)), permitindo um primeiro aquecimento do ar, através do ar de exaustão que é mais quente do que o ar de admissão. De notar, também, que a roda exsiccante poderia estar ativa, visto ter a capacidade de funcionar, também, como permutador de entalpia, porém esta aplicação não foi utilizada no nosso sistema. Neste modo, existe ainda uma rotina responsável pelo controlo da humidade relativa que não está ativa. Esta limita o valor mínimo da humidade relativa no interior das salas em 40%. Quando se atingem valores inferiores de humidade relativa, o humidificador é ativado de modo a permitir um aumento da mesma. Quando a humidade relativa ultrapassa os 40%, o humidificador é imediatamente desligado.

O **modo -1** é designado por recuperação de calor. Neste modo, o único componente ativo, para além dos ventiladores, é a roda permutadora de calor. Neste modo a roda permutadora de calor efetua a troca de calor entre o ar quente proveniente dos gabinetes e o ar mais frio proveniente do exterior. Este modo é normalmente utilizado em situações de pequenas variações de temperatura entre o exterior e o interior do edifício.

O **modo 0** designa-se por ventilação livre. Neste modo não se realizam trocas de calor entre nenhum componente da UTA, existindo apenas a renovação do ar nas salas. Apenas estão ligados os ventiladores, sendo que a ventilação é feita no mínimo da sua potência. No entanto na estação de Verão, entre os meses de Junho e Setembro este modo é utilizado para realizar também o arrefecimento do ar entre a meia-noite e as sete da manhã, através da aplicação do modo de “*free cooling*”. Neste processo o humidificador da conduta de entrada de ar é ativado para além dos ventiladores.

O **modo 1** é o arrefecimento evaporativo. Neste modo, o humidificador existente na conduta de admissão pode estar ativo ou não, o que vai depender das condições do ar de entrada, isto é, se o ar que percorre a conduta de entrada tiver uma temperatura elevada e uma humidade relativa baixa, então o humidificador é ligado, sendo assim responsável pelo arrefecimento do ar. No entanto se o ar de entrada tem uma humidade relativa considerável, o humidificador é desligado, de modo a que se possa cumprir os parâmetros de conforto térmico. Já o humidificador da conduta de extração encontra-se sempre ativo, com o objetivo de arrefecer o ar quente que sai das salas para efetuar uma troca de calor mais eficiente na roda permutadora de calor.

O **modo 2** é o arrefecimento excicante. Nesta situação, a roda excicante está ativa e a funcionar à sua velocidade máxima (20 rph – velocidade constante), removendo água do ar que entra para aumentar o potencial de arrefecimento evaporativo. Neste modo a roda permutadora de calor está a operar quase à velocidade máxima (10 rpm) e o humidificador de entrada está constantemente ligado, sendo apenas desativado em situações em que os valores da humidade relativa do ar de admissão sejam muito elevados. Neste modo o humidificador de saída da UTA também se encontra sempre ligado.

O **modo 3** designa-se por arrefecimento excicante com apoio. Este modo inclui a bomba de calor, que anteriormente estava no modo 2, a funcionar constantemente. Este modo é idêntico ao modo 2 pois contém em funcionamento todos os elementos da UTA aos quais foi adicionado a bomba de calor. Este modo aplica-se sempre que o modo 2 não consiga atingir as temperaturas de conforto pretendidas, sendo a bomba de calor utilizada como apoio ao arrefecimento excicante evaporativo.

A bomba de calor é o componente da UTA que consegue atingir temperaturas de insuflação mais baixas. Deste modo, definiu-se para o modo 3, uma temperatura de insuflação mínima de 16°C.

4.2.1. Condições Importantes

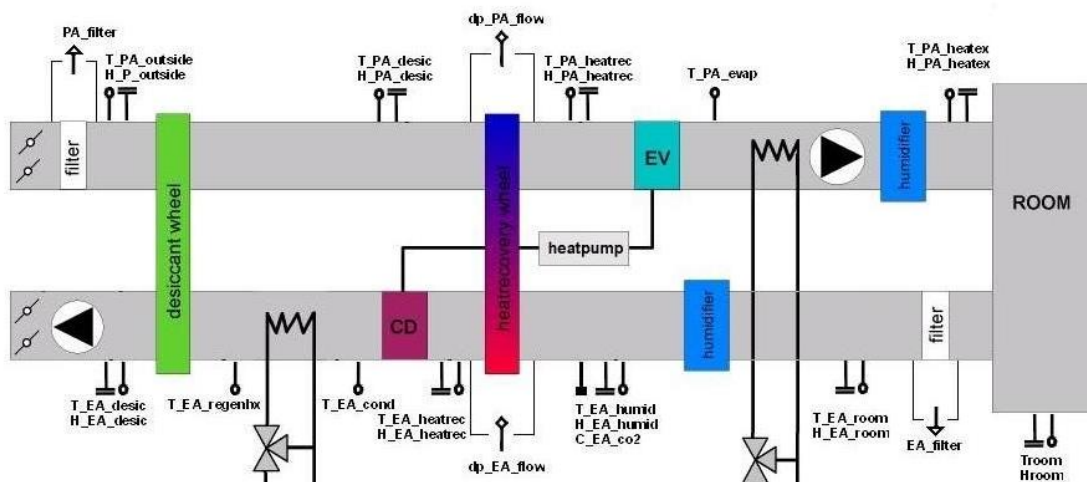


Figura 41: Configuração da UTA no LNEG com os parâmetros monitorizados pelo sistema de controlo [78]

Devido ao facto já mencionado de em certas situações a roda excicante ao contrário daquilo que está programado, arrefecer e humidificar o ar de entrada na UTA, foi adicionada, aos modos 2 e 3, a condição seguinte:

$$\text{Se } T_{EA_regenhx} < T_{PA_outside}:$$

$$AO_desic = 0$$

Quando a temperatura de regeneração ($T_{EA_regenhx}$) for inferior à temperatura do ar de entrada na UTA ($T_{PA_outside}$), isto significa que a roda excicante não tem a capacidade para desumidificar mais o ar proveniente do exterior, dado a temperatura de regeneração ser muito baixa, o que faz com que não seja possível realizar a permuta de calor entre o ar de exaustão e o ar de admissão. Ou seja, quando ocorre esta situação, o controlo da roda excicante (AO_desic) é desligado, voltando apenas a ligar quando a temperatura de regeneração for novamente superior à temperatura de entrada na UTA.

No funcionamento da ventilação, tal como foi já referido, existe uma condição que foi adicionada à já existente que obriga os ventiladores a aumentarem mais rapidamente a sua velocidade, quando a temperatura de insuflação calculada é igual ao valor mínimo (18°C) ou ao máximo estabelecido

(30°C), permitindo assim aproveitar da potencialidade máxima do arrefecimento exsiccante evaporativo, sendo expressa do seguinte modo:

Se $T_{PA_heatex_set} = T_{PA_heatex_min}$:

$$AO_{PA_fan} = \%AO_{PA_fan} + [(T_{room} - T_{room_set}) + fator_fan] e$$

$$AO_{EA_fan} = \%AO_{EA_fan} + (T_{room} - T_{room_set})$$

Se $T_{PA_heatex_set} = T_{PA_heatex_max}$:

$$AO_{PA_fan} = \%AO_{PA_fan} + [(T_{room_set} - T_{room}) + fator_fan] e$$

$$AO_{EA_fan} = \%AO_{EA_fan} + (T_{room_set} - T_{room})$$

Onde AO_{PA_fan} e AO_{EA_fan} correspondem respetivamente à velocidade dos ventiladores da conduta de insuflação e exaustão de ar e $\%AO_{PA_fan}$ e $\%AO_{EA_fan}$ à velocidade dos mesmos ventiladores no momento em que o sistema de controlo aplica esta rotina. O $fator_fan$ é o valor da diferença entre a velocidade do ventilador de entrada e saída da UTA.

Esta nova condição só é aplicada no modo 2 e no modo -2, aplicando-se apenas quando a roda de permuta operar à sua capacidade máxima, permitindo assim dar prioridade à permuta de calor e, só se ainda assim não se atingir a temperatura desejada, então recorre-se ao aumento do caudal de ar da UTA.

Existe também uma condição definida como (+DEF_JUMP_OFFSET), em que o sistema faz uma comparação entre a temperatura registada a seguir ao permutador utilizado (na secção de admissão ou de exaustão). Se estiver baixa o sistema tem três passos diferentes seja para aquecimento ($hc_heating$) ou para arrefecimento ($hc_cooling$):

1. $hc_heating = 1$ ou $hc_cooling = 1$. Em que é utilizada a água do fundo do depósito.
2. $hc_heating = 2$ ou $hc_cooling = 2$. Em que é utilizada a água do topo do depósito.
3. $hc_heating = 3$ ou $hc_cooling = 3$ Em que é utilizado o apoio da caldeira.

De maneira a acelerar o processo de fornecimento de calor à UTA, estabeleceu-se a condição (+DEF_JUMP_OFFSET), que neste caso é de 8°C, no controlo do ciclo de aquecimento que permite que quando é requerido calor, o sistema analisa a temperatura no depósito. Tal como referido anteriormente dá prioridade a água do fundo do depósito (passo 1). Se a temperatura não for a suficiente o normal seria passar ao passo seguinte que iria buscar água ao topo do depósito ($hc_heating = 2$ ou $hc_cooling = 2$) e se ainda não fosse suficiente recorreria-se à caldeira $hc_heating = 3$ ($hc_cooling = 3$). Contudo com esta condição podemos passar diretamente do passo 1 para o 3.

Por exemplo, se:

$$T_{PA_heatex_set} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{storage_top} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$DEF_JUMP_MODE_OFFSET = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Isto significa que o sistema passa diretamente para o apoio da caldeira visto que para se utilizar a água do topo esta tinha de ter pelo menos 38°C (30+8°C).

Tal como já foi referido anteriormente, existe uma proteção anti congelamento no programa de controlo da UTA. Esta proteção existe porque os coletores solares têm água no seu interior, e por isso é necessário ter cuidado para que a água dentro destes não congele, o que pode levar a que eles possam rebentar, o que constituiria um grande prejuízo económico.

Esta proteção é acionada quando a temperatura da água nos coletores desce a valores abaixo de 4°C. São ativadas as bombas de circulação de água no circuito primário e secundário de modo a injetar água quente vinda do depósito, nos coletores solares.

4.2.2. Mudança de Modos

A mudança de modos de funcionamento é feita de forma sequencial. Quando é necessário aquecer as salas, o processo começando no modo 0 é o seguinte:

Quando o sistema se encontra no modo 0, se a temperatura a que o ar esta a ser injetado na sala é inferior à temperatura pretendida ($T_{PA_heatex} < T_{PA_heatex_set}$) e a temperatura na sala é inferior à pretendida ($T_{room} < t_{room_set}$), o sistema de controlo efetua a passagem para o modo -1, para obtermos uma temperatura superior.

Se neste modo de funcionamento não conseguirmos obter os valores requeridos e se aliado a isso a roda permutadora de calor se encontra a funcionar quase à sua velocidade máxima ($AO_heatrec > 90\%$), tentando aquecer ao máximo o ar de entrada, então é necessário recorrer ao modo -2, ao qual está associado, a utilização do permutador de calor de Inverno.

Na situação inversa, se nos encontramos a aquecer muito o ar de entrada (modo -2), mas a temperatura a que o ar é introduzido nas salas é superior à temperatura pretendida ($T_{PA_heatex} > T_{PA_heatex_set}$) e a válvula que regula a circulação de água no permutador água – ar de Inverno ($AO_HC_valve_PA$) se encontra a funcionar a uma potência inferior a 10% da sua capacidade máxima, então passa-se para o modo de funcionamento -1.

Se a temperatura injetada nas salas continuar a ser elevada ($T_{PA_heatex} > T_{PA_heatex_set}$), e a roda de permuta ($AO_heatrec$) atingir uma velocidade inferior a 10% da sua potência máxima, então o sistema de controlo efetua a passagem para o modo de apenas ventilação do ar (modo 0).

Quando é necessário arrefecer as salas, o processo começando no modo 0 é o seguinte:

No modo 0, quando a temperatura de insuflação é superior à temperatura pretendida ($T_{PA_heatex} > T_{PA_heatex_set}$) e a temperatura na sala é superior à pretendida ($T_{room} > t_{room_set}$), segue-se para o primeiro modo de arrefecimento (modo 1).

Se ainda assim é necessário arrefecer mais o ar, e a roda de permuta se encontra a funcionar quase à velocidade máxima, com o objetivo de tentar arrefecer o mais possível o ar ($AO_Heatrec > 90\%$), e não o consegue, então passa-se para o modo 2, onde é aplicado o arrefecimento exsicante evaporativo.

No modo 2, se a temperatura de insuflação ainda for superior à temperatura pretendida ($T_{PA_heatex} > T_{PA_heatex_set}$) e a roda permutadora e o ventilador (da conduta de admissão) estiverem a funcionar quase a plena carga ($AO_heatrec > 99\% \& AO_PA_fan > 99\%$), mas tal não for suficiente para cumprir com os objetivos de temperatura pretendidos, então efetua-se a mudança para o modo 3.

Em situação inversa, no modo 3, caso a temperatura de conforto dentro dos gabinetes ($T_{PA_heatex} < T_{PA_heatex_set}$), e a temperatura de entrada nos mesmos for inferior à pretendida, ou então a bomba de calor encontrar-se a funcionar à potência mínima estabelecida ($T_{room} < t_{room_set} // AO_heatpump < 3\%$), então verifica-se o regresso ao modo de funcionamento 2, o que significa que já não é necessário arrefecer tanto o ar.

Ao estar a funcionar no modo 2 e a temperatura de insuflação ser inferior à temperatura pretendida ($T_{PA_heatex} < T_{PA_heatex_set}$) e se a válvula de regulação da circulação de água no permutador de calor água – ar de Verão ($AO_HC_valve_EA$) encontra-se a funcionar a menos de 10% da sua capacidade, então é selecionado o modo 1.

a Outubro de 2005 e de Junho a Setembro de 2006, também não foi possível considerar os dados provenientes do sistema solar porque devido a uma avaria o sistema esteve parado, dando origem a que não existisse caudal, embora o sistema continuasse a registar dados, o que levou a valores incongruentes como E_Col_2 e E_Backup serem negativos.

A bomba de calor teve problemas e não funcionou em alguns dias do verão de 2004 e também nos anos de 2005 e 2006 em que apresentava um valor constante de energia apesar de não estar em funcionamento. Devido a todos estes problemas, nos anos de 2004, 2005 e 2006 utilizaram-se, apenas, os valores energéticos obtidos no Inverno, período durante o qual o sistema esteve a trabalhar, sem problemas.

A tabela seguinte fornece a legenda dos gráficos:

Tabela 1: Legenda dos gráficos

T_outdoor_Average	Temperatura média exterior
T_room Average	Temperatura média das salas
T_SC collector	Temperatura à saída do de campo de coletores
H_outdoor_Average	Humidade média exterior
H_room Average	Humidade média das salas
E_Col_1	Energia cedida no permutador solar ao circuito secundário
E_Col_2	Energia fornecida pelo sistema solar (antes da caldeira, depois do depósito solar)
E_Backup	Energia fornecida pela caldeira
E_Dec	Energia cedida ao sistema DEC pelo circuito secundário
E_Heatpump	Energia elétrica consumida na bomba de calor
E_Fans	Energia elétrica consumida nos ventiladores
E_Outros	Energia elétrica consumida pelos restantes componentes
E_Total (Elétrico)	Energia elétrica total consumida pelo DEC
F_SC	Caudal do circuito primário
F_HC	Caudal do circuito secundário

4.3.1. Análise da Temperatura e Humidade

Neste ponto fez-se uma análise dos valores da temperatura e da humidade obtidas dentro da área climatizada. Os dados correspondem a um total de 2299 dias, que corresponderam a 28392,55 horas de funcionamento.

De seguida apresentam-se os gráficos com os valores médios mensais de temperatura e humidade e a evolução desses valores ao longo dos meses de cada ano, bem como as tabelas que fazem uma análise mais detalhada da temperatura e humidade registada nas salas.

É apresentada a explicação bem como a descrição dos dados mais relevantes dos gráficos e das tabelas. No final está uma conclusão geral sobre os anos observados.

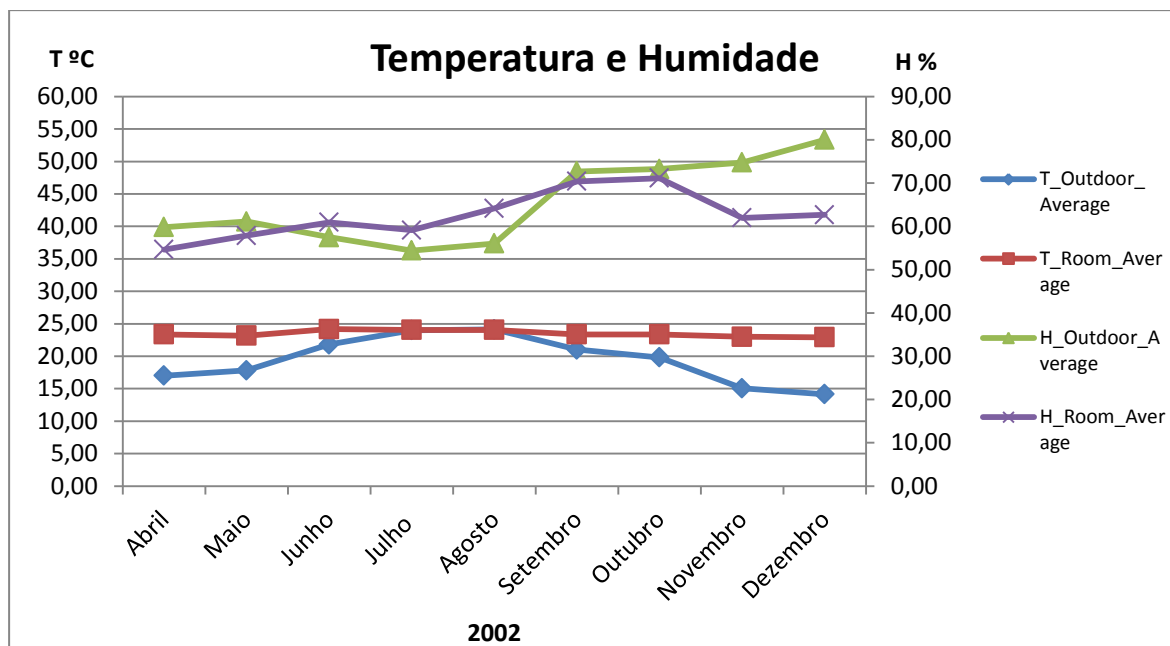


Gráfico 3: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2002

No Gráfico 3, a linha azul (T_Outdoor_Average) representa a evolução da média mensal da temperatura exterior registada ao longo do ano. Estes valores, bem como os das outras temperaturas e humidades, são obtidos a partir das médias diárias calculadas. Podemos verificar que, tal como seria de esperar, a temperatura aumenta nos meses de verão e baixa nos outros meses. A linha vermelha (T_Room_Average) representa a temperatura média mensal registada nas salas e através dela podemos verificar que a temperatura mais baixa foi de 23,18°C em Maio e a mais elevada foi de 24,07°C em Julho.

Relativamente à humidade, a linha verde (H_Outdoor_Average) representa a média mensal da humidade exterior registada ao longo do ano. Esta aumenta nos períodos mais frios e diminui nos mais quentes, sendo o valor mais baixo de 54,43% registado em Julho e o mais elevado de 80,01% registado em Dezembro. O mês de setembro registou uma humidade elevada com 73,25%.

A linha roxa (H_Room_Average) representa a humidade média mensal registada nas salas ao longo do ano, variando entre os 54,64% em abril e os 71,16% em outubro. A humidade nas salas é mais elevada que a humidade exterior entre Junho e Agosto.

Tabela 2: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2002

2002					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	0	0,00%	<30	0	0,00%
19-20	0	0,00%	30-40	0	0,00%
20-25	222	93,28%	40-50	7	2,94%
25-26	14	5,88%	50-60	88	36,97%
26-27	2	0,84%	60-70	97	40,76%
>27	0	0,00%	>70	46	19,33%

A Tabela 2 apresenta uma análise mais detalhada da temperatura e humidade registada nas salas ao dividir os valores por intervalos, podendo-se assim, ter uma melhor noção das temperaturas e humidades obtidas e se estas estão dentro dos intervalos pretendidos.

A parte esquerda da tabela é relativa à temperatura obtida dentro das salas e está dividida em seis intervalos de temperaturas. Aqui podemos observar qual o número de dias em que as temperaturas

registadas estiveram em cada intervalo, bem como a que percentagem do numero total de dias é que correspondem. Neste ano, 222 dias tiveram temperaturas entre os 20 e os 25°C, o que correspondeu a 93,28% do número de dias total.

A parte direita da Tabela 2 segue a mesma lógica, aplicando-se contudo neste caso à humidade registada nas salas, estando esta dividida também em 6 intervalos. Aqui podemos observar qual o número de dias em que as humidades registadas estiveram em cada intervalo e também a que percentagem do numero total de dias é que correspondem. Neste ano, o intervalo com mais registos obtidos foi o que vai de 60 a 70%, com 97 dias, o que correspondeu a 40,76% do número de dias total. Neste ano não houve nenhum dia com humidade inferior a 40%. É de notar que percentagem de dias com humidade superior a 70% foi de 19,33%.

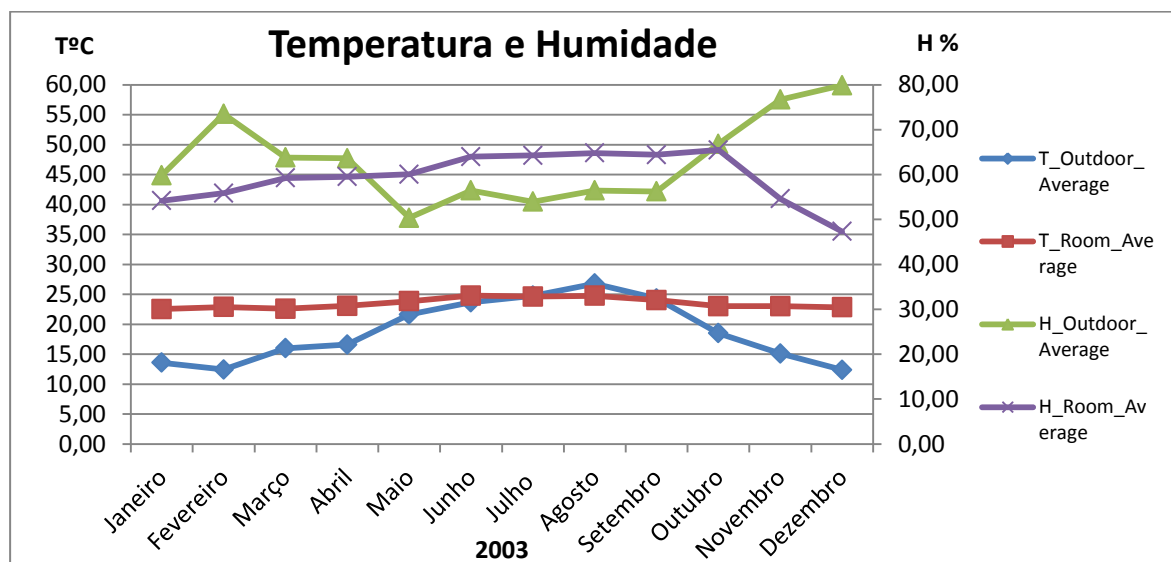


Gráfico 4: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2003

Neste gráfico já temos informação relativa ao ano todo. As temperaturas médias registadas nas salas situaram-se entre os 22,53°C em janeiro e os 24,78°C em junho, enquanto as temperaturas exteriores ficaram entre os 12,38°C registados em dezembro e os 26,80°C em agosto. A temperatura exterior foi superior à das salas entre julho e setembro.

