



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

André Oliveira Araújo

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÓMICA DE  
CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO  
EM HABITAÇÕES**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, orientada pelos Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire e Mestre Pedro Augusto Marques e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2020



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÓMICA DE CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO EM HABITAÇÕES**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Environmental and economic life cycle assessment of house heating systems**

**Autor**

**André Oliveira Araújo**

**Orientadores**

**Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire**

**Mestre Pedro Augusto Marques**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José Joaquim da Costa</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, fevereiro, 2020**



## Agradecimentos

Esta dissertação representa a conclusão de um ciclo que não seria possível sem o apoio incondicional de várias pessoas. Gostaria de agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram durante este caminho.

Ao Professor Doutor Fausto Freire, orientador desta dissertação, agradeço todo o apoio, críticas e partilha de conhecimento que tornaram possível a criação deste trabalho. Obrigado por ter tirado o melhor das minhas capacidades com o rigor que sempre exigiu.

Ao Mestre Pedro Marques, coorientador desta dissertação, sem o qual teria sido impossível a realização da mesma. Obrigado por toda a paciência que demonstrou durante este percurso, transmitindo total colaboração e troca de conhecimentos.

Ao Doutor Sérgio Tadeu, investigador do Centro para Ecologia Industrial (CIE), pela total disponibilidade, colaboração e conhecimentos trocados.

Aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado, quer no aconselhamento como no desaconselhamento.

Ao Rafael Lourenço, pelo empurrão inicial, pelas horas cedidas e pela ajuda constante. Muito obrigado.

À minha família, em especial aos meus pais, por toda a tranquilidade transmitida e por fazerem de mim o que sou hoje. À minha irmã Francisca, com quem partilhei uma vida e à minha irmã Leonor, que não sabe a importância que teve.

Finalmente, gostaria de deixar um agradecimento especial à Raquel Lourenço por toda a força e dedicação transmitidas. Por tudo, muito obrigado.

A presente dissertação enquadrou-se na investigação relacionada com os projetos: T4ENERTEC - Ferramentas de apoio à seleção de tecnologias energeticamente eficientes (FEDER/FCT | POCI-01-0145-FEDER-029820), SET-LCA - Ferramentas agilizadas de ecodesign baseadas na avaliação de ciclo de vida incorporando incerteza (SET-LCA PTDC/EME-SIS/30570/2017), e SABIOS - Avaliação da sustentabilidade de sistemas de bioenergia: uma abordagem ciclo de vida multicritério para apoio à decisão, incluindo alterações do uso dos solos (PTDC/AAG-MAA/6234/2014 / POCI-01-0145-FEDER-016765), financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



## Resumo

Devido à existência de inúmeros equipamentos para aquecimento ambiente e de água sanitária, principais responsáveis pelo elevado consumo do setor doméstico em Portugal, surgiu o interesse de estudar as melhores alternativas, em termos ambientais e económicos capazes de suprir estas necessidades. Para atingir este objetivo foram selecionadas três tipologias de habitação (T1, T3 e V5), representando necessidades energéticas para área e número de pessoas associado às 3 tipologias, em três localidades distintas (Bragança, Coimbra e Faro), com diferentes características climáticas. Foram consideradas habitações com soluções construtivas de baixo coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ), seguindo a tendência de diminuição de necessidades energéticas para aquecimento ambiente, verificada ao longo dos últimos anos. Foram selecionados sistemas de aquecimento compostos pelos seguintes equipamentos: bomba de calor ar-ar, bomba de calor ar-água apenas para aquecimento de água (BCAAG<sub>1</sub>) e para aquecimento simultâneo de água e ambiente (BCAAG<sub>2</sub>), caldeira a gás natural, esquentador a gás natural e termoacumulador elétrico. Como no contexto nacional, a instalação de coletores solares térmicos para suprir necessidades de preparação de águas quentes sanitárias é obrigatória, o estudo destes equipamentos foi também considerado, salvo quando são utilizados sistemas utilizando fontes de energia renovável (bombas de calor). Para a avaliação ambiental foi aplicada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, que compreende o desenvolvimento de modelos e inventários de ciclo de vida para os sistemas estudados. Os impactos ambientais de ciclo de vida foram quantificados com base no método ReCiPe. A avaliação económica foi realizada com base numa adaptação do quadro metodológico proposto pela Diretiva 2010/31/UE relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios, contabilizando os custos de ciclo de vida, tendo em conta o indicador Valor Atualizado Líquido.