Em relação à humidade registada nas salas esta situou-se entre os 47,33% em dezembro e os 64,81% em agosto, tendo sido mais elevada que a humidade exterior de maio a setembro. A humidade exterior registou valores entre os 50,37% em maio e os 79,88% em dezembro.

Tabela 3: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2003

2003					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	0	0,00%	<30	0	0,00%
19-20	1	0,31%	30-40	1	0,31%
20-25	289	88,65%	40-50	33	10,12%
25-26	23	7,06%	50-60	113	34,66%
26-27	11	3,37%	60-70	162	49,69%
>27	2	0,61%	>70	17	5,21%

Pela Tabela 3, podemos verificar que em 88,65% dos dias a temperatura esteve entre os 20 °C e os 25°C. Sendo que o segundo intervalo com mais dias foi o de 25 a 26°C com 7,06%.

Em termos de humidade o intervalo com mais ocorrências situou-se novamente entre os 60 e os 70% com quase 50% do número de dias total. O segundo intervalo foi o de 50 a 60% com 34,66%.

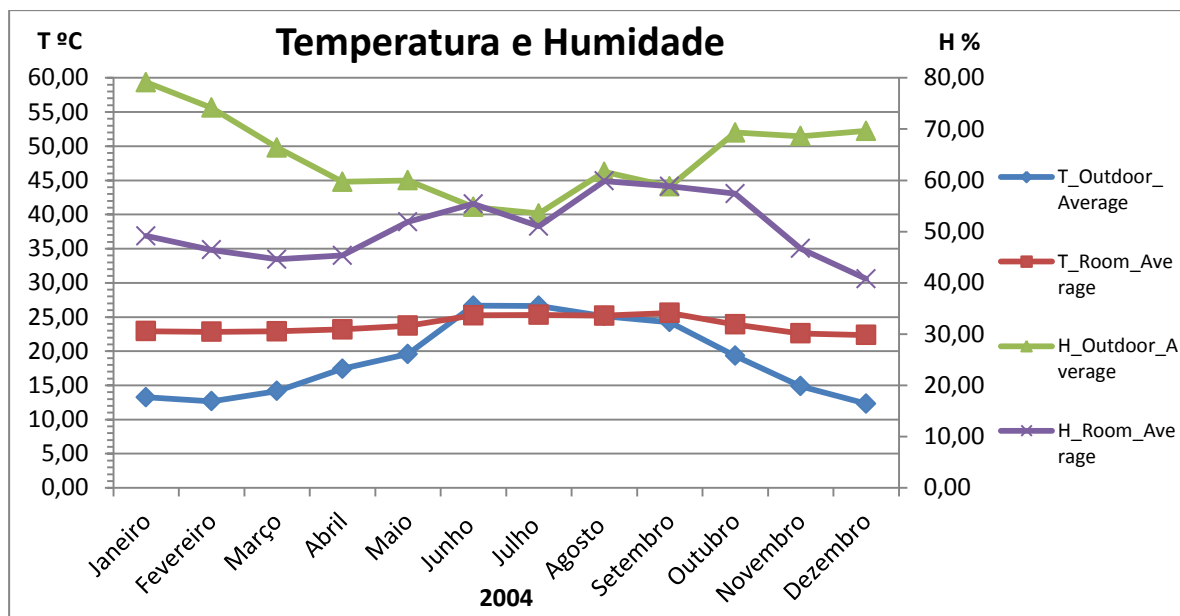


Gráfico 5: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2004

Em termos da temperatura média registada nas salas, neste ano ela situou-se entre os 22,37°C em dezembro e os 25,61°C em setembro, enquanto a exterior ficou-se entre os 12,31°C em dezembro e os 26,64°C em junho, sendo apenas superior à das salas nesse mês e em julho.

Relativamente à humidade, podemos verificar que a humidade exterior situou-se entre os 53,52% em julho e os 79,13% em janeiro. A humidade nas salas teve valores mais baixos que no ano anterior, ficando os valores entre os 40,79% em dezembro e os 59,85% em agosto e passando a humidade exterior em junho e setembro mas com uma diferença muito pequena.

Tabela 4: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2004

2004					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	0,00	0,00%	<30	2	0,58%
19-20	0,00	0,00%	30-40	36	10,43%
20-25	265,00	76,81%	40-50	125	36,23%
25-26	53,00	15,36%	50-60	126	36,52%
26-27	24,00	6,96%	60-70	53	15,36%
>27	3	0,87%	>70	3	0,87%

Neste ano em termos de temperatura, o intervalo com mais registos é novamente o de 20 a 25°C. Podemos verificar que a percentagem de dias com temperaturas entre os 26 e os 27°C representou cerca de 7% do total.

Em termos de humidade nas salas, neste ano o intervalo com mais ocorrências foi o de 50 a 60%, tendo no entanto um valor quase igual ao do intervalo dos 40 aos 50%. Os dois intervalos registam perto de 75%.

Este ano teve dias com valores abaixo dos 30%, no entanto nem 1% do número total de dias representaram.

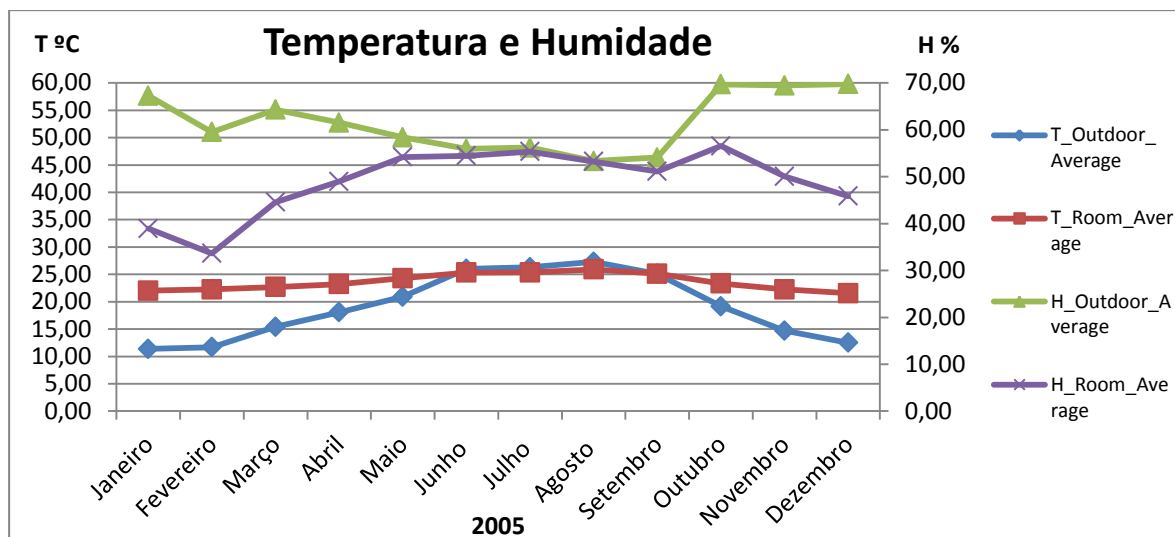


Gráfico 6: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2005

Neste ano a temperatura mínima registada nas salas foi de 21,55°C em dezembro e a máxima de 25,90°C em agosto. A temperatura exterior teve o valor mais baixo em janeiro com 11,35°C e o mais elevado de 27,28°C em agosto. A temperatura exterior média foi superior à das salas entre junho e agosto.

Ao observarmos a curva da humidade nas salas, verificamos que em janeiro e fevereiro os valores ficaram abaixo dos 40%, tendo o mínimo sido de 33,63% em fevereiro, mês em que a humidade exterior ficou-se apenas pelos 59,51%. Neste ano a humidade das salas nunca chega a ser superior à exterior que variou entre os 53,34% em agosto e os 69,77% em dezembro.

Tabela 5: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2005

2005					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	1,00	0,34%	<30	19	6,51%
19-20	4,00	1,37%	30-40	51	17,47%
20-25	224,00	76,71%	40-50	78	26,71%
25-26	44,00	15,07%	50-60	119	40,75%
26-27	11,00	3,77%	60-70	24	8,22%
>27	8,00	2,74%	>70	1	0,34%

O intervalo de temperatura média nas salas com mais registos é o de 20 a 25°C com cerca de 77% dos registos. O segundo intervalo é o de 25 a 26°C.

Em termos de humidade o dado mais relevante é que a percentagem de dias com valores inferiores a 30% foi de 6,51% e a percentagem de dias entre os 30 e os 40% foi de 17,47%. O intervalo com mais observações foi o de 50 a 60% que representou 40,75% do número de total de dias.

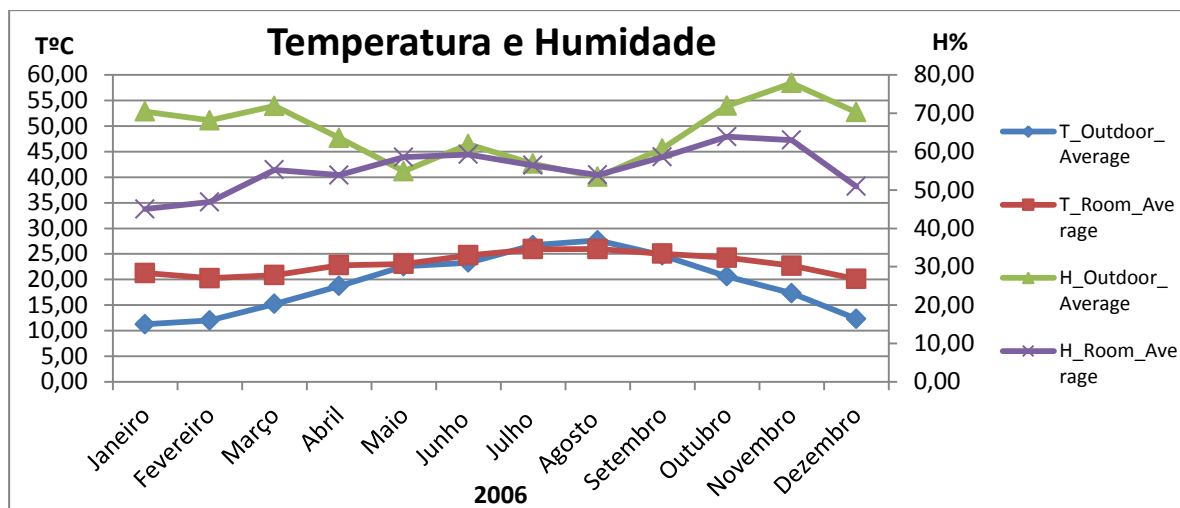


Gráfico 7: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2006

A temperatura média nas salas ficou entre os 20,11°C em dezembro e os 25,95°C em agosto. A temperatura exterior situou-se entre os 11,24°C em janeiro e os 27,66°C em agosto, sendo mais elevada que a interior em julho e agosto.

Em relação à humidade média, neste ano os valores já estão de novo acima dos 40%, ficando entre os 45,03% em janeiro e os 63,89 % em outubro e passando apenas a humidade exterior em maio e agosto.

Tabela 6: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2006

2006					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	8	3,74%	<30	0	0,00%
19-20	12	5,61%	30-40	5	2,34%
20-25	147	68,69%	40-50	49	22,90%
25-26	24	11,21%	50-60	98	45,79%
26-27	13	6,07%	60-70	52	24,30%
>27	10	4,67%	>70	10	4,67%

Em relação às temperaturas a maioria dos dias esteve entre os 20 e os 25°C. Este ano a percentagem de dias acima dos 27°C foi de 4,67% e se juntarmos os valores entre 26 e 27°C a percentagem passa os 10%. É de referir que 9,35% dos dias tiveram temperaturas inferiores a 20°C.

Em termos de humidade o intervalo com mais observações foi o de 50 a 60% que representou 45,79% do número de total de dias. Neste ano 4,67% dos dias tiveram humidade superior a 70%, no entanto não existiram dias com humidade inferior a 30%.

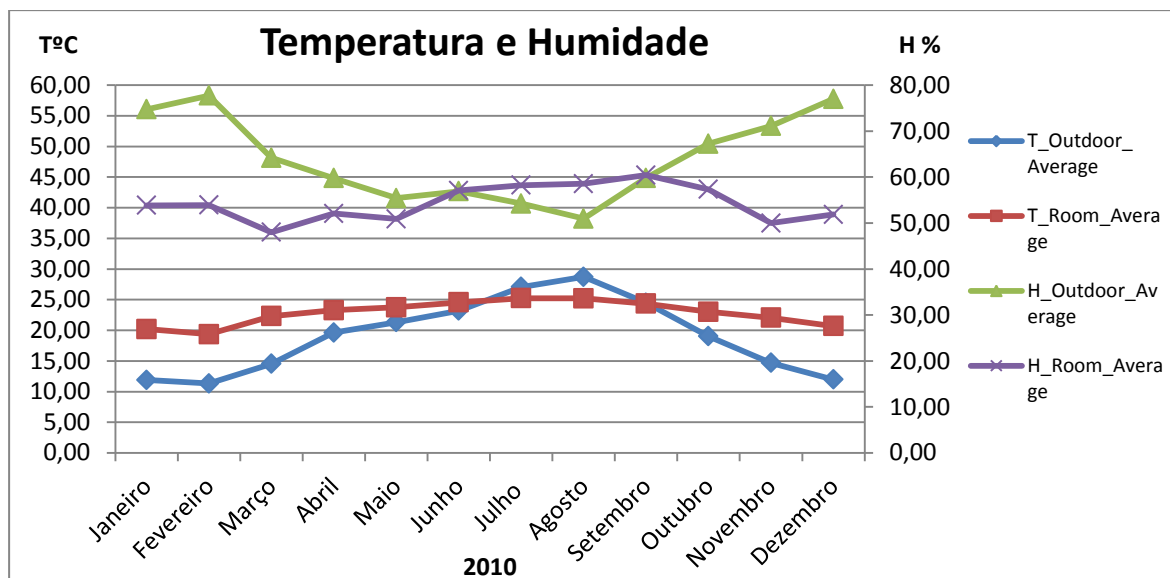


Gráfico 8: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2010

Neste ano a temperatura média mínima nas salas esteve abaixo dos 20°C, registando o valor de 19,37°C em fevereiro e máximo de 25,24°C em julho. A temperatura exterior variou entre os 11,31°C em fevereiro e os 28,71°C em agosto. A temperatura exterior é mais elevada que a interior de julho a setembro.

A humidade registada nas salas ficou entre os 47,99% em fevereiro e os 60,44% em setembro, sendo superior à humidade exterior de junho a setembro.

Tabela 7: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2010

2010					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	12	4,00%	<30	0	0,00%
19-20	9	3,00%	30-40	13	4,33%
20-25	231	77,00%	40-50	71	23,67%
25-26	28	9,33%	50-60	145	48,33%
26-27	15	5,00%	60-70	69	23,00%
>27	5	1,67%	>70	2	0,67%

Em termos de temperaturas podemos verificar que 77% dos dias tiveram entre os 20 e os 25°C. Podemos constatar também que 4% dos dias tiveram temperaturas inferiores a 20°C.

Em termos de humidade, não houve nenhum dia em que a humidade tivesse valores inferiores a 30%. O intervalo com maior número de dias foi de 50 a 60% com 48,33%.

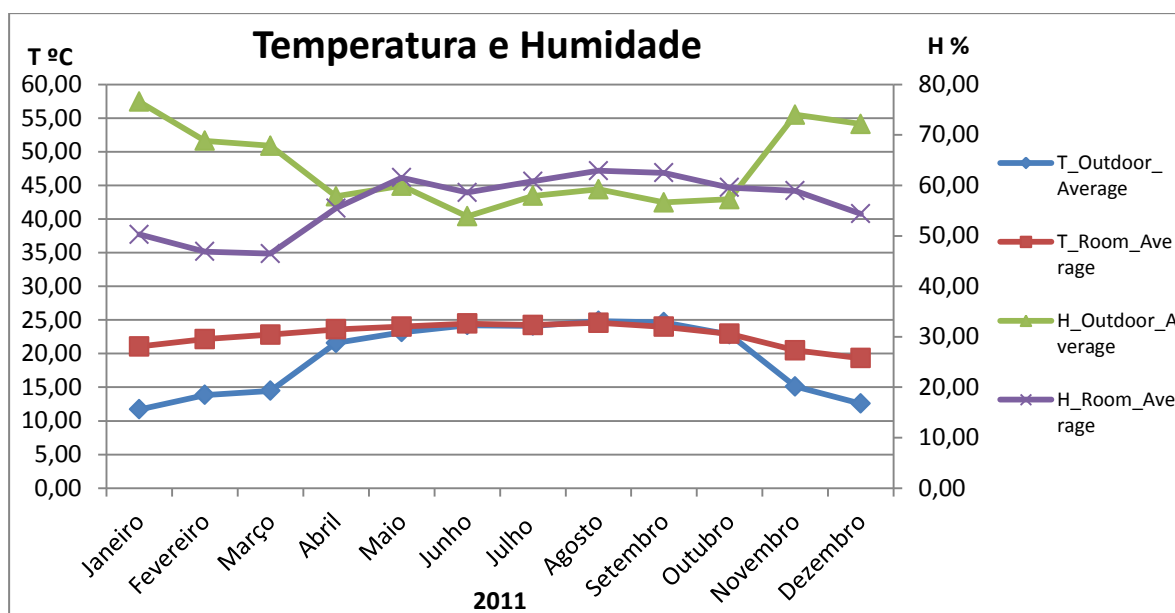


Gráfico 9: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2011

No ano de 2011, a temperatura média mínima registada nas salas ficou abaixo dos 20°C, sendo de 19,32°C em dezembro. O máximo foi de 24,57°C em agosto.

A temperatura exterior variou entre os 11,70°C de janeiro e os 24,83°C em agosto. A temperatura exterior foi superior à das salas em agosto e setembro.

Em termos de humidade média nas salas, esta variou entre os 46,46% em março e os 62,90% em agosto. E foi superior à humidade exterior entre maio e outubro.

Tabela 8: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2011

2011					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	16	4,62%	<30	1	0,29%
19-20	22	6,36%	30-40	15	4,34%
20-25	285	82,37%	40-50	54	15,61%
25-26	17	4,91%	50-60	146	42,20%
26-27	5	1,45%	60-70	116	33,53%
>27	1	0,29%	>70	14	4,05%

Ao analisarmos a Tabela 8 verificamos que no ano de 2011, em cerca de 11% dos dias as temperaturas nas salas tiveram abaixo dos 20°C, e se olharmos apenas para as inferiores as 19°C, estas ocorreram em 4,62% dos dias.

O intervalo com mais registos foi o de 20 a 25°C com 82,37% e existiu apenas um dia com temperaturas superiores a 27°C.

Em termos de humidade, o intervalo com maior numero de registos foi o de 50 a 60%, tendo havido 4,05% de dias com humidades superiores a 70%.

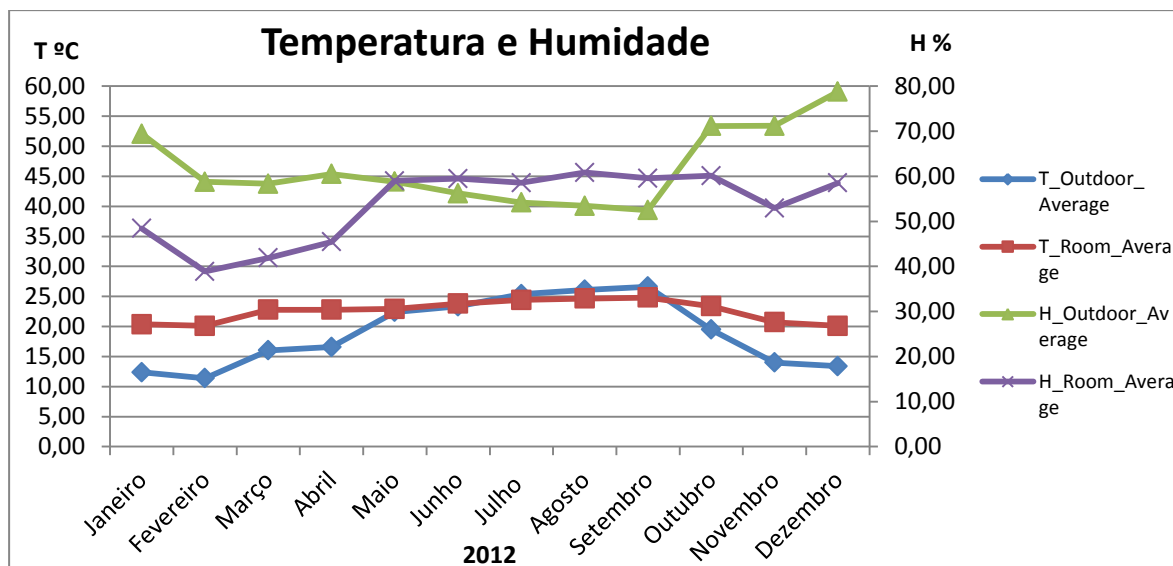


Gráfico 10: Evolução das temperaturas e humidades ao longo do ano de 2012

No ano de 2012 a temperatura média nas salas variou entre os 20,09°C em dezembro e os 24,81°C em setembro, enquanto a temperatura exterior variou entre os 11,39°C em fevereiro e os 26,62°C em setembro, sendo superior à temperatura interior de julho a setembro.

Em termos de humidade nas salas, o dado mais relevante é que em fevereiro a humidade média esteve abaixo dos 40%, com um valor de 38,87%. O máximo foi atingido em agosto com 60,84%. A humidade nas salas foi superior à exterior de maio a setembro.