Os resultados para o T1 apresentam como solução mais vantajosa a utilização de bomba de calor ar-água combinada com bomba de calor ar-ar, para a totalidade dos indicadores ambientais e económicos nas três localidades. Para o T3, apresenta-se como preferencial em termos ambientais, o sistema composto apenas por bomba de calor ar-água em cinco das sete categorias de impacto, em Coimbra e Bragança e seis das sete em Faro. Do ponto de vista económico, o sistema composto pela caldeira (apoiada por coletores

solares) é a solução mais favorável do ponto de vista financeiro e macroeconómico. Para a V5, o sistema composto por bomba de calor ar água e ar-ar é a melhor solução em cinco das sete categorias de impacte em Bragança, não havendo nenhum sistema preferencial em Coimbra e Faro. Em termos económicos, a melhor solução é a mesma da tipologia T3.

Por final, pode concluir-se que, embora não exista um sistema preferencial comum a todos as tipologias de habitação e localidades, sendo necessária uma avaliação específica, as bombas de calor ar-água apresentam-se como uma solução com elevado potencial em termos ambientais e as caldeiras em termos económicos para instalação em Portugal.

**Palavras-chave:** Avaliação de Ciclo de Vida, Avaliação Económica, Aquecimento, Águas Quentes Sanitárias, Aquecimento Ambiente, Habitações.



## Abstract

Due to the great amount of water and house heating equipment, main contributors to the big portion of the final energy consumption in Portugal, the interest in studying the best environmental and economical alternatives became the subject of this work. To achieve this objective, three types of dwellings were created to represent the variability of energy needs according to area and number of people: one apartment with one bedroom (T1); other with three bedrooms (T3); and a single-family house with five bedrooms (V5). These houses were studied in three different locations (Bragança, Coimbra and Faro) to represent variability of needs according to climate conditions. As house heating needs have been decreasing for the last years, the houses were created with low thermal transmittance values ( $U$ ). That said, heating systems were created, composed with the following equipment: air-to-air heat pump; air-to-water heat pump only for water heating (BCAAg<sub>1</sub>); combined water and house heating air-to-water heat pump (BCAAg<sub>2</sub>); natural gas boiler; natural gas water heater; and electric storage water heater. As in the national context, solar thermal collectors are mandatory to new houses, the study of these equipment turned out to be mandatory, except when equipment with renewable energy sources (heat pump) are used. For the environmental assessment, Life Cycle Assessment methodology was applied, which comprises the development of life cycle models and inventories, being the impacts evaluated based on ReCiPe method. The economic evaluation was carried based on an adaptation of the methodological framework proposed in the Directive 2010-31-EU about Energy Performance Building Design.

For the T1, the system composed with air-to-water and air-to-air heat pump is the best for all the environmental and economical categories in all locations. In environmental terms, the system composed with air-to-water heat pump only is the best system for all locations, indicating five out of seven categories in Bragança and Coimbra, and six out of seven in Faro. As for the economic point of view, the best system is composed by the natural gas boiler, supported by solar thermal collectors. In environmental terms T3 presents as a preferential system only composed by water-to-water heat pump with five of the seven categories in Coimbra and Bragança, and six in Faro. As for the economic point of view, the system composed by the boiler (supported by solar collectors) is the most

favorable solution from the financial and macroeconomic point of view. V5 presents the system composed by air-to-water and air-to-air heat pumps as the best solution in five out of seven impact categories in Bragança, showing no preferential system in Coimbra and Faro. As for the economic point of view, the best system is the same as the T3.