O início do ano registou humidades exteriores mais baixas que o habitual.

Tabela 9: Análise da temperatura e da humidade nas salas no ano 2012

2012					
Temperatura			Humidade		
T °C	Nº de dias	% nº de dias total	H %	Nº de dias	% nº de dias total
<19	15	6,30%	<30	2	0,84%
19-20	12	5,04%	30-40	18	7,56%
20-25	199	83,61%	40-50	57	23,95%
25-26	12	5,04%	50-60	92	38,66%
26-27	0	0,00%	60-70	66	27,73%
>27	0	0,00%	>70	3	1,26%

Em termos de temperaturas registadas nas salas podemos verificar na Tabela 9 que em 11,34% dos dias a temperatura foi inferior a 20°C. E se analisarmos apenas a temperatura abaixo dos 19°C, esta ocorreu em 6,30% dos dias. No entanto neste ano não houve nenhum dia em que a temperatura excedesse os 26°C.

Em termos de humidade nas salas, o intervalo com mais ocorrências foi o de 50 a 60%, com 38,66%.

Após a análise feita anteriormente, podemos efetuar uma comparação dos anos para justificar os dados obtidos e tirar conclusões dos mesmos.

Podemos então constatar pela análise dos gráficos, que, em relação às temperaturas obtidas em média dentro das salas, estas estão quase sempre dentro do intervalo de 20 a 26°C. Em 2010 e 2011 houve um mês em que a temperatura média mínima ficou entre os 19 e os 20°C. Em 4 anos a temperatura média máxima ficou abaixo dos 25°C e nos outros 4 abaixo dos 26°C.

Como seria de esperar os valores mais baixos foram obtidos na época mais fria e os mais elevados na época mais quente. Nos meses de maior calor as temperaturas médias das salas têm valores mais próximos da temperatura exterior, sendo que no inverno esses valores como seria expectável afastam-se.

É de referir que, como estes valores são de temperaturas médias, existem dias em que a temperatura das salas ultrapassa os 26°C e dias em que se fica abaixo dos 19°C pelo que, pelas tabelas abaixo dos gráficos, pode-se ter uma noção mais exata do que se passou ao longo dos diversos anos e constatar que, na grande maioria dos dias, a temperatura das salas esteve dentro do intervalo pretendido.

Se observarmos em termos percentuais vemos que tirando 2006 (Tabela 6), todos os anos tiveram mais de 76% dos dias com temperaturas entre os 20 e os 25°C. E se alargarmos o intervalo para os 26°C, vemos que, excetuando 2006 (com 79,90%), todos os anos tiveram mais de 86% dos dias dentro desse intervalo.

Os dias em que a temperatura excede esses intervalos, chegando mesmo a ultrapassar os 27°C estão normalmente relacionados com problemas com a bomba de calor.

Tomemos por exemplo o ano de 2010 (Tabela 7). Nesse ano houve 5 dias com temperaturas acima de 27°C e 15 dias com temperaturas entre os 26 e os 27°C. Nesse ano verificaram-se problemas em agosto e nos primeiros dias de setembro que fizeram com que a bomba, apesar de ser requerida pelo sistema, se mantivesse no modo *stand-by*, do que resultou que não se conseguisse atingir as temperaturas de insuflação necessárias mas, se olharmos em termos percentuais, verificamos que os dias com temperaturas acima de 26°C foram apenas 6,67% do total.

Analisando os outros anos verificamos que a percentagem de dias acima de 27 °C é muito baixa sendo os anos com mais registos, os de 2005 (Tabela 5) com 2,74% e 2006 (Tabela 6) com 4,67%. E se olharmos para a percentagem de dias acima de 26°C, podemos observar que, 2006 foi o ano em que foi atingido o valor mais elevado com 10,75% dos dias. Isto justifica-se com o facto de que, nos anos de 2005 e de 2006, a bomba de calor não esteve em funcionamento e nessa altura ainda não existia o humidificador na secção de admissão.

Em relação aos dias com temperaturas inferiores a 20°C, estas ocorreram nos dias mais frios e foram geralmente resultantes de problemas na caldeira, visto que quando esta não funciona o sistema não consegue atingir as temperaturas de insuflação calculadas.

No final de dezembro de 2012 as temperaturas inferiores a 19°C resultaram de um problema na ventilação que fez com que apesar de a caldeira estar a funcionar, a temperatura necessária não fosse obtida. O sistema esteve mesmo parado no início desse mês devido a uma avaria. Esse foi mesmo o ano em que se obteve a percentagem de dias mais elevada, 6,30%, com temperaturas inferiores a 19°C.

Por vezes, ao longo dos anos, as salas não atingiram a temperatura pretendida apesar de estar tudo a funcionar corretamente. Tal facto é devido à constatação, já referida, de as salas terem as portas abertas e por vezes também as janelas o que impede uma climatização correta.

Ao analisar a evolução dos valores da humidade, nos gráficos, verifica-se que ao contrário do que acontece com a humidade exterior, os valores mais baixos, nas salas, são obtidos no inverno e os mais elevados no verão, o que é normal visto que na época de arrefecimento são utilizados os humidificadores e também existe uma maior contribuição proveniente do calor latente.

Observando os gráficos constata-se, também que os valores médios da humidade obtida nas salas estão quase sempre acima dos 40%, com exceção de janeiro e fevereiro de 2005 (Gráfico 6) e também fevereiro de 2012 (Gráfico 10), que estão, mesmo assim, acima dos 30%.

Estes valores podem-se justificar pelo facto de terem sido meses mais secos do que o habitual e pela rotina, responsável pelo controlo da humidade relativa, não estar ativa, quando esta baixa dos 40%

Observamos também que os valores nas salas estão quase sempre abaixo dos 70%, só passando esse valor em setembro e outubro de 2002 (Gráfico 3) mas por muito pouco. No entanto, estes meses tiveram uma humidade exterior superior à habitual, sobretudo Setembro que, com 72,72% de

humidade registada, esteve bastante longe dos valores registados para o mesmo mês, nos outros anos, em que valor máximo tinha sido de 60,81% em 2006.

Se tal como para as temperaturas olharmos para as tabelas, podemos fazer uma análise mais detalhada dos valores registados nas salas ao longo dos anos e constatar que, em 6 dos 8 anos observados, a mais elevada percentagem dos dias situa-se no intervalo entre os 50 e os 60% de humidade. Observa-se também que o segundo intervalo com maior registo é o que está entre os 60 e os 70%, sendo mesmo em dois anos o intervalo com mais ocorrências.

Se tivermos em conta o intervalo ótimo da ASHRAE, que se situa entre os 40% e os 60% vemos então que em 2004, 2005 e 2006 a maioria dos valores estão nessa situação. Se alargarmos o intervalo para os 30% a 70%, intervalo esse que para a Norma 7730 está dentro dos parâmetros de conforto adequados, verificamos que mais de 93% dos dias estão dentro desse intervalo com a exceção de 2002 com 80,67%, sendo que, tal como já analisamos anteriormente, este ano teve humidades exteriores superiores às dos outros anos.

Em resumo, os dias com valores abaixo dos 30% são muito reduzidos, havendo mesmo 4 anos em que tal não ocorreu, sendo o ano de 2005 o que teve mais dias nessas condições. Os dias com valores superiores a 70% ocorreram mais vezes, com o ano de 2002 a registar o maior número de dias com esses valores. No entanto em 4 dos anos observados os valores acima dos 70% corresponderam a menos de 2% do número total de dias.

4.3.2. Análise Energética

Neste ponto faz-se uma análise do sistema solar, bem como do consumo do sistema elétrico associado à utilização da UTA, procurando também estabelecer comparações entre os dois. Procura-se também analisar a importância do recurso solar neste sistema, e quanto por ano se poupa ao utilizar o mesmo.

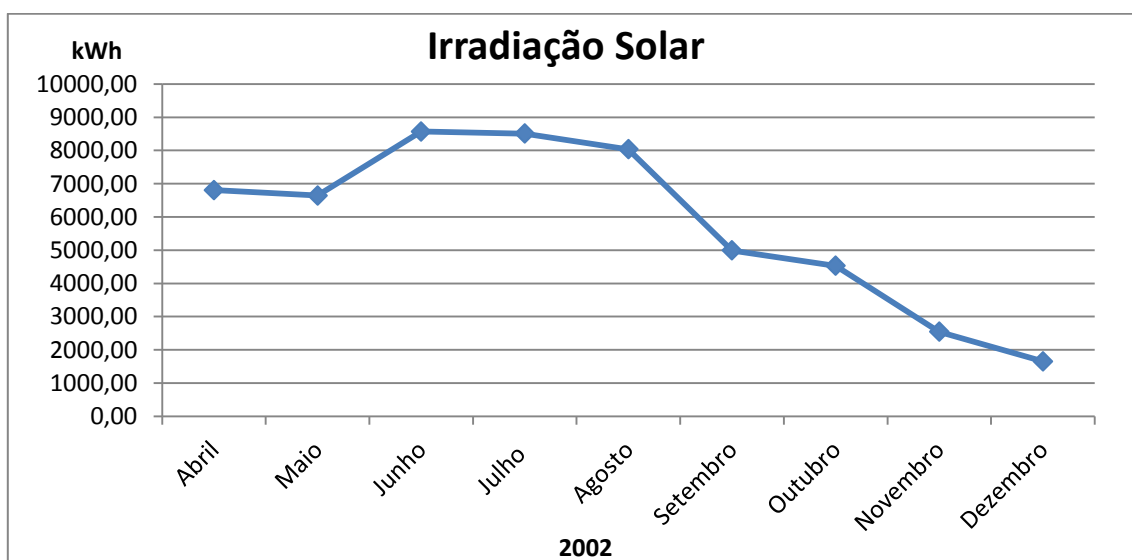


Gráfico 11: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2002

O Gráfico 11 mostra a evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2002, tendo um aumento natural nos meses mais quentes, atingindo o seu máximo em junho com 8572,29 kWh.

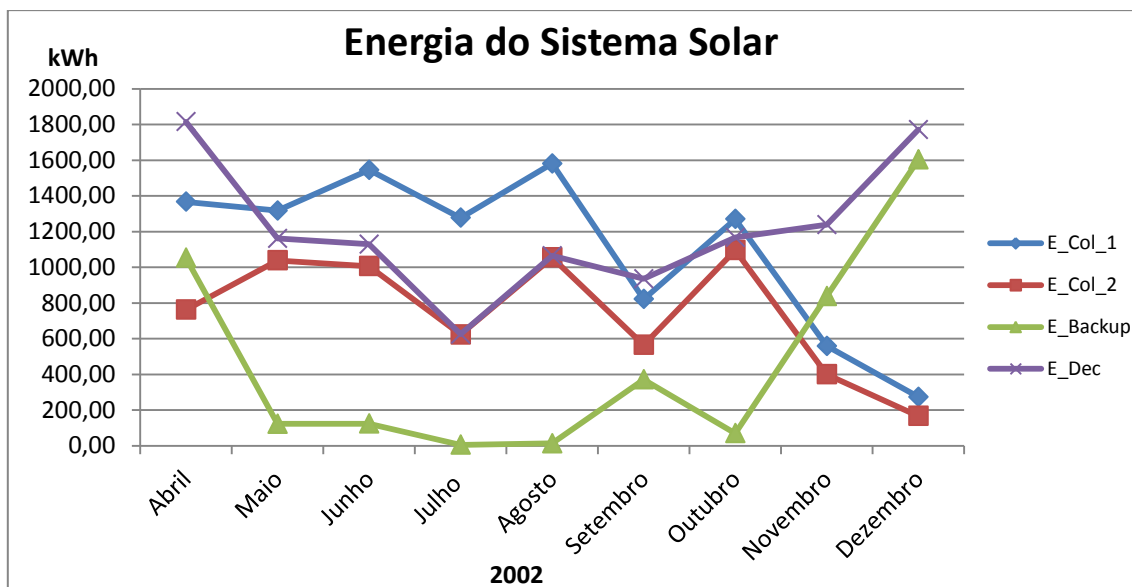


Gráfico 12: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2002

O Gráfico 12 representa a evolução da energia no sistema solar da UTA, sendo que a linha azul (E_Col_1) representa a energia cedida no permutador solar ao circuito secundário e a linha vermelha (E_Col_2) mostra a energia fornecida pelo sistema solar (antes da caldeira, depois do depósito solar). O esperado é que estas linhas tenham valores superiores nos meses mais quentes quando existe maior disponibilidade solar. Neste ano o valor mais elevado de E_Col_1 foi de 1581,23 kWh em agosto e o de E_Col_2 foi de 1095,90 kWh em outubro.

A linha verde (E_Backup) representa a energia fornecida pela caldeira tendo os valores mais altos sido atingidos no inverno quando existe menos energia fornecida pelo sol. Neste ano o valor mais elevado foi no mês de dezembro com 1603,61 kWh. No entanto a caldeira também é utilizada no verão para a regeneração da roda exsicante.

A linha roxa (E_Dec) representa a energia cedida ao sistema DEC pelo circuito secundário sendo o conjunto da linha verde e da vermelha.

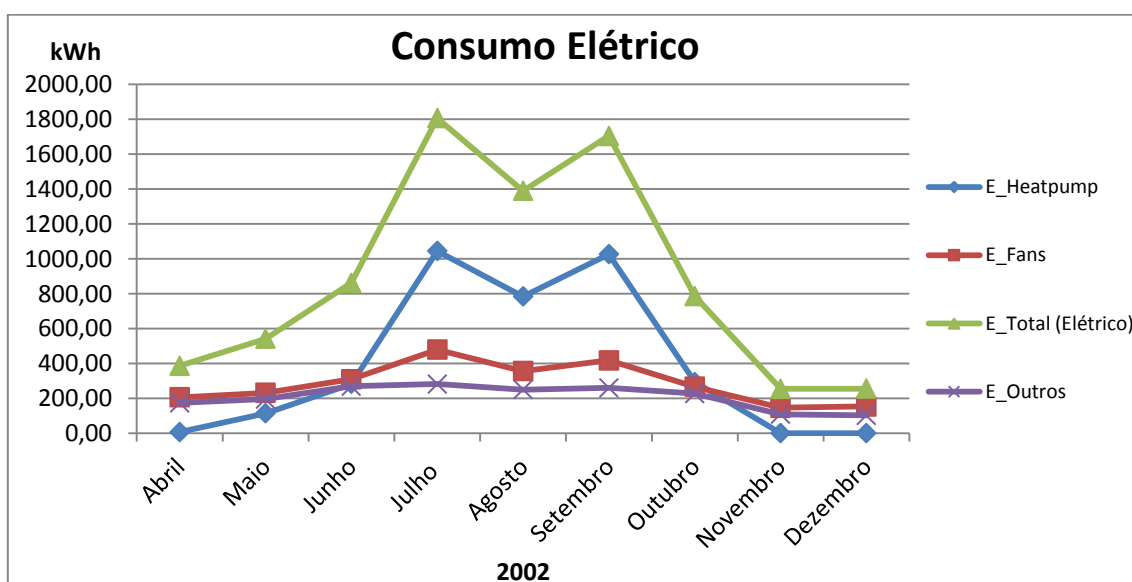


Gráfico 13: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2002

O Gráfico 13 mostra a evolução do consumo elétrico ao longo do ano, onde a linha azul (E_Heatpump) representa a energia elétrica consumida pela bomba de calor, e através dela podemos verificar que é nos meses de maior calor que é utilizada registando-se os valores mais elevados entre julho e setembro. O consumo da bomba de calor representou cerca de 45% do consumo total.

A linha vermelha (E_Fans) mostra a energia elétrica consumida nos ventiladores, sendo neste ano o consumo mais elevado registado nos meses de verão, com um máximo de 479,31 kWh em julho. O consumo dos ventiladores representou 32% do total.

A linha roxa (E_Outros) mostra o consumo elétrico dos restantes componentes, tendo esta linha uma variação menos acentuada que as outras, podendo-se no entanto verificar um aumento nos meses de verão. Os restantes componentes representaram 23% do consumo total.

A linha verde (E_Total (Elétrico)) representa a soma das outras linhas, obtendo-se assim a evolução do consumo de energia elétrica total ao longo do ano.

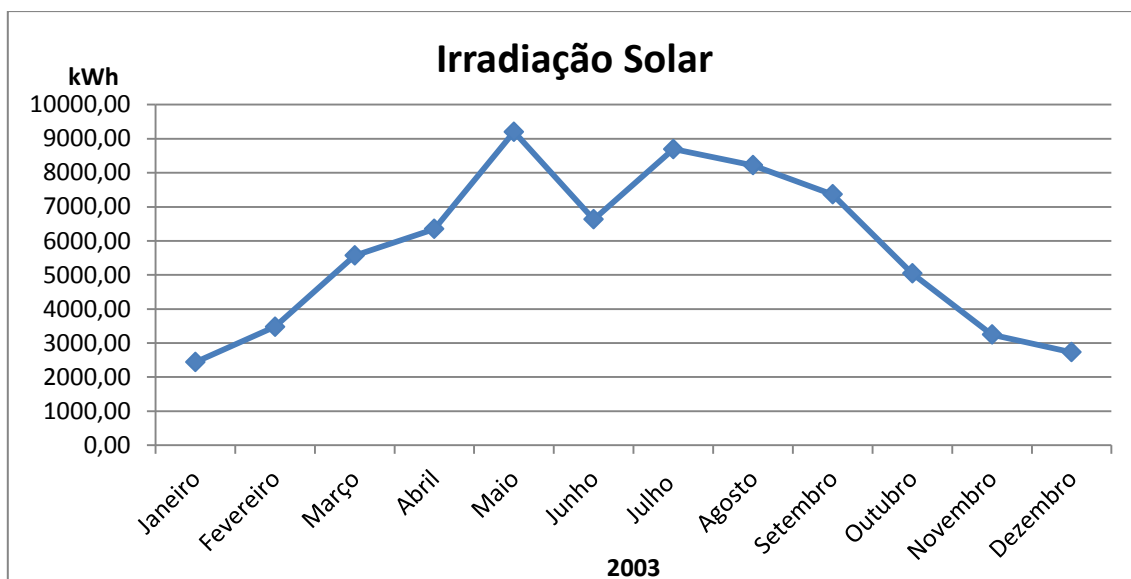


Gráfico 14: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2003

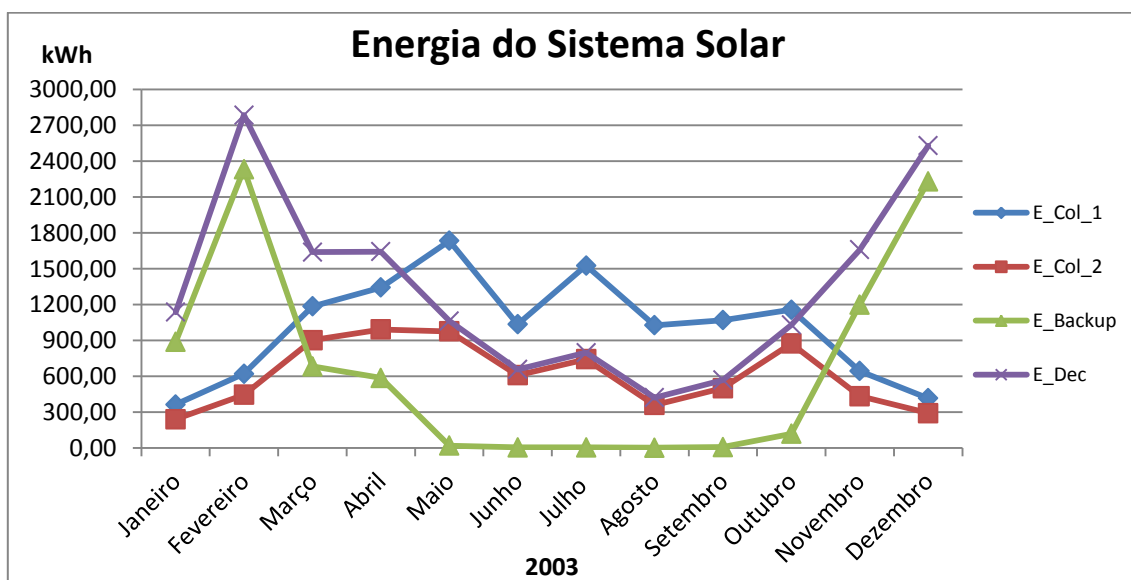


Gráfico 15: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do ano de 2003

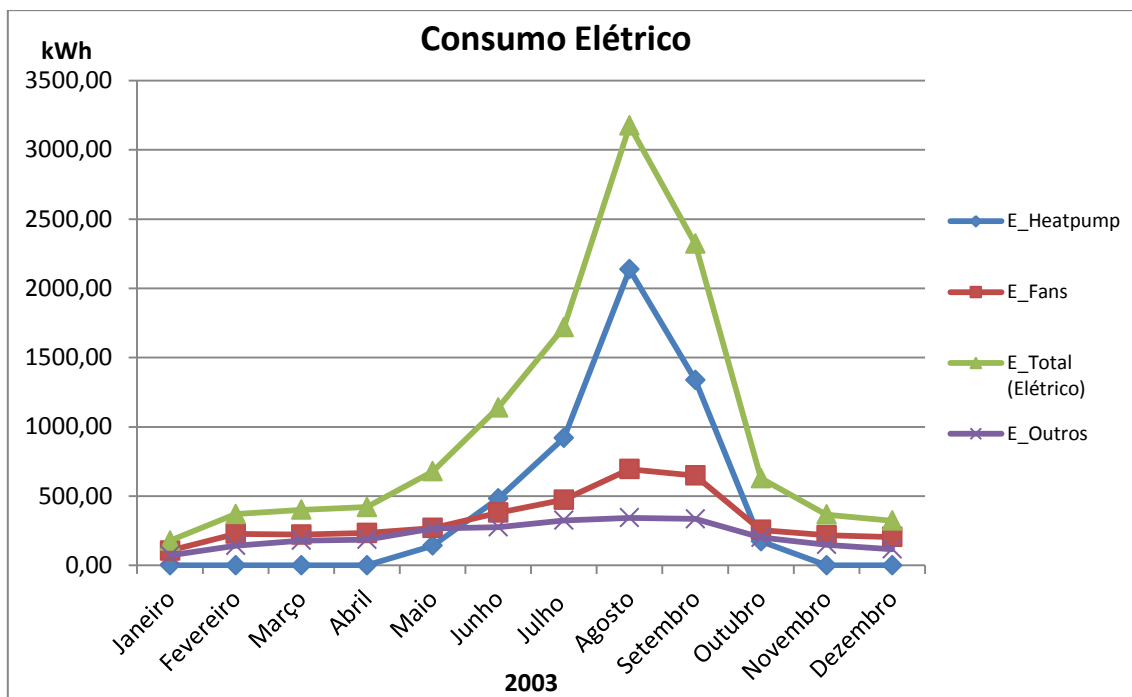


Gráfico 16: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2003

Em 2003 o mês com maior irradiação solar registada foi maio com 9203,30 kWh. No mês de junho houve uma queda, quando o expectável seria uma subida.