It is possible to conclude that, besides the lack of a preferential system common to all the factors in study, being a careful evaluation of each one essential, air-to-water heat pumps are a great alternative in an environmental perspective, being boilers the best solution in an economic perspective in any location and type of house in Portugal.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Economical Evaluation, House Heating, Water Heating, Dwellings.

## Índice

Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas .....	ix
Simbologia e Siglas.....	xi
Simbologia.....	xi
Siglas .....	xi
1. Introdução .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Estado da Arte .....	3
2. Método para Avaliação Ambiental e Económica .....	9
2.1. Seleção de Habitações, Sistemas de Aquecimento e Cálculo de Necessidades Energéticas.....	9
2.1.1. Sistemas de Aquecimento .....	10
2.1.2. Cálculo das Necessidades Térmicas .....	12
2.2. Avaliação de Ciclo de Vida.....	14
2.2.1. Definição de Fronteiras e Unidade Funcional.....	14
2.2.2. Modelo e Inventário de CV:.....	15
2.2.3. Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida.....	17
2.3. Avaliação Económica .....	18
2.4. Análise de Sensibilidade .....	20
3. Avaliação Ambiental e Económica de CV: Resultados e Discussão .....	21
3.1. Necessidades Térmicas de Aquecimento .....	21
3.2. Avaliação Ambiental de CV.....	22
3.2.1. Resultados da Avaliação Ambiental .....	22
3.2.2. Análise de Sensibilidade .....	28
3.3. Avaliação Económica de CV .....	31
3.3.1. Resultados da Avaliação Económica .....	31
3.3.2. Análise de Sensibilidade .....	33
4. Conclusão .....	39
4.1. Limitações e Trabalho Futuro .....	40
Referências Bibliográficas .....	41
Anexo A – Folha de Cálculo $\$e^3$ (Gentilmente Cedida pelo Dr. Sérgio Tadeu).....	46
Anexo B – Relatórios do Dimensionamento de Coletores Solares .....	47
Anexo C – Impactes Totais de CV .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição do Consumo de AQS, adaptado de DGEG (2018).....	13
Figura 2 - Perfil de Utilização de Equipamentos de AA, adaptado de DGEG (2018).....	13
Figura 3 - Fronteiras do Sistema .....	14
Figura 4 - Necessidades Térmicas [MJ/ano].....	21
Figura 5 - Resultados da Avaliação Ambiental para T1.....	23
Figura 6 - Resultados da Avaliação Ambiental para T3.....	25
Figura 7 - Resultados da Avaliação Ambiental para V5 .....	27
Figura 8 - Análise de Sensibilidade à Utilização de Coletores Solares (Avaliação Ambiental).....	29
Figura 9 - Resultados da Avaliação Económica com o Método VLA .....	32
Figura 10 - Análise de Sensibilidade à Utilização de Coletores Solares (Avaliação Económica).....	33
Figura 11 - Análise de Sensibilidade aos Fatores de Conversão de Energia Primária.....	34
Figura 12 - Análise de Sensibilidade à Taxa de Atualização.....	35
Figura 13 - Impressão da Célula de Introdução de Dados da Folha de Cálculo \$e3 .....	45
Figura 14 - Relatório do Dimensionamento de Coletores Solares Térmicos para o T3 em Bragança.....	47
Figura 15 - Impactes Totais da Produção e Utilização de 20 Anos dos Sistemas de Aquecimento (T1).....	49
Figura 16 - Impactes Totais da Produção e Utilização de 20 Anos dos Sistemas de Aquecimento (T3).....	50
Figura 17 - Impactes Totais da Produção e Utilização de 20 Anos dos Sistemas de Aquecimento (V5) .....	51

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de Dados do Estado da Arte .....	4
Tabela 2 - Dimensões dos Edifícios de Referência .....	10
Tabela 3 - Coeficientes de Transmissão Térmica ( $U$ ) .....	10
Tabela 4 - Descrição dos Equipamentos Seleccionados .....	11
Tabela 5 - Sistemas de Aquecimento Analisados .....	12
Tabela 6 - Cargas de Pico AA .....	15
Tabela 7 - Características e Custo de Aquisição dos Equipamentos para as Diferentes Tipologias de Habitação .....	16
Tabela 8 - Categorias de Impacte Ambiental (ReCiPe) .....	17
Tabela 9 - Custos das Fontes de Energia .....	19
Tabela 10 - Potencial AG da Emissão de Gases Refrigerantes .....	31
Tabela 11 - Resumo dos Resultados da ACV .....	36