Em termos de energia no sistema solar da UTA, podemos verificar que neste ano, o valor máximo de E_Col_2 foi atingido em abril com 991,64 kWh seguido de maio com 974,85 kWh.

Em termos da energia fornecida pelo apoio, podemos verificar que os valores mais elevados foram atingidos nos meses mais frios. Podemos constatar também que o apoio foi pouco utilizado nos meses mais quentes. Tal não foi devido a avaria mas sim à utilização do calor libertado pelo condensador da bomba de calor para regenerar a roda exsicante.

Relativamente ao consumo elétrico podemos verificar que este ano teve um comportamento linear, com um aumento de consumo no verão e um decréscimo nos meses mais frios. A bomba de calor foi a maior consumidora de energia representando 44% do total consumido. O máximo foi atingido em agosto com 2136,74 kWh.

A ventilação foi a responsável por cerca de 34 % do consumo tendo os valores mais elevados sido registados nos meses de verão.

O restante consumo foi feito pelos restantes componentes e representou 22% do total, podendo-se verificar um aumento da energia consumida nos meses de verão.

Os gráficos seguintes são relativos aos invernos de 2003/2004 a 2005/2006, sendo que os gráficos completos desses anos encontram-se no Anexo I.

No final dos mesmos encontram-se algumas observações mais relevantes.

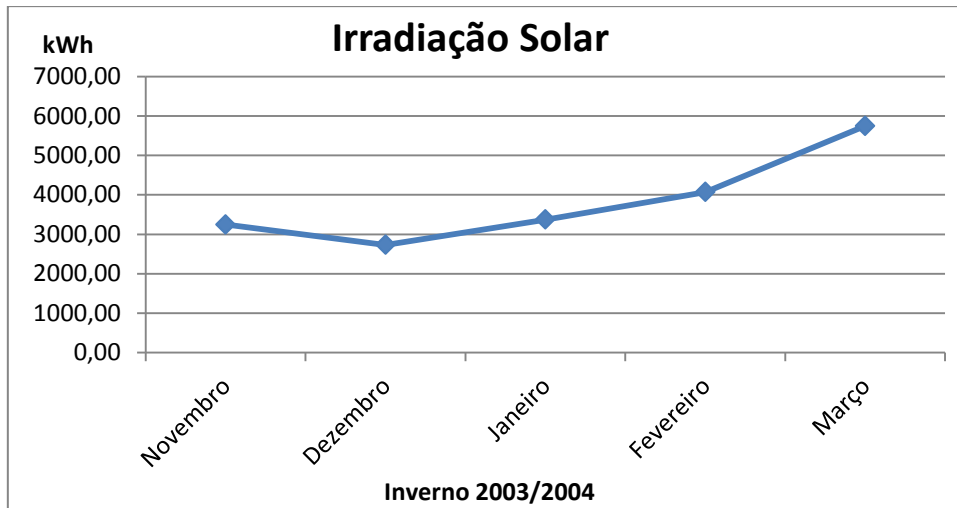


Gráfico 17: Evolução da irradiação solar ao longo do Inverno 2003/2004

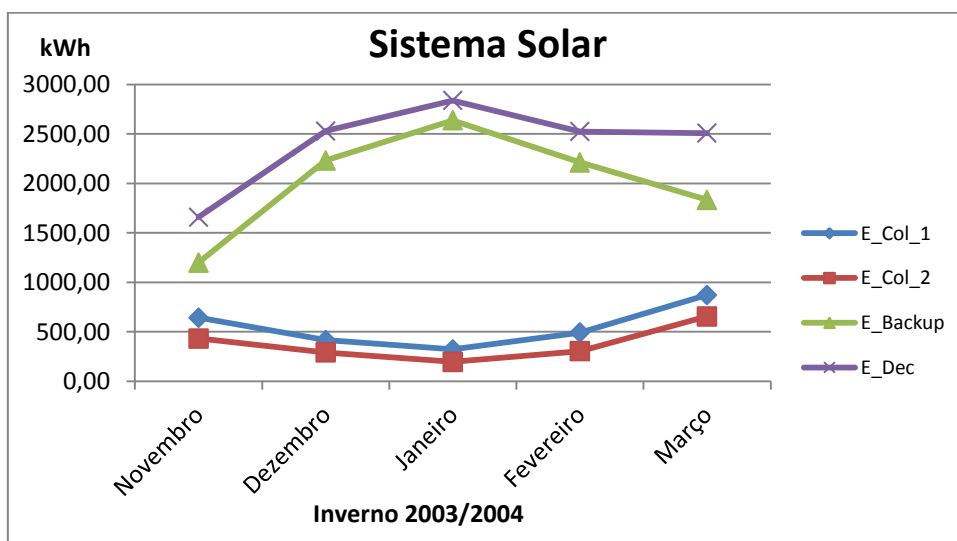


Gráfico 18: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do Inverno de 2003/2004

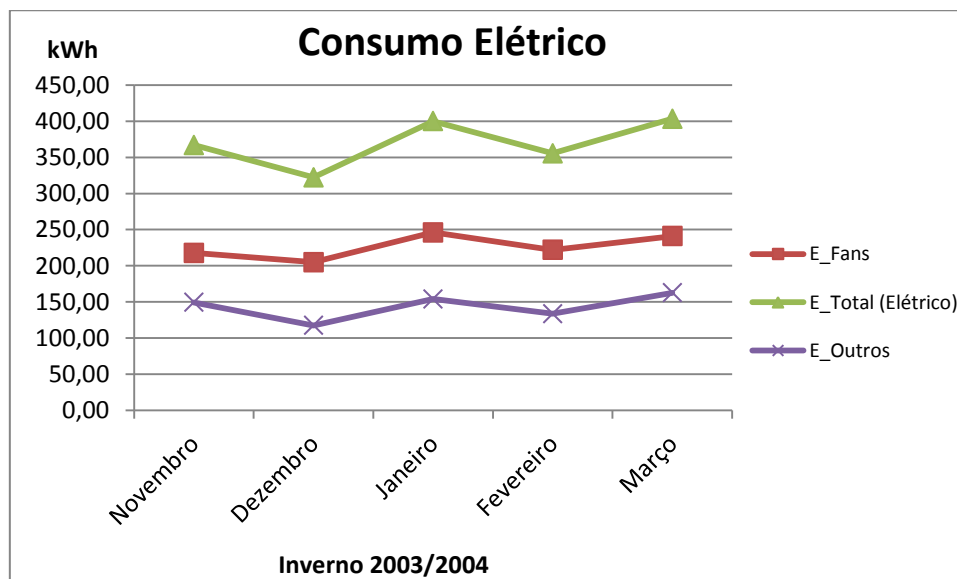


Gráfico 19: Evolução do consumo elétrico ao longo do Inverno de 2003/2004

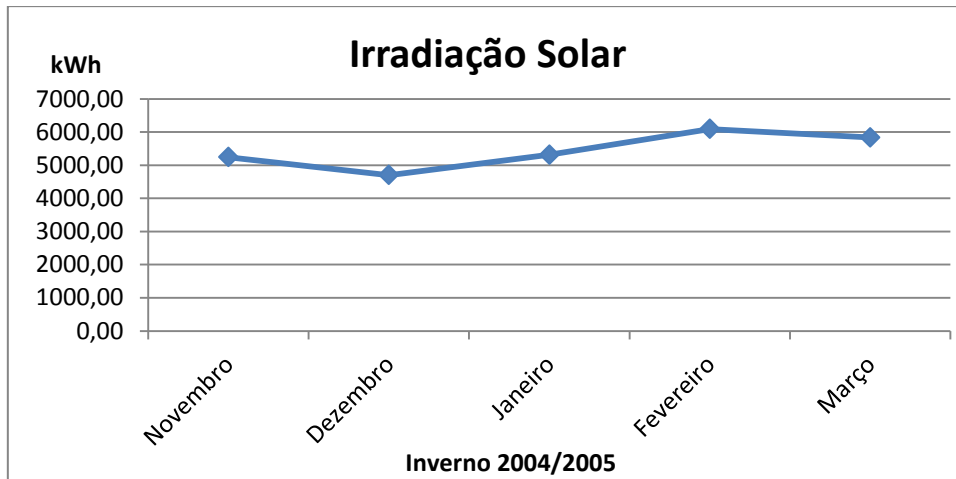


Gráfico 20: Evolução da irradiação solar ao longo do Inverno 2004/2005

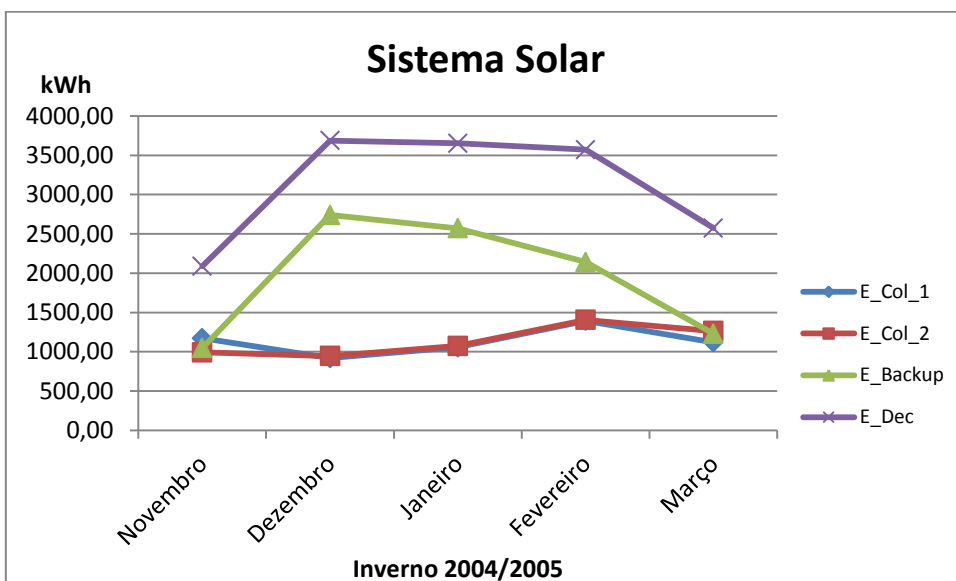


Gráfico 21: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do Inverno de 2004/2005

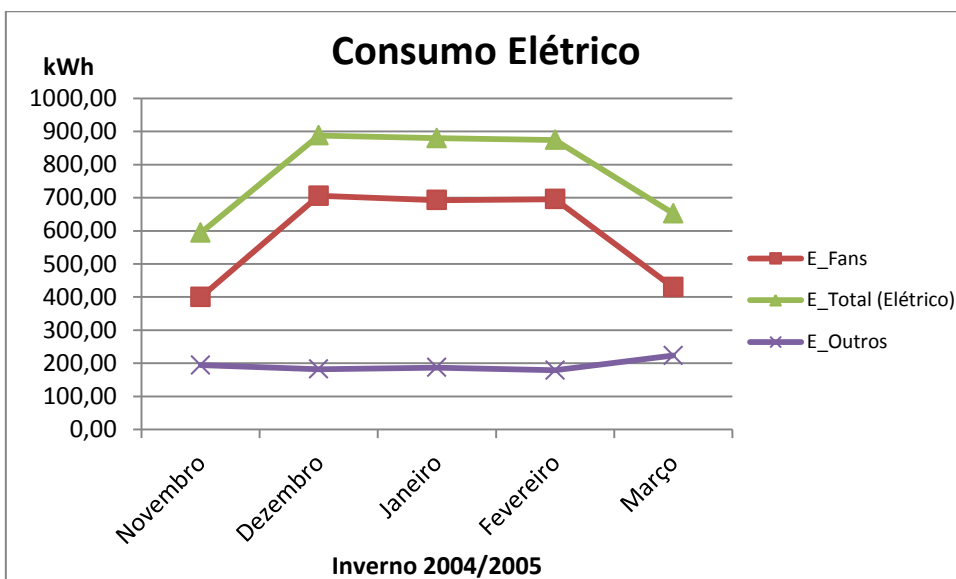


Gráfico 22: Evolução do consumo elétrico ao longo do Inverno de 2004/2005

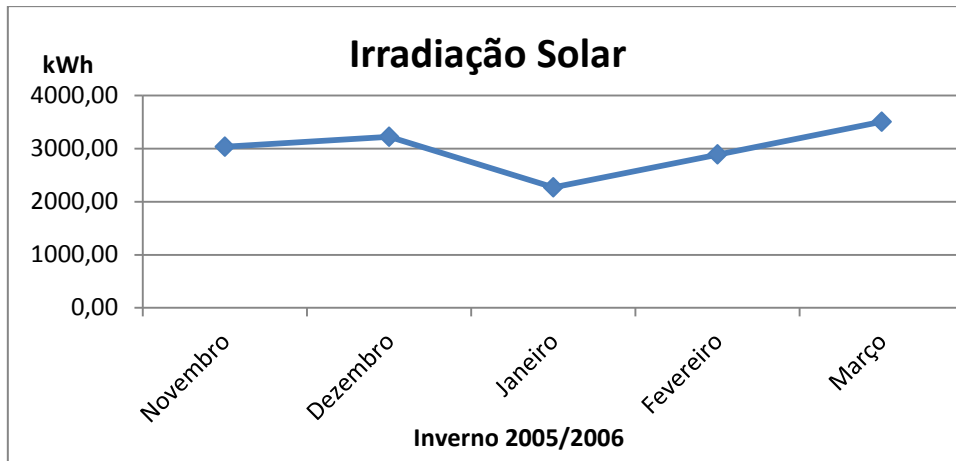


Gráfico 23: Evolução da irradiação solar ao longo do Inverno 2005/2006

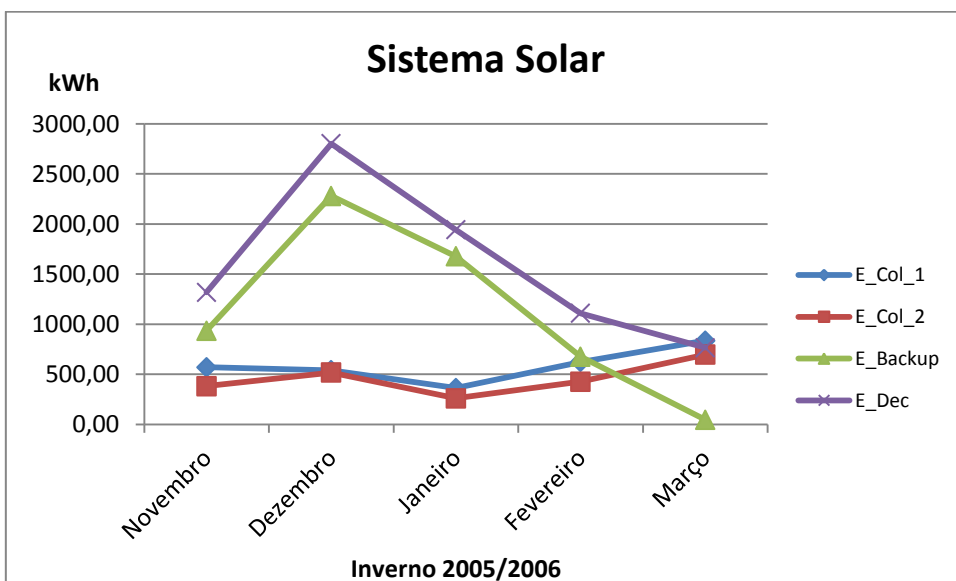


Gráfico 24: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do Inverno de 2005/2006

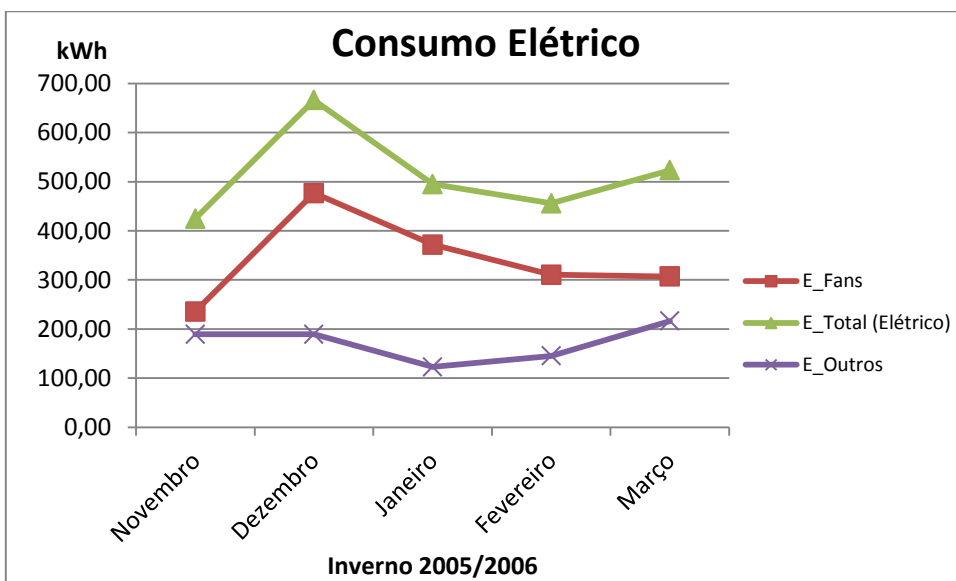


Gráfico 25: Evolução do consumo elétrico ao longo do Inverno de 2005/2006

Em termos da evolução da irradiação solar, podemos verificar que o mínimo ocorre em dezembro ou janeiro, havendo depois um aumento gradual.

Relativamente à energia fornecida pelo apoio, voltamos a verificar que os valores mais elevados foram atingidos nos meses mais frios, existindo depois uma diminuição resultante do aumento da temperatura.

Ao analisar a parte do consumo de eletricidade, verificamos que devido às necessidades de aquecimento, existe uma relação entre o aumento da ventilação e o aumento do apoio da caldeira no inverno.

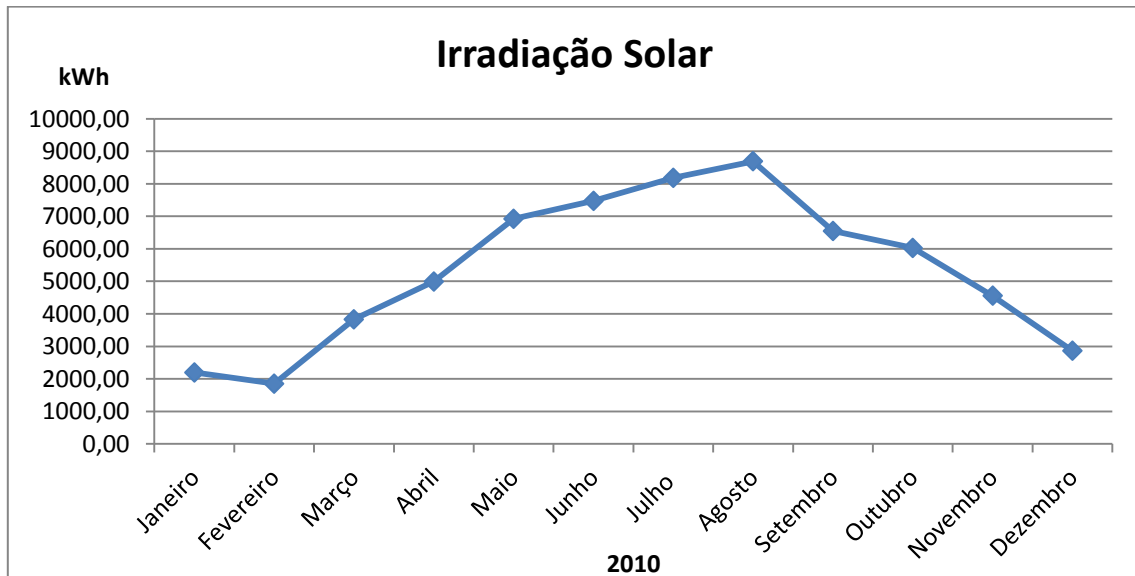


Gráfico 26: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2010

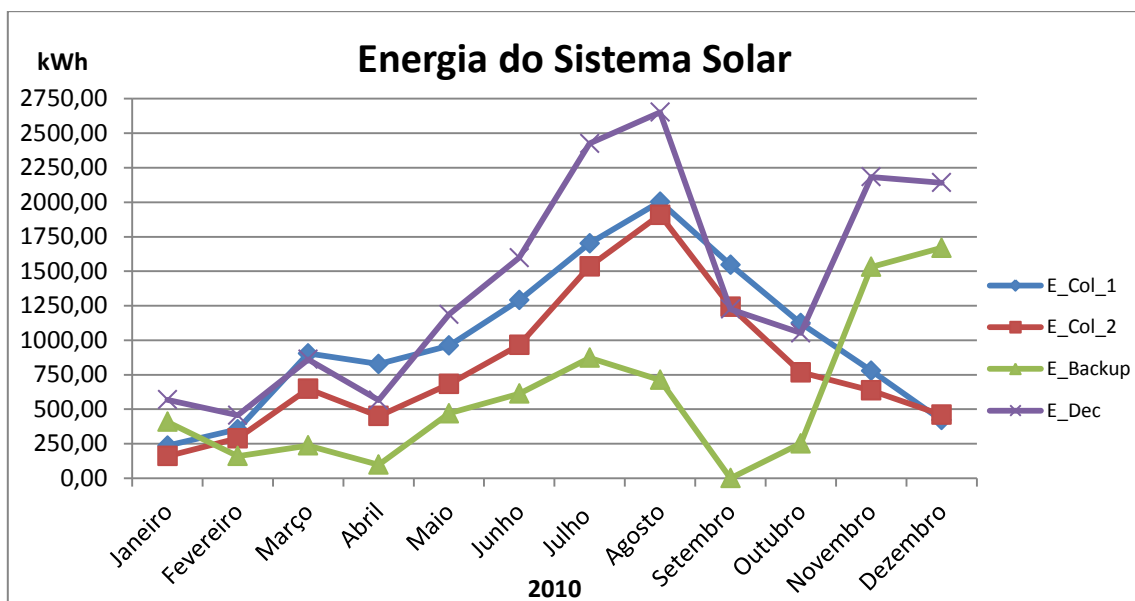


Gráfico 27: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do ano de 2010

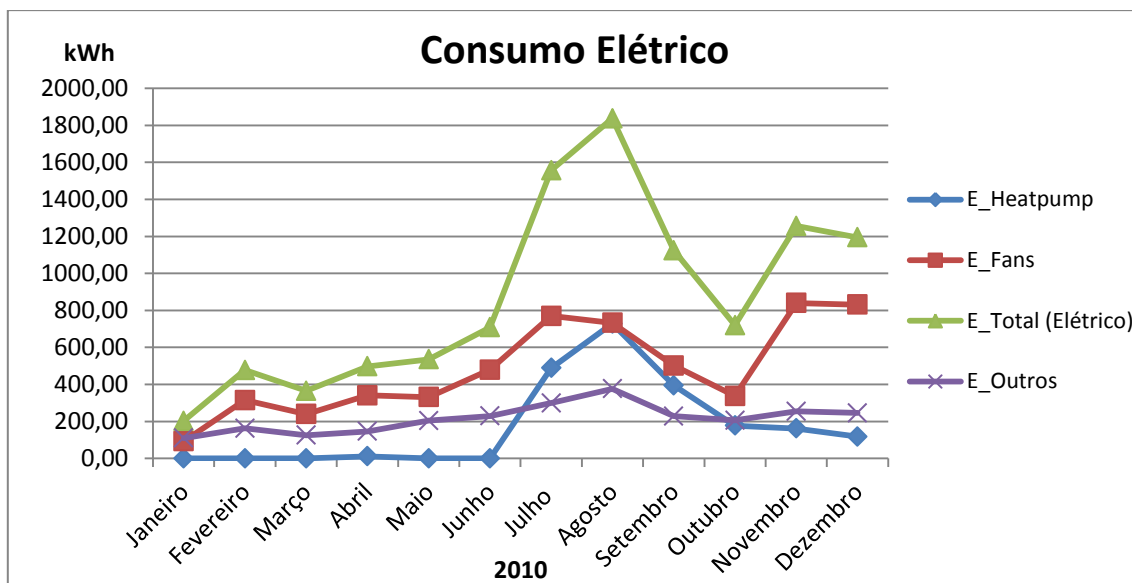


Gráfico 28: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2010

No ano de 2010 a irradiação solar teve uma evolução mais linear ao longo do ano, tendo o seu máximo sido atingido em agosto com 8689,70 kWh.

Relativamente à energia no sistema solar, podemos verificar que E_Col_2 também teve um comportamento linear, com o valor mais elevado a ser registado em agosto com 1908,94 kWh.

Já o apoio da caldeira teve o seu máximo nos meses de novembro e dezembro onde atingiu o valor de 1669,80 kWh. No verão também houve um aumento do apoio, mas neste caso foi para a regeneração da roda excicante.

Em termos de consumo elétrico, a ventilação foi o componente que mais consumiu energia neste ano, representando 55% do total. Esta teve um aumento no verão, seguido de outro aumento em novembro e dezembro. Este último aumento está ligado ao aumento do apoio da caldeira para aquecimento das salas.

A bomba de calor representou cerca de 20% do consumo total, atingindo o seu máximo em agosto com 728,26 kWh. É de realçar que em novembro e dezembro houve consumo da bomba de calor. Tal não foi devido a esta ser necessária mas sim devido a estar em modo *stand by*. O impacto desta situação irá ser abordado mais adiante.

O consumo dos restantes componentes representou cerca de 25% do total, atingindo os valores mais elevados em julho e agosto.

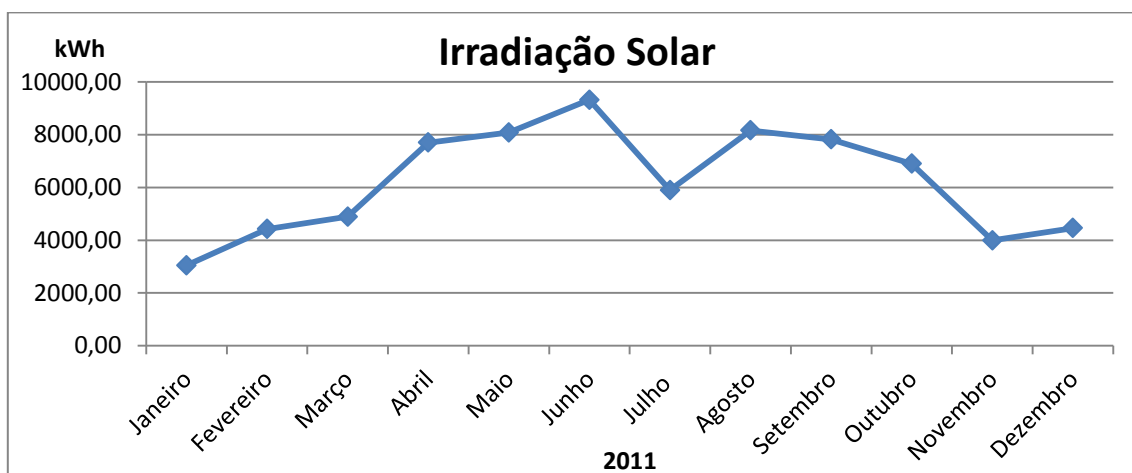


Gráfico 29: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2011

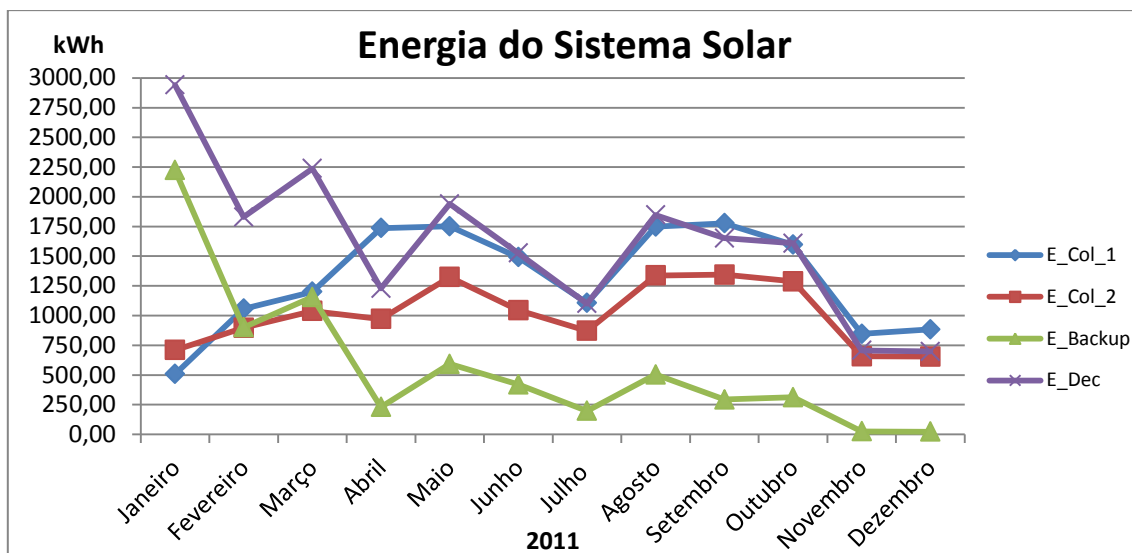


Gráfico 30: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2011

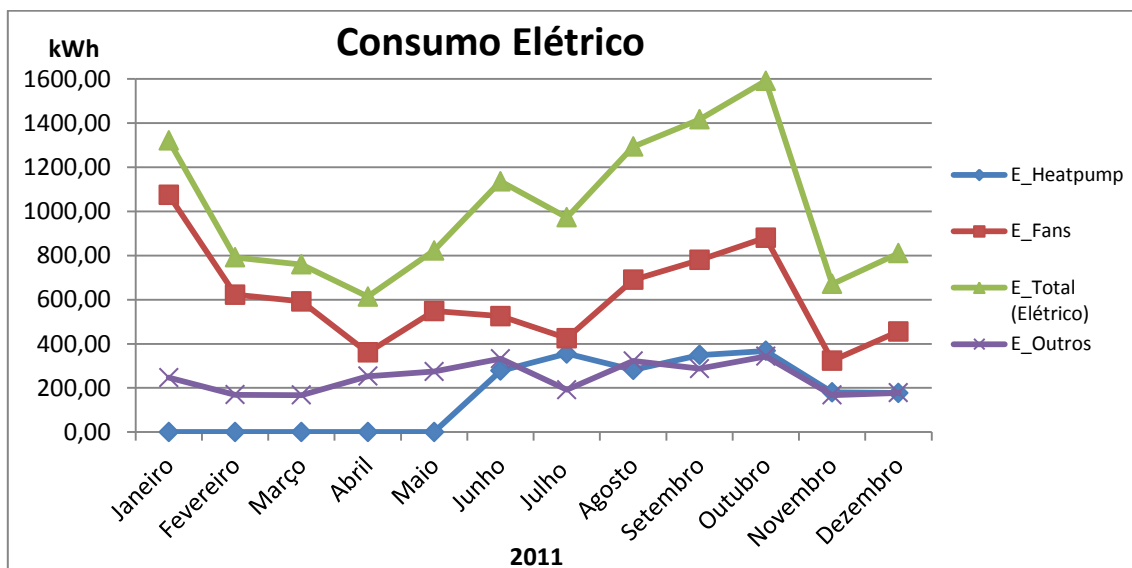


Gráfico 31: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2011

Neste ano a irradiação solar atingiu o seu máximo em junho registrando um valor de 9318,85 kWh, tendo depois um decréscimo em julho voltando depois a aumentar.

Relativamente à energia no sistema solar, E_Col_2 teve os valores mais elevados em agosto e setembro, mês onde chegou aos 1344,38 kWh.

A energia fornecida pelo apoio teve o seu máximo em janeiro com 2223,88 kWh. Em novembro e dezembro a caldeira teve problemas e praticamente não funcionou.

Em termos de consumo elétrico, a ventilação representou cerca de 60% do consumo total, com o valor mais elevado a ocorrer em janeiro com 1074,70 kWh. De agosto a outubro houve um aumento do consumo dos ventiladores.

A bomba de calor representou 16% do consumo total, atingindo o seu máximo em outubro. Em novembro e dezembro voltou a haver consumo da bomba de calor devido a estar no modo *stand by*.

O consumo dos restantes componentes representou 24% do consumo total com os valores mais elevados a ocorrerem nos meses mais quentes.

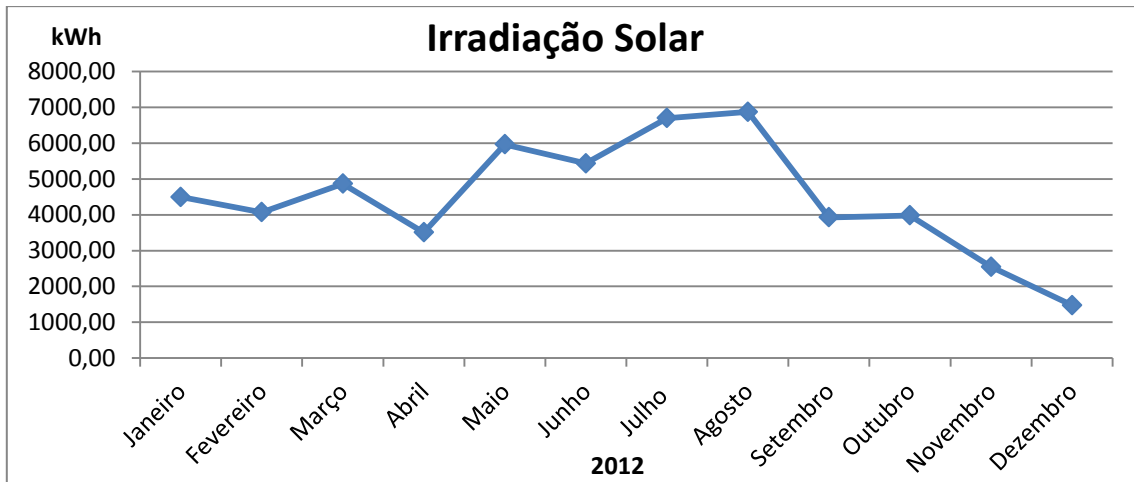


Gráfico 32: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2012

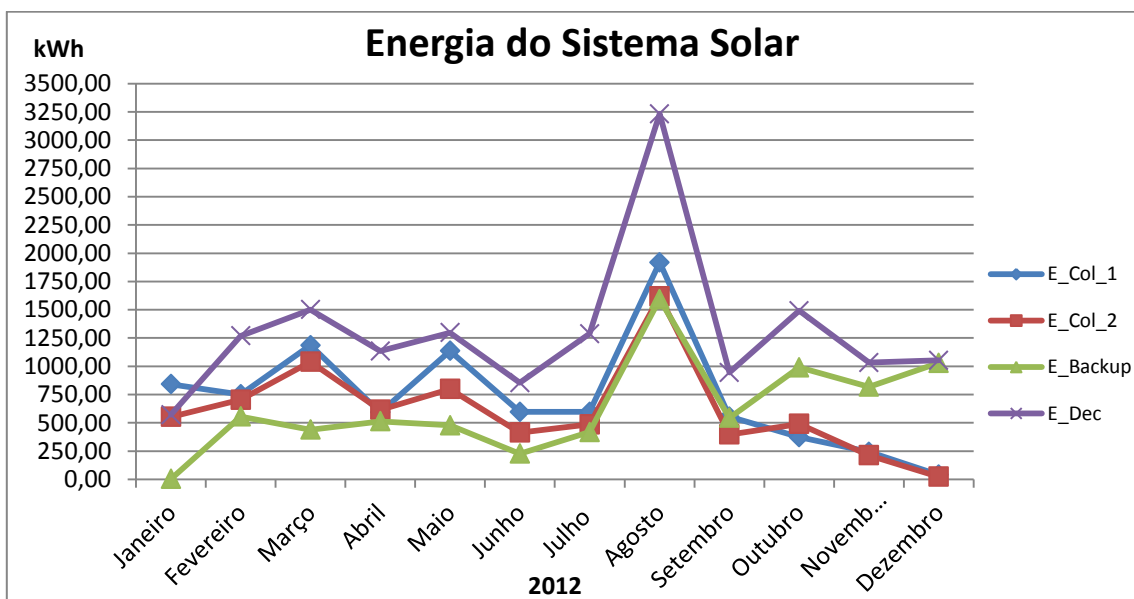


Gráfico 33: Evolução da energia no sistema solar da UTA ao longo do ano de 2012

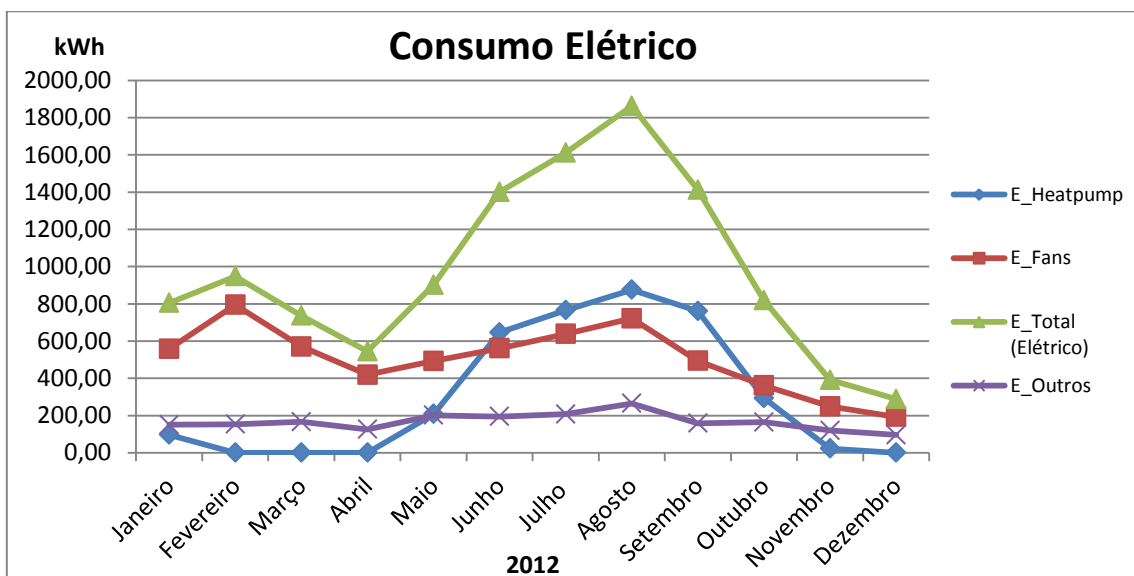


Gráfico 34: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2012

Em 2012 a irradiação solar teve um comportamento mais irregular, atingindo o valor máximo de 6872,32 kWh em agosto.

Relativamente à energia no sistema solar, E_Col_2 teve um aumento acentuado em agosto onde se registou o valor mais elevado que foi de 1619,19 kWh. Nesse mês também se registou o valor mais elevado de energia fornecida pelo apoio com 1592,74 kWh.

Em relação ao consumo elétrico, a ventilação foi o componente que mais consumiu neste ano representando cerca de 52% do consumo total. O valor mais elevado foi atingido em fevereiro com 794,59 kWh e o segundo em agosto.

A bomba de calor representou 31% do consumo total, com o seu máximo a ser atingido em agosto com 875,73 kWh. Em janeiro voltou a haver consumo da bomba de calor devido a estar no modo *stand by*.

O consumo dos restantes componentes representou 17% do consumo total com o valor mais elevado a ser atingido em agosto.

Após a análise feita anteriormente podemos efetuar uma comparação geral dos anos para justificar os dados obtidos e tirar conclusões dos mesmos.

Parte Solar:

Nos gráficos do sistema solar, podemos ver que as linhas relativas à energia fornecida pelo sol (E_Col_1 e E_Col_2) seguem quase sempre a linha da irradiação, tendo no entanto valores muito inferiores, o que é normal tendo em conta a eficiência dos coletores e as perdas nas tubagens e permutadores.

Comparando E_Col_2 com E_Backup constata-se que, como seria de esperar, se o sistema estiver a funcionar sem problemas, no verão os valores de E_Col_2 são superiores aos do apoio, devido a uma maior disponibilidade solar. No Inverno acontece o oposto, tendo sido nesta altura que se registaram os valores mais elevados do apoio da caldeira, contudo a energia fornecida pelo sol, no inverno, também consegue permitir que exista poupança energética.

No verão, no entanto, a caldeira também é necessária visto que nem sempre a energia fornecida pelo sol é suficiente para regenerar a roda exsicante. Em relação a este ponto podemos comparar o que se passou em 2003 com os anos mais recentes. Em 2003 a caldeira não foi quase utilizada no verão devido ao facto que nesse ano não existia o modo 3 nem o humidificador na secção de entrada. O que fazia com que a bomba de calor fosse ativada no modo 2. A utilização da bomba liberta calor no condensador que é utilizado em conjunto com o calor fornecido pelo sistema solar para regenerar a roda exsicante. O que neste caso era o suficiente para que não se recorresse ao apoio da caldeira. Atualmente com as alterações introduzidas a bomba de calor é menos utilizada, pelo que a caldeira é mais utilizada para a regeneração.

Parte elétrica:

Em termos de consumo elétrico, este é superior no verão, devido à utilização da bomba de calor e também ao aumento da ventilação para arrefecimento das salas. Se observarmos os gráficos podemos ver que as linhas da ventilação e as da bomba de calor têm uma evolução, normalmente, semelhante nos meses mais quentes.

A energia dos restantes elementos tem um comportamento mais linear ao longo do ano, no entanto estes também contribuem, embora em menor grau, para um aumento do consumo na época de arrefecimento, visto que o seu consumo aumenta nessa época em resultado da utilização dos humidificadores e da roda exsicante.

É normal que o aumento da ventilação volte a ocorrer no inverno, devido às necessidades de aquecimento, existindo uma relação entre esta e o apoio da caldeira, como se pode constatar bem em alguns gráficos.

No final de 2012 a curva da ventilação não acompanha a do apoio da caldeira visto que no mês de Dezembro ocorreram problemas com o funcionamento da ventilação, já referidos anteriormente.

Se compararmos o consumo da ventilação, em 2010, com o de 2011 verificamos que em 2011 houve um aumento do mesmo, resultante das alterações no seu funcionamento, nos modos - 2 e 2, e também da implementação do *free cooling*. Em 2012 também seria de esperar uma diferença maior, no entanto ocorreram, em Dezembro, os factos já mencionados anteriormente.

Podemos verificar que nos últimos anos o consumo elétrico da ventilação representou mais de 50% do total consumido.

Em relação à bomba de calor, é importante referir que o seu consumo em *stand by* não é de desprezar, pois este atinge valores de 5 e 6 kWh por dia, o que justifica os valores obtidos em novembro e dezembro de 2010 e 2011 e também janeiro de 2012, meses em que não deveria existir atividade da mesma. Nesses meses os valores vão, desde perto dos 100 kWh, até aos 180 kWh, chegando mesmo a ultrapassar, um pouco, o consumo dos outros componentes em Novembro e Dezembro de 2011. No entanto mesmo nos meses em que a bomba é necessária, existiram vários dias em que a bomba esteve ligada sem ter sido utilizada.

O gráfico e a tabela seguinte mostram os consumos da bomba de calor, ao longo dos anos em que foi possível fazer uma análise e apresentam também os respetivos valores com exclusão dos dias em que a bomba esteve em *stand by*.

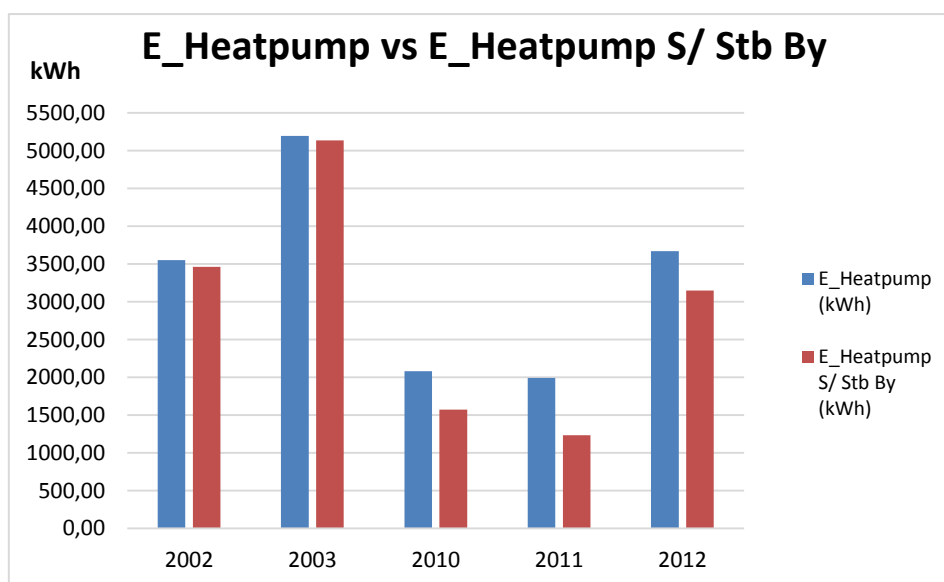


Gráfico 35: E_Heatpump vs E_Heatpump S/ Stb By

Tabela 10: E_Heatpump vs E_Heatpump S/ Stb By

	2002	2003	2010	2011	2012
E_Heatpump (kWh)	3550,00	5193,56	2078,36	1989,08	3668,71
E_Heatpump S/ Stb By (kWh)	3459,97	5134,01	1570,52	1232,31	3148,38
% consumo em Std. By	2,54%	1,15%	24,43%	38,05%	14,18%

Podemos constatar que existiram anos em que o consumo, em *stand by*, teve um peso significativo no consumo, especialmente em 2010 e 2011. Observa-se também que existiu uma redução do consumo em 2010 e 2011 que foi resultante da introdução do humidificador na secção de admissão. Em 2012 o valor voltou a aumentar devido a uma avaria no humidificador da secção de saída (que foi substituído), que fez com que fosse necessário recorrer mais à bomba de calor.