## **SIMBOLOGIA E SIGLAS**

### **Simbologia**

$R_{ph}$  - Renovações horárias de ar

$U$  - Coeficiente de transmissão térmica

### **Siglas**

AA - Aquecimento Ambiente

AG - Aquecimento global

AQS - Águas Quentes Sanitárias

AT - Acidificação terrestre

AVC - Avaliação de Ciclo de Vida

CV - Ciclo de Vida

DF - Depleção de combustíveis fósseis

DGEG - Direção Geral de Emergia e Geologia

DL - Decreto-Lei

DM - Depleção de metais

DO - Depleção da camada de ozono

EM - Eutrofização marinha

EPBD - Desempenho Energético de Edifícios

EU - Eutrofização de água doce

FER - Fontes de Energia Renováveis

GEE - Gases de Efeito de Estufa

GN - Gás Natural

INE - Instituto Nacional de Estatística

ISO - Organização Internacional de Normalização

UE - União Europeia

UF - Unidade Funcional

VAL - Valor Atualizado Líquido





## 1. INTRODUÇÃO

O Aquecimento Ambiente (AA) e Águas Quentes Sanitárias (AQS) são algo imprescindível na maior parte das habitações, sendo a oferta de equipamentos para suprir estas necessidades bastante elevada, tornando difícil a sua escolha. Devido à existência de inúmeros equipamentos para AA e AQS, principais responsáveis pelo elevado consumo do setor doméstico em Portugal, surgiu o interesse de estudar as melhores alternativas, em termos ambientais e económicos capazes de suprir estas necessidades.

Sendo a avaliação de ciclo de vida (ACV) a “melhor abordagem para avaliar os potenciais impactes ambientais de produtos” existente (EC, 2003), surge esta metodologia como ferramenta de avaliação da carga ambiental dos equipamentos desde a extração de recursos até ao seu descarte, “do berço ao caixão” (Guinée, 2002). Contudo, não é apenas necessário analisar as soluções com menores impactes ambientais, sendo importante perceber se estas são viáveis do ponto de vista económico, conforme indicado pela diretiva europeia destinada ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD).

Da análise da literatura existente, verifica-se que a maioria das publicações avalia apenas equipamentos utilizados para uma das necessidades de aquecimento (AA ou AQS), sem fazer variar a tipologia de habitação nem o seu local. Esta dissertação visa avaliar a performance ambiental e económica de diferentes equipamentos, fazendo variar a tipologia de habitação e localidade de estudo em Portugal. Quanto às habitações, tem sido notada uma tendência de decréscimo das necessidades energéticas para AA, conforme descrito pelo estudo “*Europe’s buildings under the microscope*”, que refere uma diminuição do consumo energético de 200 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) em 1950 para 68 kWh/(m<sup>2</sup>.ano), igualmente sustentado pela publicação de Odyssee-mure (2015). É olhando para o futuro que esta dissertação pretende avaliar a instalação e utilização de diferentes sistemas de aquecimento.

Foram então delineados objetivos de modo a guiar a realização desta dissertação, descritos no subcapítulo 1.1.

## 1.1. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é fazer uma avaliação ambiental e económica de ciclo de vida de sistemas de aquecimento (água e ambiente) em habitações novas, com os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar sistemas de aquecimento para três tipologias de habitação (T1, T3, vivenda) com base nos seguintes equipamentos: esquentador, termoacumulador, caldeira de condensação e bomba de calor Ar-Ar ou Ar-Água;
- Desenvolver modelos e inventários de ciclo de vida dos sistemas analisados para cada uma das tipologias de habitação;
- Avaliar as necessidades energéticas em diferentes locais para aquecimento em Portugal (norte, centro e sul);
- Análise de sensibilidade à utilização de coletores solares térmicos, gases refrigerantes utilizados nas bombas de calor, fatores de conversão de energia primária e taxa de atualização;
- Compreender como a utilização de sistemas mais eficientes pode contribuir para o desenvolvimento sustentável sem comprometer interesses ambientais e económicos.