4.3.2.1. Total das diferentes energias

Nos gráficos e nas tabelas seguintes faz-se uma comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida.

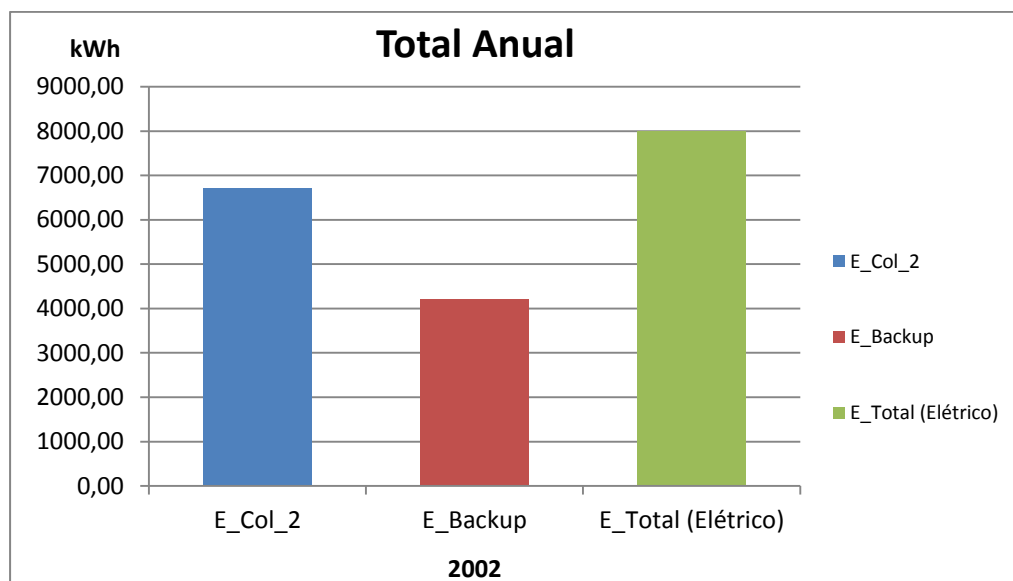


Gráfico 36: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2002

A coluna azul (E_Col_2) representa a energia fornecida pelo sistema solar (antes da caldeira, depois do depósito solar), a coluna vermelha (E_Backup) a energia fornecida pela caldeira e a coluna verde (E_Total (Elétrico)) a energia elétrica total consumida pelo DEC.

Neste ano podemos verificar que o consumo mais elevado foi da parte elétrica e que a contribuição solar foi superior à do apoio.

Tabela 11: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2002

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	6712,28	35,52
E_Backup	4202,53	22,24
E_Total (Elétrico)	7983,33	42,24
Total	18898,15	100,00

Através desta tabela, podemos saber o total energético e a percentagem em relação ao total anual. Pode-se observar que a energia fornecida pelo sistema solar representou 35,52% do total.

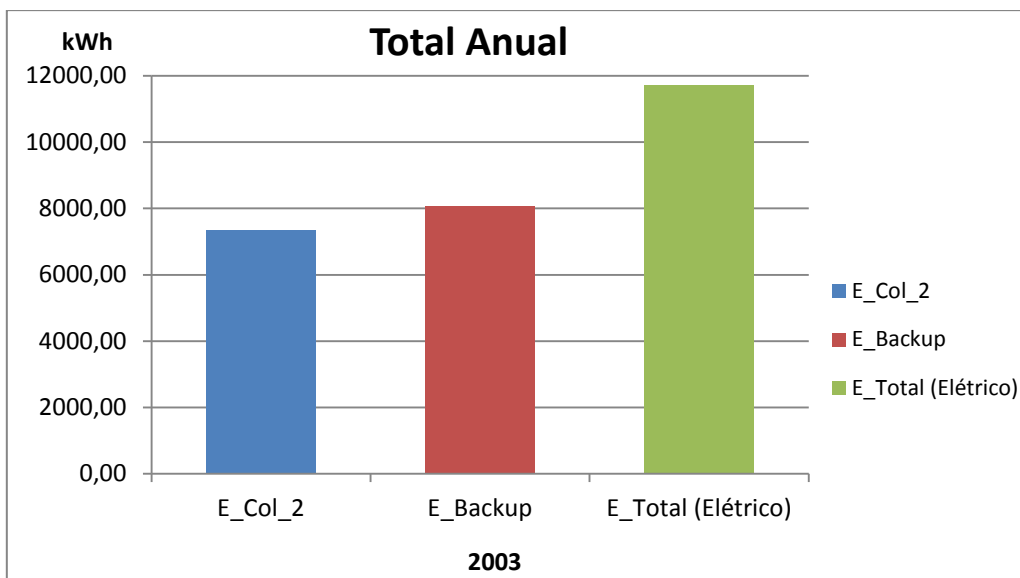


Gráfico 37: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2003

Tabela 12: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2003

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	7358,77	27,10
E_Backup	8070,20	29,72
E_Total (Elétrico)	11723,88	43,18
Total	27152,85	100,00

Os gráficos referentes aos anos de 2004 a 2006 encontram-se no Anexo II.

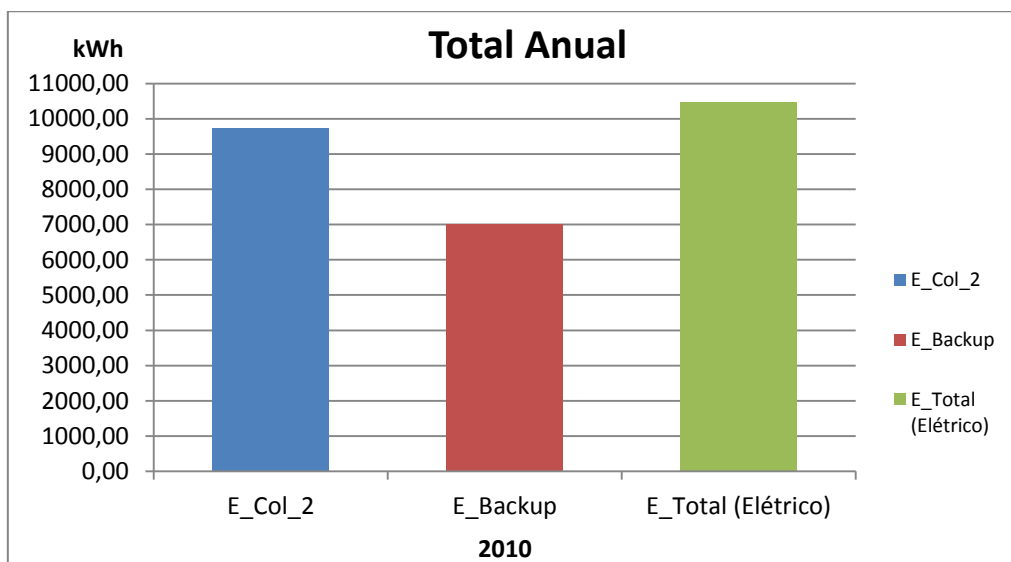


Gráfico 38: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2010

Tabela 13: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2010

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	9743,58	35,77
E_Backup	7023,44	25,78
E_Total (Elétrico)	10474,15	38,45
Total	27241,17	100,00

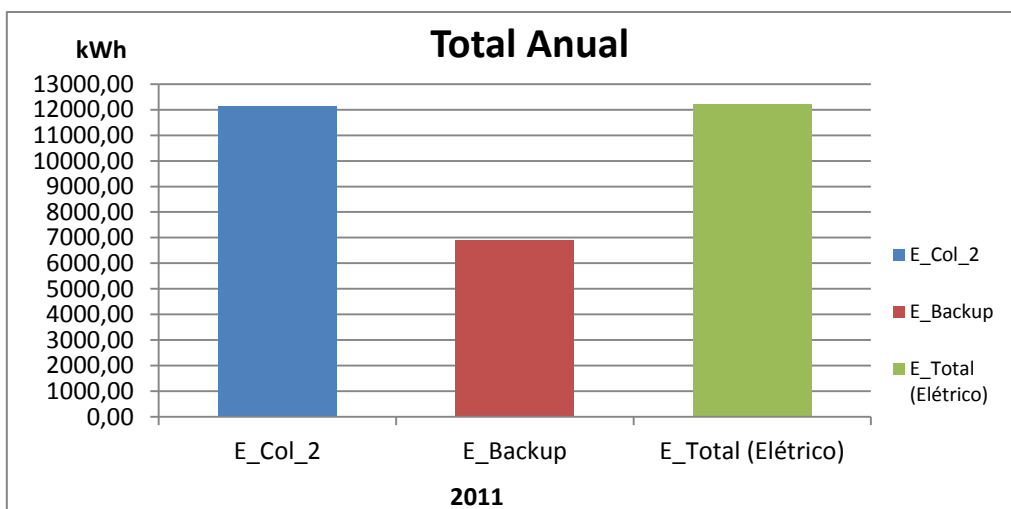


Gráfico 39: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2011

Tabela 14: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2011

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	12139,80	38,89
E_Backup	6878,63	22,04
E_Total (Elétrico)	12197,41	39,07
Total	31215,85	100,00

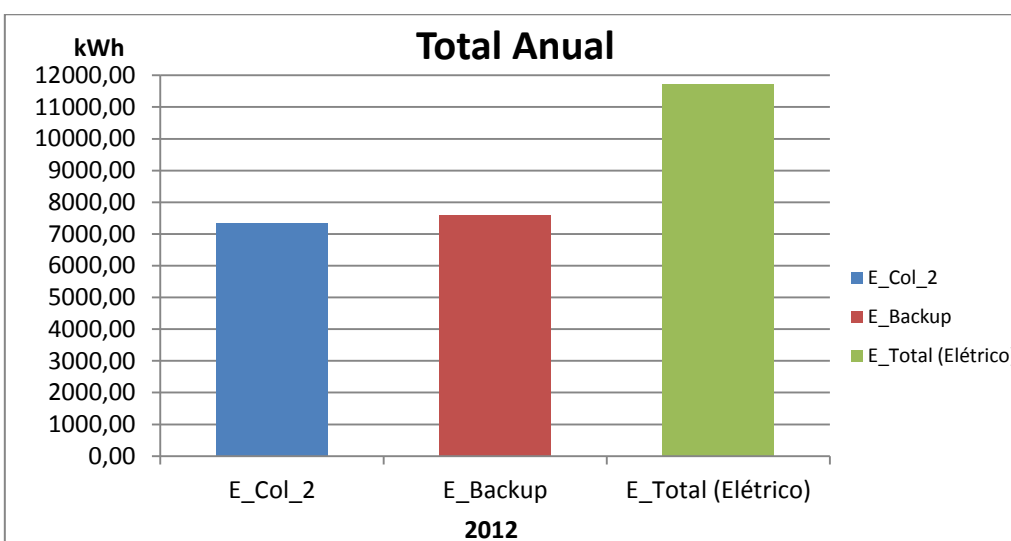


Gráfico 40: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2012

Tabela 15: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2012

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	7352,79	27,56
E_Backup	7606,61	28,51
E_Total (Elétrico)	11722,63	43,93
Total	26682,04	100,00

Ao compararmos a energia utilizada que foi fornecida pelo sistema solar com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica utilizada pelo sistema, podemos verificar que ao longo dos anos poupou-se bastante energia elétrica e também gás ao recorrer ao solar térmico.

Podemos ver que em 2002, 2010 e 2011 a energia fornecida pelo sistema solar é superior à energia fornecida pela caldeira, sendo que em 2003 e 2012 isso não acontece. É de referir que em 2012 existiu um problema que afetou o sistema solar alguns dias no fim de Junho e no início de Julho. Nesse ano também existiu um problema que afetou a UTA que fez com que a partir do final de Novembro e até ao final do ano o sistema solar praticamente não fornecesse energia. Caso não tivessem acontecido estes problemas, muito provavelmente a energia fornecida pelo sistema solar seria superior à energia fornecida pelo apoio.

Se utilizássemos a energia produzida pelos coletores para AQS em habitações com tipologia T2 ou T3 esta daria para fornecer o seguinte número de habitações:

Tabela 16: Número de habitações T2 e T3 fornecidas pela energia produzida pelos coletores para AQS

	2002	2003	2010	2011	2012
T2	3	3	4	5	3
T3	2	2	3	4	2

Para chegar aos resultados apresentados na tabela anterior, foi utilizada a fórmula seguinte que consta do RCCTE e cuja explicação se encontra no Anexo III.

$$Q_a = (M_{AQS} \cdot 4187 \cdot \Delta T \cdot n_d) / (3\,600\,000) \text{ (kWh/ano)}$$

Exemplo para um T2 em 2012:

$$Q_a = ((40 \times 3) \times 4187 \times 45 \times 365) / (3\,600\,000) = 2292,38 \text{ kWh/ano}$$

$$E_{Col_2} (2012) = 7352,79 \text{ kWh}$$

$$N^\circ T2 = 7352,79 / 2292,38 = 3$$

Os coletores foram também responsáveis pela não emissão dos seguintes valores de CO₂ para a atmosfera, calculados a partir de valores fornecidos pela EDP^[15] e pela APA^[61] que constam do Anexo IV:

Tabela 17: Emissões evitadas de CO₂ para a atmosfera

	2002	2003	2010	2011	2012
Kg CO₂ evitados	3708,96	4066,19	5383,94	6708,01	4062,88

Em termos de custos com o consumo de energia elétrica em 2012, utilizando um valor praticado pela EDP o custo foi de 1629,45 €.

Os gráficos seguintes fazem uma análise do sistema solar ao longo dos mesmos anos, através da comparação entre E_Col_2 e E_Backup e também através da fração solar.

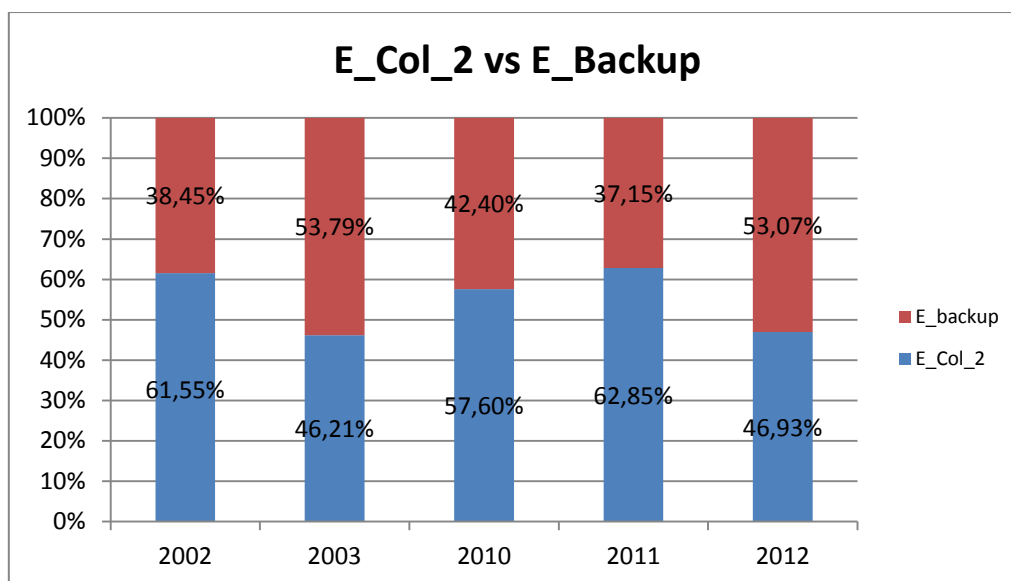


Gráfico 41: Comparação entre a energia fornecida pelo sistema solar e a energia fornecida pelo apoio em percentagem

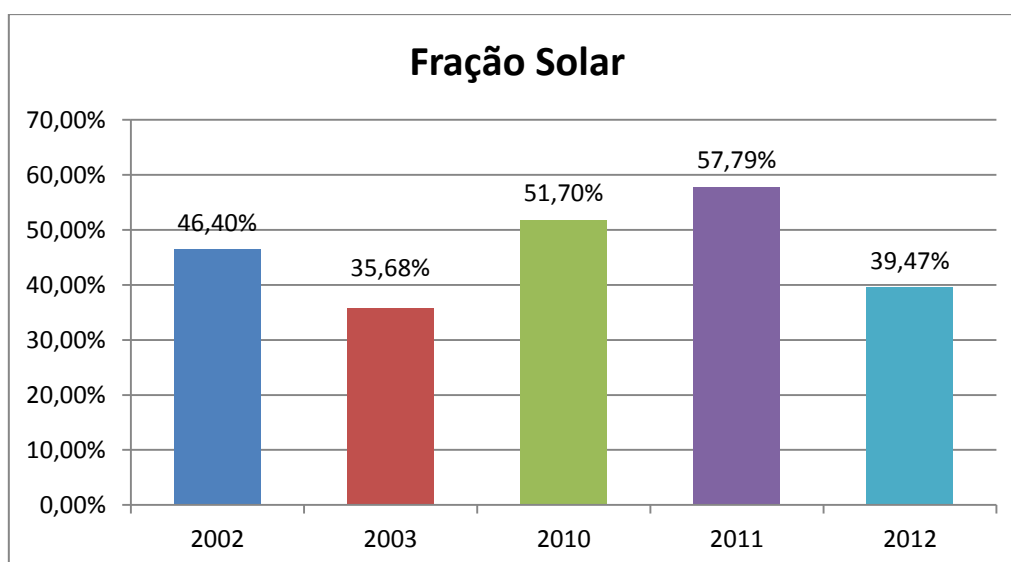


Gráfico 42: Fração solar registada ao longo dos anos

Se analisarmos a contribuição da energia fornecida pelo sistema solar à energia cedida ao sistema DEC, pelo circuito secundário, podemos comparar melhor E_Col_2 com E_Backup e verificar que o valor mais elevado ocorreu em 2011 com uma contribuição de 62,85% e o mais baixo ocorreu em 2003 com uma contribuição de 46,21%.

Em relação à fração solar, o valor mais baixo foi de 35,68%, registado em 2003. Em 2010 e 2011, os valores passaram os 50%. O aumento da fração solar em 2010 e 2011 resulta da introdução do humidificador na secção de entrada, que permitiu a redução da utilização da bomba de calor e, também, da criação, em 2011, do novo modo de funcionamento que permitiu recorrer menos vezes à bomba.

Em 2012, também seria de esperar um valor mais elevado, no entanto o problema no sistema solar, já referido anteriormente, fez com que não existisse contribuição solar numa altura em que a bomba de calor esteve em funcionamento, e em que esta foi mesmo mais requerida devido à avaria no humidificador de saída já mencionada anteriormente. Nesse ano também existiu o problema que afetou a UTA que fez com que a partir do final de Novembro e até ao final do ano o sistema solar praticamente não fornecesse energia. Estes problemas contribuíram assim para a redução da fração solar

4.3.3. Problemas detetados

Como já foi mencionado no Capítulo 3 (Trabalho Relacionado), os coletores solares perderam uma eficiência de 30% ao longo dos anos ^[76], o que é considerável. Se tivermos em conta esse valor, em 2012, os valores obtidos seriam diferentes e permitiriam reduzir a utilização da caldeira e assim aumentar a fração solar como se pode constatar na tabela seguinte:



Figura 43: Danos detetados nos coletores

Tabela 18: Comparação entre os valores com e sem perda da eficiência dos coletores

	2012	2012 (30%)
E_Col_2	7352,79	9558,63
E_Backup	7606,61	5324,63
Fração Solar	39,47%	51,52%

Foi detetado um problema no funcionamento da UTA relacionado com o caudal no circuito primário. Este faz com que após o sistema anti congelamento ter sido utilizado e também aos fins-de-semana quando o sistema está a armazenar energia no depósito, a bomba do circuito primário continue em funcionamento quando já não é necessária, apesar de o sistema ter dado a ordem de desativação. A bomba apenas desliga à hora em que o sistema todo arranca, o que no caso dos fins-de-semana é à segunda-feira, o que faz com que a bomba do circuito primário possa estar a funcionar um fim-de-semana inteiro sem ser necessária o que leva a um dispêndio de energia desnecessário. Os gráficos seguintes ilustram essas situações:

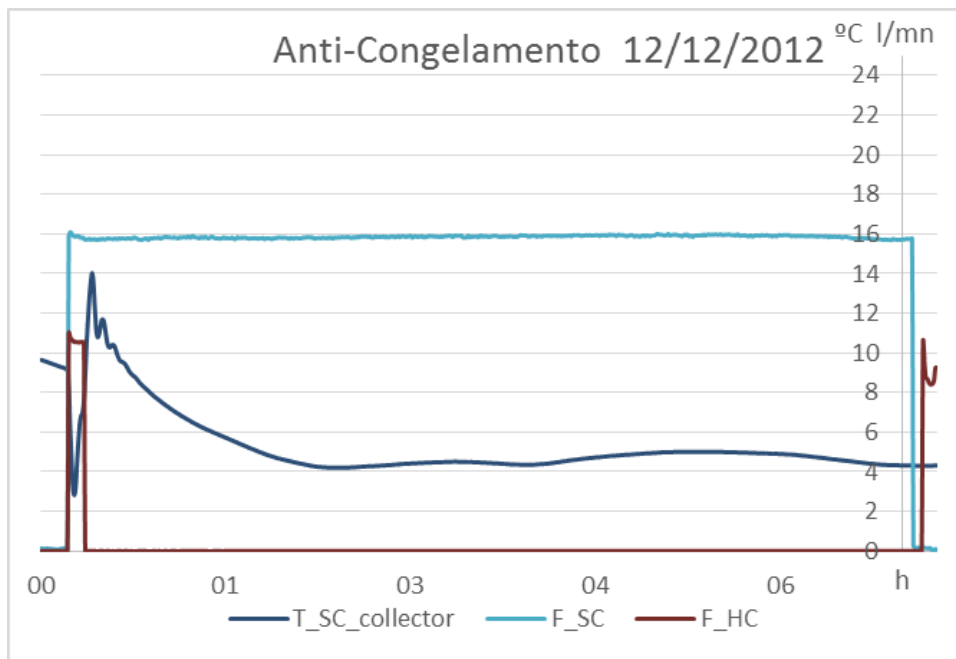


Gráfico 43: Problema com o caudal do circuito primário relacionado com o sistema de anti congelamento

No gráfico anterior podemos verificar que o sistema anti congelamento foi acionado pelas 00:15, funcionando bem ao aumentar a temperatura nos coletores quando esta desceu abaixo dos 4°C, e o pedido de desativação, como se pode ver pelo caudal do circuito secundário, foi dado pelas 00:20. No entanto o caudal do circuito primário só foi desativado quando o sistema todo foi ativado.