Para a concretização dos objetivos propostos, serão realizadas as seguintes etapas:

- Definir edifícios típicos que representem habitações novas com soluções construtivas que levem a baixas necessidades de AA;
- Avaliar as necessidades de energia útil destas habitações utilizando um método de simulação dinâmica;
- Selecionar diferentes sistemas capazes de suprir as necessidades de AA e AQS, tendo sempre em atenção um criterioso dimensionamento que assegure o correto funcionamento para as situações em estudo;
- Desenvolver modelos e inventários de ciclo de vida para os sistemas analisados;
- Fazer uma análise ambiental e económica com base na ACV (ISO 14040) e no Regulamento Delegado (EU) nº 244, respetivamente.

## 1.2. Estado da Arte

Nesta secção são analisados os estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV) existentes na literatura, com base numa pesquisa nas bases de dados e motores de busca “*ISI Web of Knowledge*”, “*Google scholar*”, “*ScienceDirect*” e nos arquivos de teses da Universidade de Coimbra, dos últimos dez anos (2010 a 2020). As palavras-chave utilizadas foram “avaliação de ciclo de vida (ACV)”, “AQS”, “aquecimento”, “avaliação económica”, “avaliação ambiental”, “*life cycle assessment (LCA)*”, “*life cycle analysis*”, “*life cycle*”, *etc...*), “*life cycle cost (LCC)*”, “*house heating*” ou “*water heating*”. Dos cerca de 50 artigos e teses identificados, foram excluídos estudos referentes somente a equipamentos diferentes dos propostos, e ainda, literatura que não fosse redigida em português ou inglês, resultando 16 estudos, sendo 15 artigos científicos e uma tese de mestrado.

Na Tabela 1 encontram-se resumidas as principais características dos estudos analisados, como por exemplo: equipamentos utilizados, unidade funcional, tipologia de habitação, fronteiras de sistema, indicadores ambientais/económicos e métodos de cálculo das necessidades energéticas, sendo divididos em três categorias: i) estudos que combinam AA e AQS, ii) estudos de AA, iii) estudos de AQS.

**Tabela 1 – Tabela de Dados do Estado da Arte**

Referência	Foco do estudo	Equipamento Aquecimento	Equipamento AQS	Unidade funcional	Tipologia de habitação	Tipo de estudo	Indicadores	Local do estudo	Método de cálculo de necessidades energéticas
<b>Eicher et al., 2014</b>	AQS + AA	Bomba de calor	Bomba de calor + solar + acumulador	Instalação capaz de suprir as necessidades durante 20 anos	Vivenda	ACV ( <i>cradle to grave</i> )	AG, CEP	Suíça	Simulação dinâmica
		Bomba de calor	Termoacumulador elétrico						
		Solar + bomba de calor + acumulador							
		Bomba de calor ar-água + coletor solar							
<b>Genkinger, et al., 2012</b>	AQS + AA	Bombas de calor ar-água + painel fotovoltaico.	Bombas de calor	Ano de utilização	Vivenda	ACV e análise econômica ( <i>cradle to grave</i> )	PIA, AG	Suíça	Consumo típico de energia útil 2800 kWh/ano, assumindo que 50% é fornecido pelo coletor solar
		Equipamento pellets + coletor solar	Equipamento pellets						
		Caldeira a gás natural + coletor solar	Caldeira a "Oil"						
		Bombas de calor	-						
		Caldeira biomassa	-						
		Bombas de calor	Bombas de calor						
<b>Caduff, et al., 2014</b>	AQS + AA	Coletores solares	Coletores solares	MJ produzidos ao longo do ciclo de vida. Unidade de Equipamento	-	ACV ( <i>cradle to grave</i> )	AG, DO	-	Funcionamento de 2000 h/ano
		Ventilação mecânica e recuperadores							
		Bombas de calor							
		Caldeira biomassa							
<b>Johnson, 2011</b>	AQS + AA	Bomba de calor	Bomba de calor	15 anos de utilização da bomba de calor	Apartamentos e vivendas	ACV: pegada de carbono ( <i>cradle to grave</i> )	AG	Reino Unido	8760 h/ano
<b>Koubogiannis &amp; Noughou, 2016</b>	AQS + AA	Caldeiras	Caldeiras	Unidade de potência [kW] e de massa [kg] da caldeira	-	Embodied energy (Produção)	AG, CED	-	-