Os gráficos seguintes correspondem a um sábado e à segunda-feira seguinte e podemos verificar que F_SC foi ativado sábado de manhã e apenas foi desativado na segunda-feira quando o sistema foi iniciado:

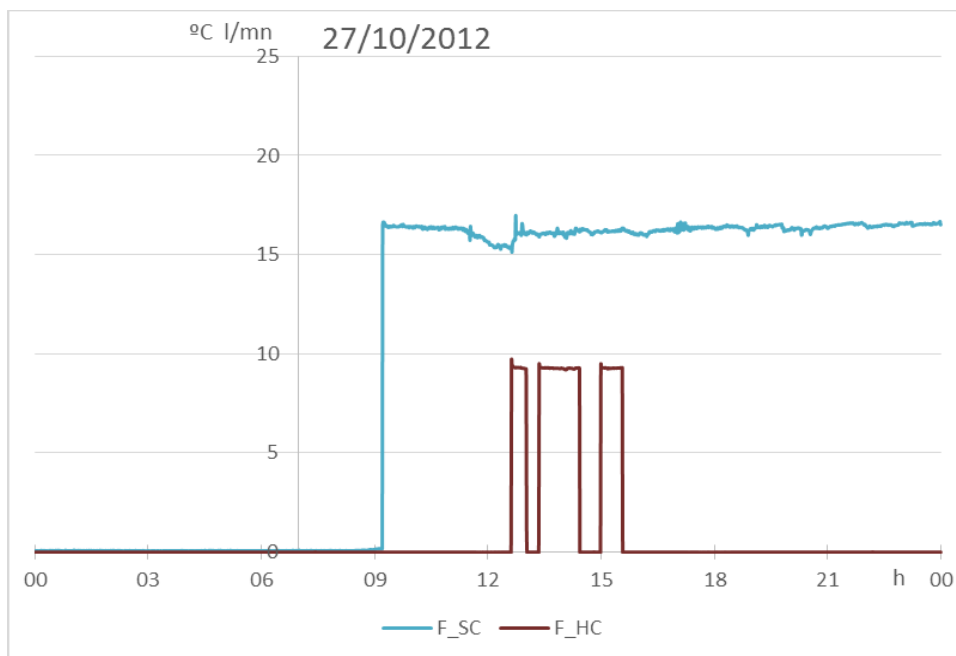


Gráfico 44: Problema com o caudal do circuito primário relacionado com o sistema de armazenamento de energia

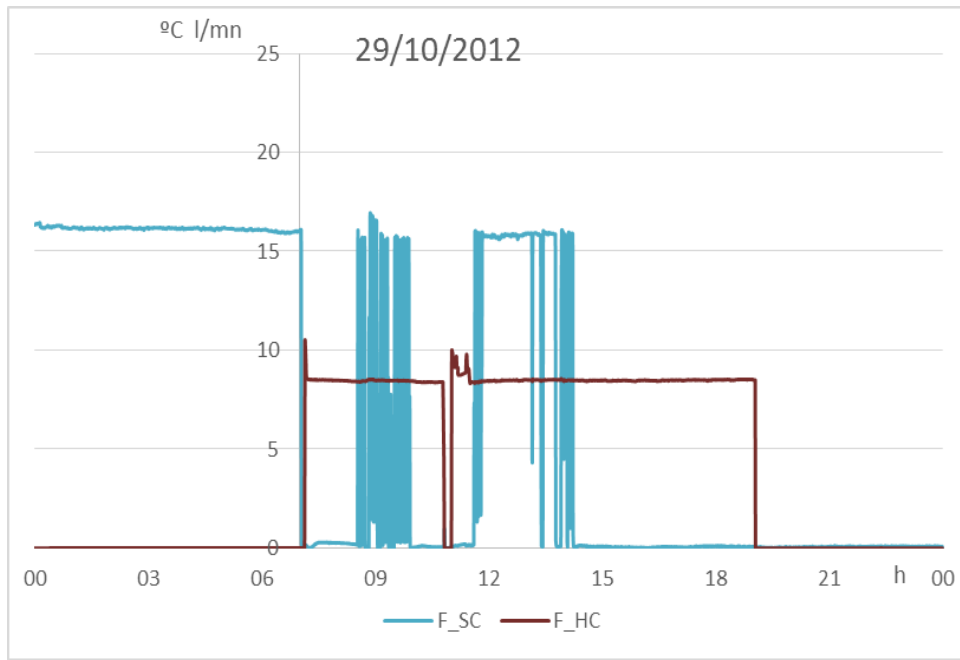


Gráfico 45: Problema com o caudal do circuito primário relacionado com o sistema de armazenamento de energia (continuação)

5. Conclusão

Através desta dissertação, em que fiz uma análise detalhada dos primeiros dez anos de funcionamento do sistema experimental UTA/DEC, foi possível concluir, tanto ao nível do conforto obtido, como ao nível energético, o seguinte:

Após a análise dos diversos gráficos e tabelas, apresentados nesta dissertação, concluí que o sistema de climatização obteve, na grande maioria dos dias, valores de temperatura e humidade dentro dos intervalos pretendidos, atingindo-se assim os parâmetros de conforto térmico que se consideram adequados para os seus ocupantes.

Relativamente à temperatura, esta esteve, na grande maioria das vezes, conforme foi analisado no Capítulo 4.3.1. Análise da Temperatura e Humidade), dentro dos parâmetros recomendados para o conforto térmico, abordados no Capítulo 2.4 (Conforto Térmico).

Ao analisar os dias em que os valores de temperatura pretendidos não foram atingidos, estes estão, geralmente, ligados a problemas do sistema. Mais concretamente, no Inverno, quando as necessidades de aquecimento não foram satisfeitas, obtendo-se temperaturas inferiores a 19°C (como se pode verificar na Tabela 8 referente ao ano de 2011), tal ficou a dever-se, maioritariamente, a problemas decorrentes de um deficiente funcionamento da caldeira a gás, embora, num número muito reduzido de vezes, também se tenha ficado a dever a problemas decorrentes de um deficiente funcionamento da ventilação (vide ano de 2012). Esta dependência da caldeira, durante o Inverno, já era de prever devido à menor energia disponibilizada pelo sol nessa altura do ano.

Quando não existem problemas no funcionamento da caldeira pode constatar que, quando é requerida pelo sistema, esta tem uma resposta rápida, e muito eficaz.

No verão a caldeira é necessária para a regeneração da roda exsicante, visto que nem sempre a energia solar consegue atingir as temperaturas necessárias. Nesta época do ano, nos dias em que a temperatura das salas esteve mais elevada, atingindo valores acima dos 27°C, tal ficou a dever-se a problemas com o funcionamento da bomba de calor, como aconteceu nos anos de 2005 (Tabela 5) e 2006 (Tabela 6).

Ao longo dos anos tinha-se verificado que um dos fatores que contribuía para não se conseguir obter os valores de temperatura pretendidos foi o facto das portas dos gabinetes se manterem abertas, em virtude do corredor de acesso a estas portas ser muito próximo da entrada exterior do edifício. No entanto, durante o período de estágio, concluí que esta situação se encontrava, praticamente, superada visto que, quando procedi à observação deparei-me, muito poucas vezes, com portas de gabinetes abertas, e olhando para os valores obtidos em 2012 (Tabela 9), pude observar que, em nenhum dos dias, a temperatura ultrapassou os 26°C.

Relativamente à humidade esta esteve, na grande maioria das vezes, conforme foi analisado no Capítulo 4.3.1. Análise da Temperatura e Humidade), dentro dos parâmetros aceitáveis para o conforto térmico e, se nos basearmos na Norma 7730, verificamos que, em mais de 93% dos dias, estão dentro do intervalo recomendado pela mesma (com a exceção de um ano). Poder-se-ia experimentar ativar a rotina de controlo de humidade referida no Capítulo 4.2. Descrição do Sistema de Monitorização e Controlo), mudando o limite para os 30%, no entanto, ter-se-ia que testar se a solução é viável porque ao ativar o humidificador a temperatura irá baixar fazendo com que seja necessário recorrer mais ao apoio da caldeira o que consumirá mais energia.

Em relação à bomba de calor, pôde-se constatar que, primeiro com a introdução do humidificador na secção de admissão, e depois com a criação de um novo modo de arrefecimento em que a bomba passou a ser somente utilizada quando o arrefecimento exsicante evaporativo não consegue atingir a temperatura pedida, conseguiu-se reduzir bastante o seu tempo de funcionamento e, conseqüentemente, o seu consumo elétrico, aumentando assim a fração solar, como se pode ver no Gráfico 35 e no Gráfico 42.

No entanto, através da análise dos dados e dos cálculos que efetuei, pude constatar que o consumo da bomba em *stand-by* é considerável, como se pode verificar na Tabela 10, problema que deve ser tido em conta com vista a tentar procurar uma alternativa que permita que seja o sistema a ligar a bomba quando tal for necessário.

As diversas alterações efetuadas foram então positivas e mostraram que o sistema exsicante evaporativo consegue atingir as condições de conforto necessárias, sem requerer tanto a bomba de calor como inicialmente acontecia.

Considero ser importante substituir os coletores danificados, de modo a aproveitar mais a energia solar, como se pode ver na Tabela 18, reduzindo o recurso ao apoio, sobretudo no verão, aumentando, assim, a fração solar, bem como a eficiência energética, o que também evitaria, ainda mais emissões de CO₂ para a atmosfera do que as constantes na Tabela 17. Poderia, ainda, realizar-se um estudo mais aprofundado dos coletores para se poder verificar, por exemplo, se são os mais adequados, efetuando-se uma comparação com outros sistemas DEC instalados.

Considero também ser importante conseguir reparar um erro que detetei, que faz com que a bomba de circulação do circuito primário continue a funcionar após o sistema anticongelante ter sido acionado, e que permaneça a funcionar durante o fim-de-semana, quando já não é necessária, como é bem visível, do Gráfico 43 ao Gráfico 45.

Teria sido interessante efetuar uma comparação com os consumos de uma UTA “tradicional” mas, apesar das tentativas, não foi possível obter esses dados, que solicitei mas que não me foram fornecidos. No entanto seria importante que futuramente este estudo venha a ser feito.

A UTA teve alguns problemas, referidos no Capítulo 4.3. Análise do desempenho da UTA), ao longo dos anos em que foi baseado este estudo, que não permitiram uma análise que abrangesse um maior número de anos de funcionamento. Estes problemas têm uma maior tendência para ocorrer no verão, o que é normal, porque é quando existem mais componentes em funcionamento, o que origina uma maior probabilidade de falhas.

Dado o seu carácter experimental, do que decorre que existam poucas unidades no mundo, como foi abordado no Capítulo 3 (Trabalho Relacionado), é normal que surjam problemas decorrentes do aparecimento de situações inesperadas, que exigem um maior tempo para sua resolução do que o exigível para a resolução dos problemas de uma UTA “tradicional”. Este carácter experimental vem permitindo que, ao longo dos anos, se venha procedendo a alterações com o intuito de se ir testando as melhores soluções para um melhor funcionamento da UTA. Apesar dos problemas detetados pode-se constatar, nesta dissertação, que a UTA, quando está em pleno funcionamento atinge, facilmente, os níveis de conforto desejados.

Com este trabalho pretendi fornecer uma contribuição para o estudo deste sistema, com o objetivo de que venha a ser utilizado, em futuros trabalhos, com vista à melhoria do seu funcionamento.

6. Perspetivas Futuras.

Substituir os coletores solares CPC que estão danificados, de modo a aumentar o rendimento global do sistema solar e/ou efetuar um estudo mais aprofundado dos coletores para poder verificar por exemplo se são os mais adequados fazendo uma comparação com outros sistemas DEC instalados;

Melhorar os valores que são apresentados no Excel de modo a que, por exemplo, não se possam registar valores negativos quando tal não é possível, como aconteceu para valores da energia proveniente do apoio e da energia solar e também da parte elétrica;

Efetuar uma comparação com os consumos de uma UTA “tradicional” com vista a que se tenha uma noção do que se pode poupar em níveis energéticos;

Procurar uma alternativa que permita evitar o consumo desnecessário de energia da bomba de calor em *stand-by*.

Reparar o erro que faz com que a bomba de circulação do circuito primário, após o sistema anticongelante ter sido necessário continue a funcionar quando já não é necessária.

7. Bibliografia

- [1]: *Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico*. Agência Portuguesa do Ambiente, 2009.
- [2]: <http://www.epa.gov>
- [3]: Araújo A., 2010. *Uso eficiente de água em piscinas públicas. Efeito na redução dos GEE*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- [4]: <http://www.wwf.pt>
- [5]: Hansen, et al. 2008;
- [6]: Huesemann, 2006
- [7]: Wheeler, D., 2012. “*Energy+ Country Performance Ratings 2001–2010*”.
- [8]: <http://www.energybulletin.net>
- [9]: *Relatório do Estado do Ambiente (REA)*, 2012. Agência Portuguesa do Ambiente,.
- [10]: <http://www.edificioseenergia.pt>
- [11]: <http://www.dgeg.pt>
- [12]: <http://europa.eu>
- [13]: <http://www.cm-cascais.pt>
- [14]: <http://www.aream.pt>; AREAM - Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira
- [15]: www.edp.pt
- [16]: <http://www.ageneal.pt>; AGENEAL - Agência Municipal de Energia de Almada
- [17]: *Radiação Solar. Atlas de Portugal*, 1988. Elaborado pelo grupo de trabalho do Atlas. Secretaria de Estado e do Ambiente e dos Recursos Naturais,
- [18]: Peixoto, J. Pinto, 1981. *A Radiação Solar e o Ambiente. Ambiente e o Homem*, Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa
- [19]: <http://www.proclira.uevora.pt>, Projeto PROCLIRA - Clima e Ambiente - da Universidade de Évora.
- [20]: *Guia de boas práticas de medidas de utilização racional de energia (ure) e energias renováveis (er)* - Projecto RENOVARE, Programa da União Europeia INTERREG IIIA (Portugal – Espanha, Cooperação Transfronteiriça)
- [21]: <http://solargis.info>
- [22]: Borges, 2011. *Painéis solares para produção de água quente*;
- [23]: <http://www.energia-solar.com.pt/>
- [24]: Vieira. S, 2008; *Funcionalização de nanomateriais para aplicações em conversão térmica de energia solar*, Faculdade de Ciências
- [25]: <http://www.lusosol.com>
- [26]: Roriz, L. 2009. *Climatização de Edifícios*. IST
- [27]: Miranda, M., 2008. *Optimização de Sistemas Solares Térmicos*
- [28]: <http://www.adene.pt>
- [29]: <http://www.energiasrenovaveis.com>
- [30]: <http://www.voltimum.pt>

- [31]: <http://www.sunflower-solar.com/>
- [32]: Mendes, J.F. 2010. Material fornecido nas aulas de energia Solar Térmica
- [33]: <http://www.vensol.pt>
- [34]: Guia para Instaladores de Colectores Solares
- [35]: <http://www.renewablesb2b.com>
- [36]: Guia: *A Climatização Solar*. Elaborado com o apoio da Comissão Europeia (Direção - Geral para a Energia e Transportes) da Região Rhône-Alpes e da Câmara Municipal de Sintra.
- [37]: Gonçalves, H. e Graça, J., 2004. *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*
- [38]: Teresa Patrocínio Construlink, 2006 FICHA TÉCNICA, Arquitectura Bioclimática
- [39]: <http://www.baukultur.pt>
- [40]: ASHRAE
- [41]: <http://www.coolair.pt/>
- [42]: <http://www.fisair.com/>
- [43]: <http://www.iea-shc.org/> (International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme)
- [44]: Mateus, T., 2007. *Estudo de sistemas solares de arrefecimento usando bombas de calor de absorção*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- [45]: www.estif.org (European Solar Thermal Industry Federation)
- [46]: Sousa, B., 2011. *Modelação de um sistema de refrigeração por absorção*
- [47]: <http://www.isep.ipp.pt/>
- [48]: Althouse, A D. *et al*, 2004 - *Modern Refrigeration and Air Conditioning*. Illinois: The Goodheart-Wilcox Company, Inc
- [49]: <http://www.solair-project.eu/> (Solair: Best Practice Catalogue on Successful Running Solar Air-Conditioning Appliances)
- [50]: Ribeiro F., 2010. *Avaliação de Sustentabilidade Energética em Edifícios com Arquitecturas Polimórficas*
- [51]: Constantinos A. *et al*, 2007, Solar air conditioning in Europe - an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 299–314
- [52]: In Infopédia. 2003-2013. Porto Editora
- [53]: In Ibercivis, 2013
- [54]: <http://www.gbunet.de/>
- [55]: Hausen, H. *et al*, 1935. *Air conditioning system*, USA, Patent 1,994,515.
- [56]: Miller, E. B. *et al*, 1933. *Rotary adsorber unit*, USA Patent 1,912,784.
- [57]: NREL, 1992. *Desiccant cooling - State-of-the-Art Assessment*, National Renewable Energy Laboratory
- [58]: <http://www.who.int>
- [59]: Águas, M. 2000/01. *Conforto térmico*, Métodos Instrumentais em Energia e Ambiente
- [60]: EN ISO 7730
- [61]: <http://www.apambiente.pt/>
- [62]: <http://www.dgs.pt/>

- [63]: Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE)
- [64]: D.L. 79/2006 de 4 de Abril Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)
- [65]: Silva, P. 2006, *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*, Universidade do Minho
- [66]: <http://archive.iea-shc.org/task38/>
- [67]: <http://www.medisco.org>
- [68]: Bourdoukan, P. *et al*, 2008. *A Sensitivity Analysis Of A Desiccant Wheel*
- [69]: Beccali, M. *et al*, 2008. *Monitoring of a solar desiccant cooling system in Palermo (Italy). First Results and Test Planning*
- [70]: www.dream.unipa.it/ (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali)
- [71]: Mendes, J.F. *et al*, 2002. *Sistema de demonstração com energia solar e tecnologia DEC para arrefecimento ambiente instalado na Universidade Americana da Arménia*
- [72]: Mendes, J.F. *et al*. 2002. UTA com arrefecimento exsicante evaporativo e integração de energia solar
- [73]: Mendes, J.F. *et al*. 2009; *Desiccant evaporative cooling technology assisted by solar energy. Results of air handling unit installed at DER/INETI*
- [74]: Pereira, A., 2010. *Monitorização e caracterização de uma UTA com tecnologia exsicante-evaporativa assistida por energia solar de acordo com a metodologia definida no âmbito da AIE SHC Task 38*
- [75]: Correia, T., 2011. *Estudo de Funcionamento de um Sistema de Arrefecimento Exsicante-Evaporativo assistido por Energia Solar*
- [76]: Reis, A., 2012. *Aplicação de um sistema solar térmico a uma unidade de climatização em Portugal*
- [77]: Henning, H.M., 2004. *Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings – A Handbook for Planners*, Springer Wien/NewYork
- [78]: Software “Agilent VEE Pro”
- [79]: <http://raee.org/> (Rhônalpénergie-Environnement)
- [80]: Manual do Sistema DEC

Todas as figuras sem legenda são da autoria de Mário Atalayão Valença

Anexos

Anexo I

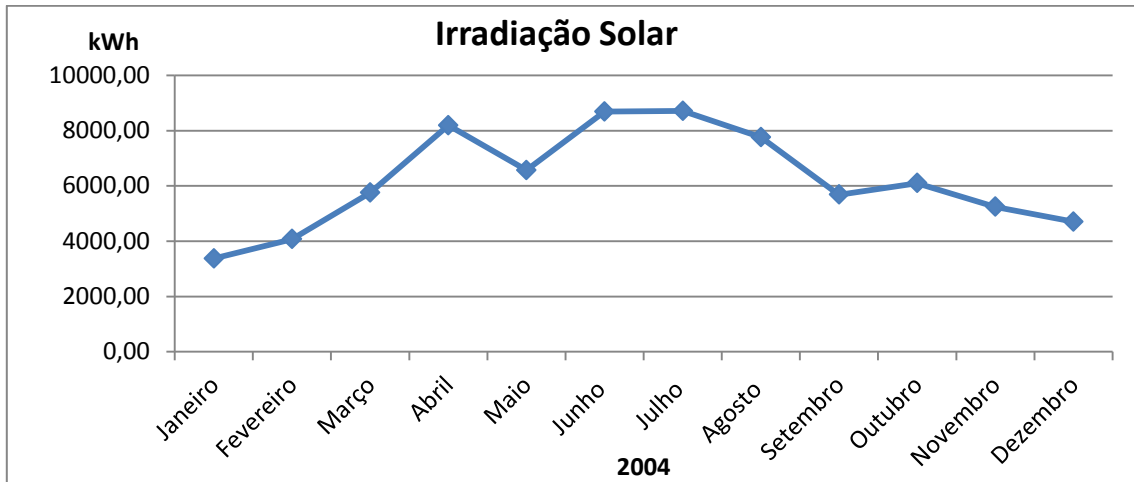


Gráfico 46: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2004

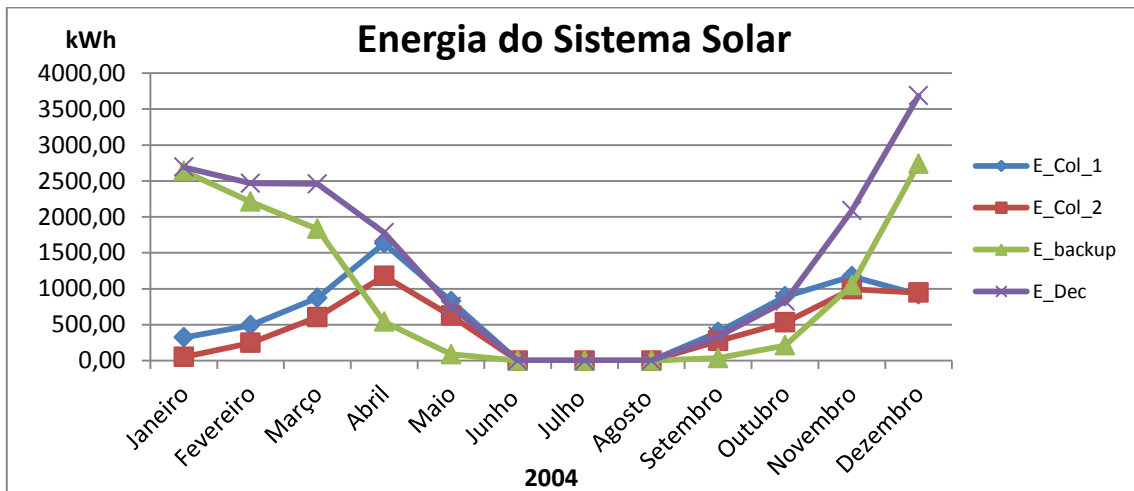


Gráfico 47: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2004

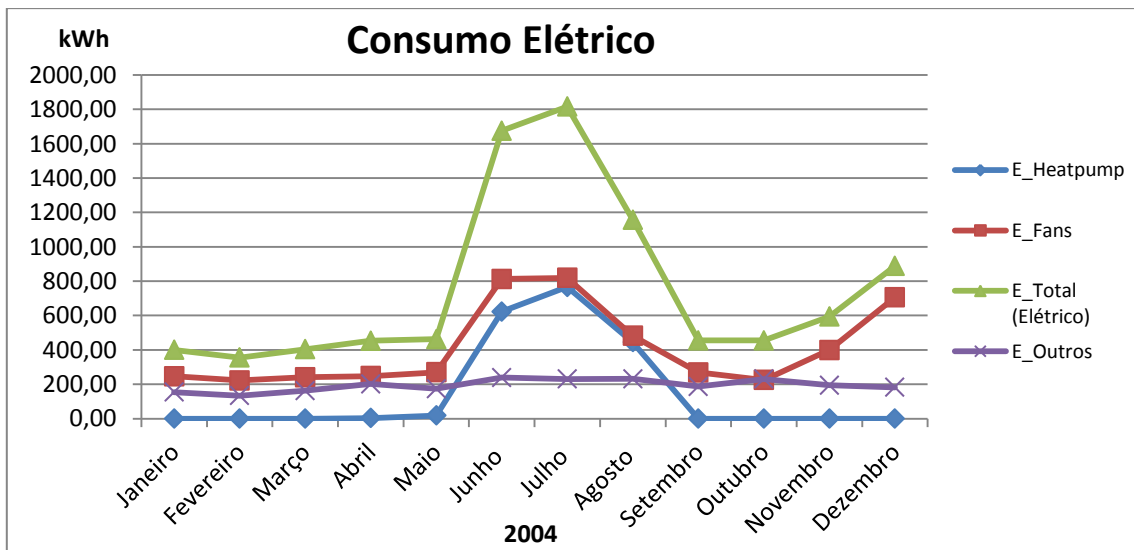


Gráfico 48: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2004

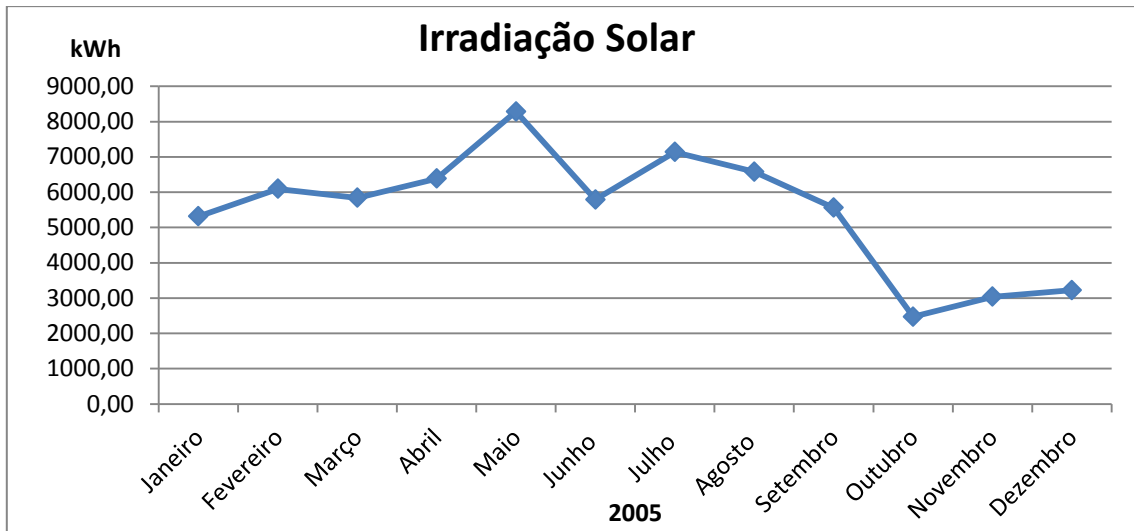


Gráfico 49: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2005

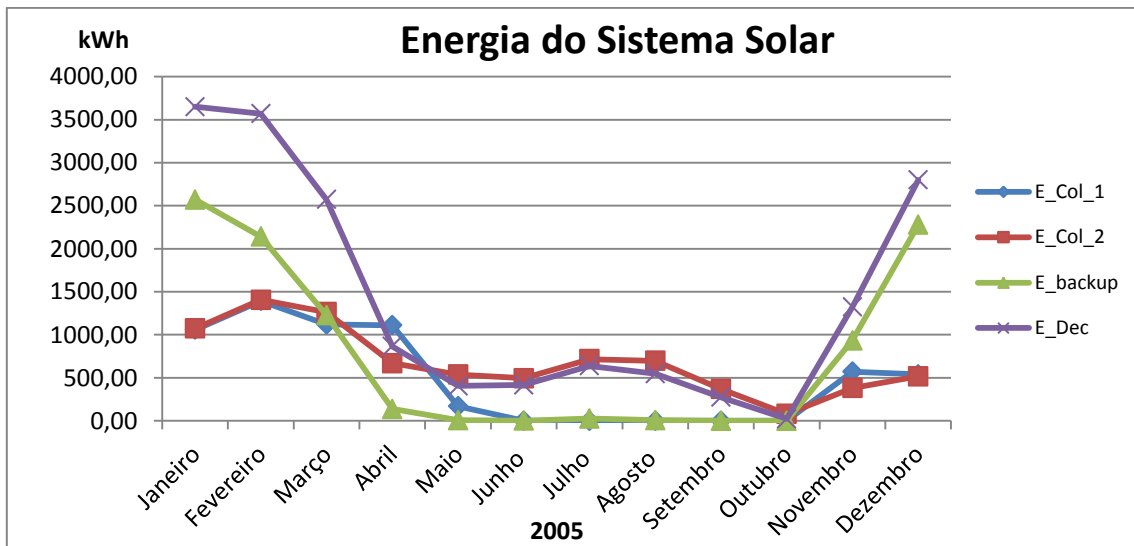


Gráfico 50: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2005

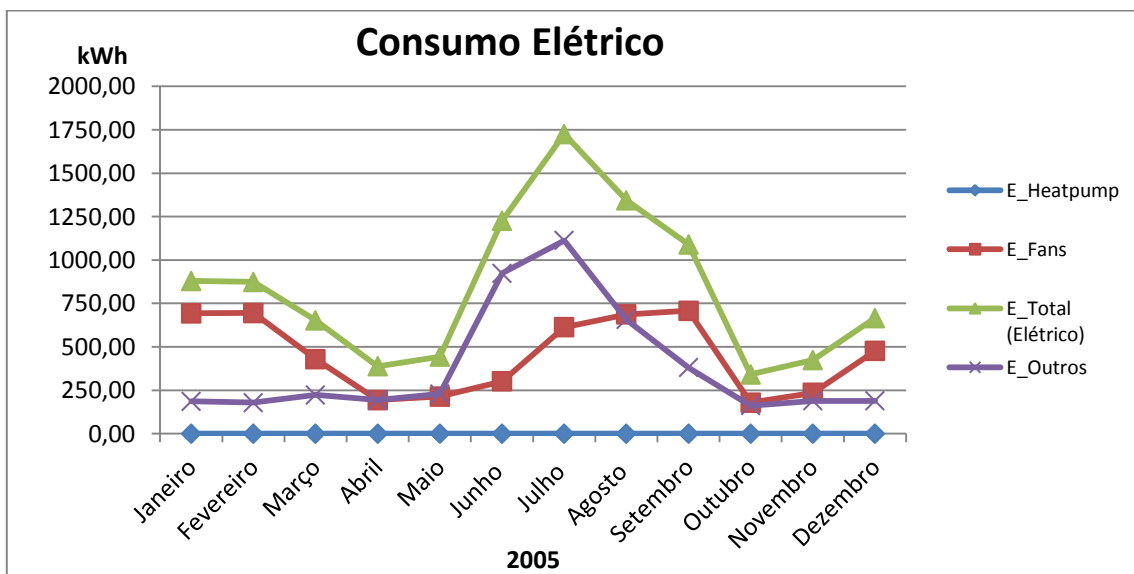


Gráfico 51: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2005

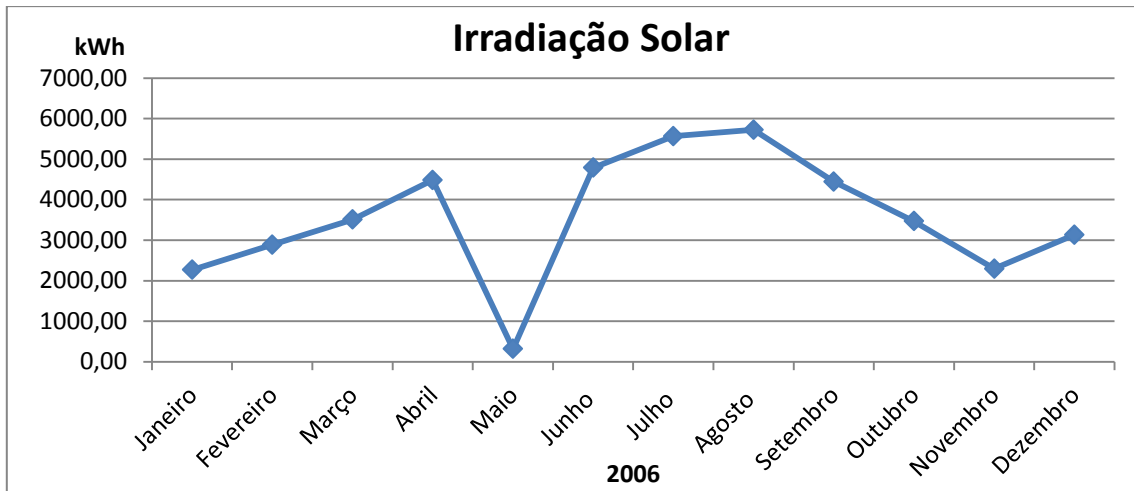


Gráfico 52: Evolução da irradiação solar ao longo do ano de 2006

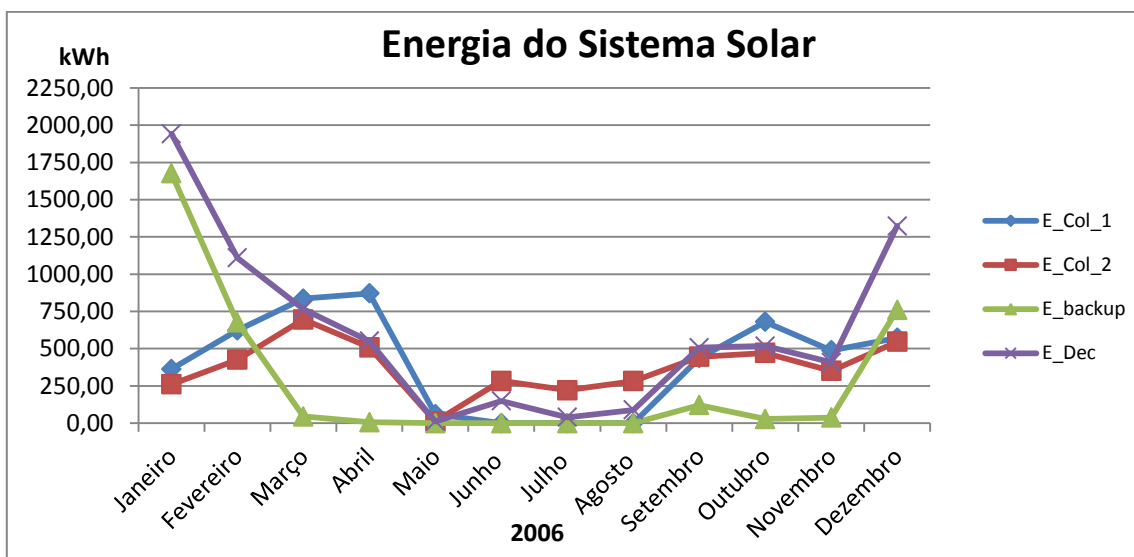


Gráfico 53: Evolução da energia no sistema solar da UTA no ano de 2006

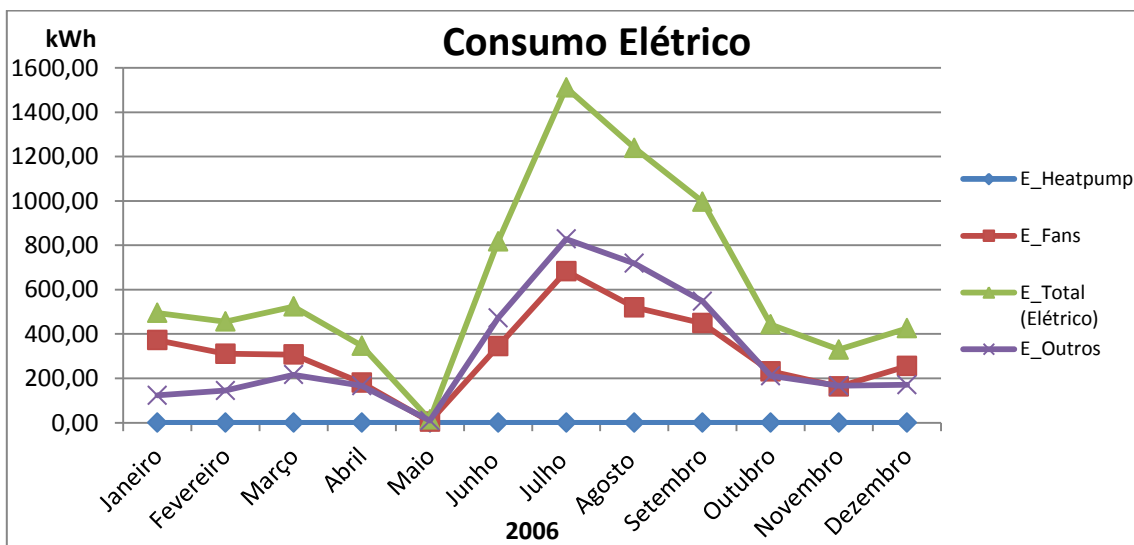


Gráfico 54: Evolução do consumo elétrico ao longo do ano de 2006

Nota: O mês de maio tem apenas um dia de registos.

Anexo II

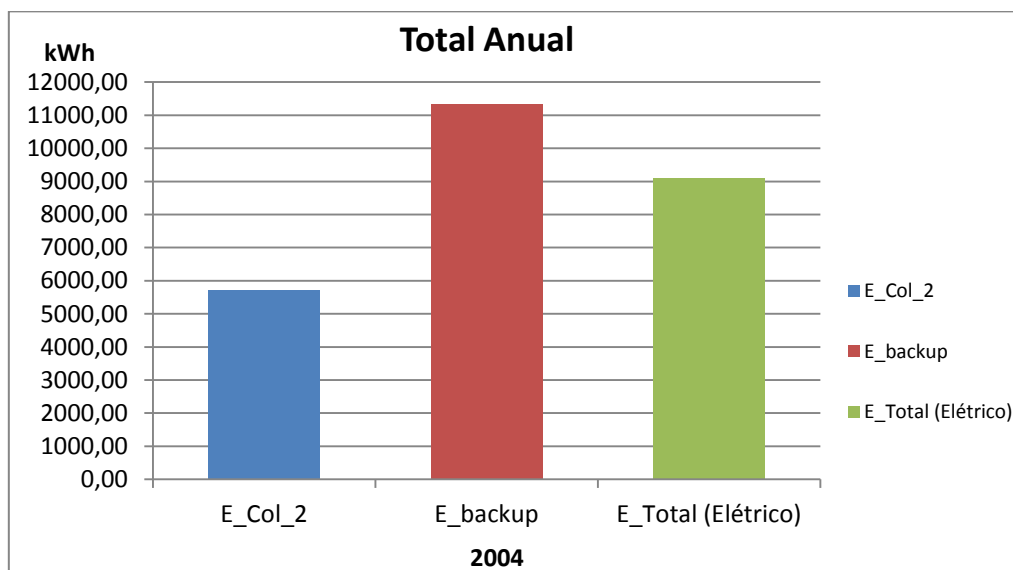


Gráfico 55: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2004

Tabela 19: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2004

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	5706,36	21,81
E_Backup	11345,39	43,36
E_Total (Elétrico)	9116,32	34,84
Total	26168,07	100,00

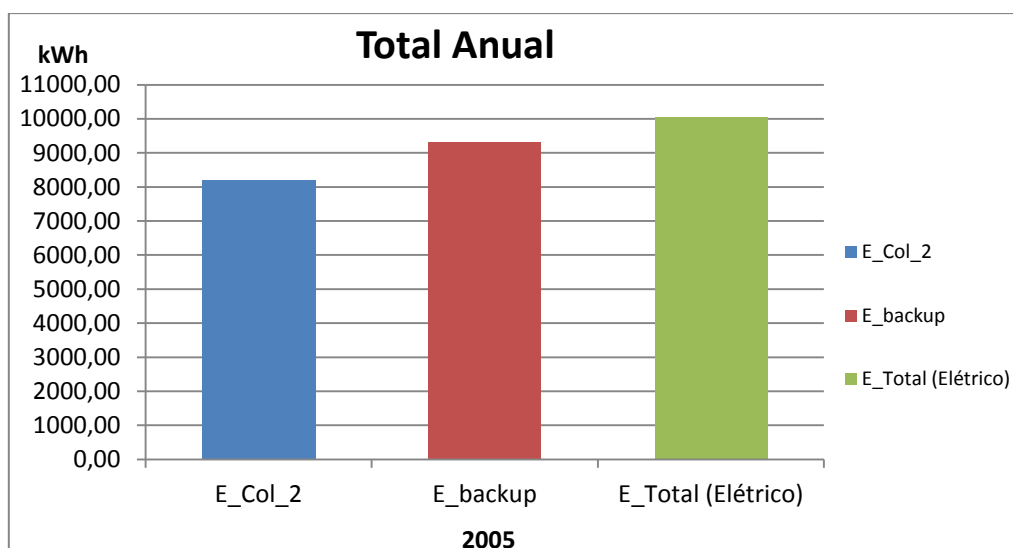


Gráfico 56: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2005

Tabela 20: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2005

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	8209,547	30,23
E_Backup	9333,957	31,96
E_Total (Elétrico)	10053,75	37,81
Total	27597,25	100,00

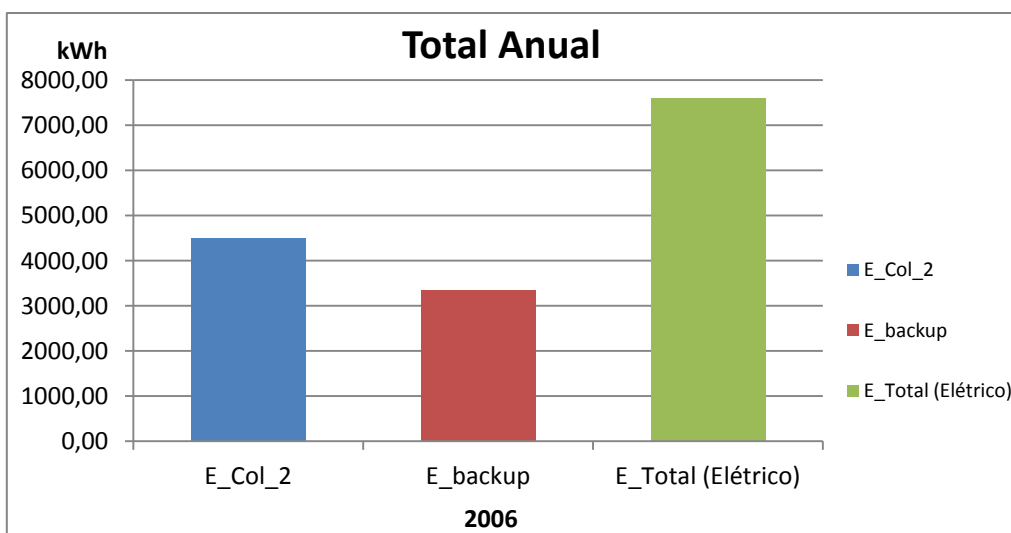


Gráfico 57: Comparação da energia fornecida pelo sol com a energia fornecida pela caldeira e a energia elétrica consumida no ano de 2006

Tabela 21: Comparação da energia fornecida pelo sol com as outras energias e percentagem em relação ao total anual no ano de 2006

Total Anual	kWh	%
E_Col_2	4502,74	29,15
E_Backup	3348,48	21,68
E_Total (Elétrico)	7596,35	49,18
Total	15447,57	100,00

Anexo III

Segundo o nº2 do Anexo VI do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE):

$$Q_a = (M_{AQS} \cdot 4187 \cdot \Delta T \cdot n_d) / (3\,600\,000) \text{ (kWh/ano)}$$

Q_a: Energia despendida com sistemas convencionais de preparação de AQS durante um ano

M_{AQS}: Consumo médio diário de referência de AQS

ΔT: É o aumento de temperatura necessário para preparar as AQS

n_d: Número anual de dias de consumo de AQS

Nos edifícios residências o consumo médio diário de referência de AQS é dado pela expressão:

$$M_{AQS} = 40 \text{ l} \cdot \text{número de ocupantes}$$

Sendo o número convencional de ocupantes de cada fração autónoma definido pela seguinte tabela:

Tabela 22: Número convencional de ocupantes em função da tipologia da fração autónoma

Tipologia	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	...	T _n
Número de ocupantes	2	2	3	4	...	n+1

Anexo IV

Tabela 23: Fatores de emissão de CO₂

Ano	kgCO ₂ /kWh	Fonte
2002	0,553	APA
2003	0,433	APA
2010	0,227	EDP
2011	0,260	EDP
2012	0,229	EDP