<b>Monahan &amp; Powell, 2011</b>	Coletor solar	-	Área aquecida por ano (m <sup>2</sup> .ano)	Varia a área e número de ocupantes	Pegada de carbono. Análise económica ( <i>cradle to grave</i> )	AG, CEP	Reino Unido	50 kWh/m <sup>2</sup> .ano
	Bomba de calor	-						
	Caldeira biomassa	-						
	Geração de electricidade	-						
<b>Blom et al., 2010</b>	<i>District heating</i>	-	Equipamento de aquecimento e ventilação num complexo multifamiliar	Apartamento	ACV ( <i>Cradle to grave</i> )	PDA, AG, DO, PCFO, TH, EU, ET, AT, PE	Holanda	Simulação dinâmica
	Caldeira de condensação	-						
	Caldeira convencional	-						
	Bomba de calor	-						
<b>Abusoglu &amp; Sedeeq, 2013</b>	Caldeira a carvão [10 kW]	-	Manter o edifício a 19°C durante a estação de aquecimento (unidade de exergia [kWh] ou unidade de tempo [ano])	Apartamento	ACV Análise exérgica Análise económica ( <i>cradle to grave</i> )	EI99	Turquia	$Q_h = K_{tot} * T_i - T_0$ $K_{tot} = 316 \text{ W/K}$ $T_i = 19^\circ\text{C}$ $T_0 = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}$
	Caldeira de condensação G.N. [10 kW]	-						
	Bomba de calor (geotérmica e ar-ar)	-						
	Recuperador gás	-						
<b>Li &amp; Smith, 2012</b>	Bombas de calor [10 kW]	-	Equipamento capaz de suprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento em habitações no Minnesota durante 20 anos	Vivenda	ACV Análise económica ( <i>cradle to grave</i> )	AG	Minnesota	Simulação dinâmica
	Caldeiras de gás natural [10kW]	-						
	Coletor solar (polipropileno e convencional)	-						
	-	-						
<b>Greening &amp; Azapagic, 2012</b>	Bombas de calor [10 kW]	-	Geração de 1kWh térmico para aquecimento ambiente	150 m <sup>2</sup>	ACV ( <i>cradle to grave</i> )	PDA, AT, PE, EC, AG, TH PEAM, DO, PCFO, ET	Reino Unido	-
	Caldeiras de gás natural [10kW]	-						
	Coletor solar (polipropileno e convencional)	-						
	-	-						
<b>Comodi et al., 2016</b>	-	Caldeira a gás natural	Equipamento capaz de suprir necessidades de aquecimento de água para quatro pessoas (/ano)	-	ACV Análise económica ( <i>Cradle to grave</i> )	EI99	Roma, Madrid Munique	250 l/dia a 45°C
	-	Caldeira a gás natural						

<b>Greening &amp; Azapagic, 2014</b>	AQS	-	Coletor solar	1kWh térmico para produção de água quente	Vivenda	ACV ( <i>Cradle to grave</i> )	PDA, AT, PE, EC, AG, TH, PEAM, DO, PCFO, ET	Reino Unido	3216 kWh/ano
		-	Caldeira de condensação a gás natural.						
		-	Bomba de calor						
		-	Termoacumulador elétrico						
<b>Hang, et al., 2012</b>	AQS	-	Coletor solar	Equipamento capaz de suprir a necessidade diária de aquecimento de água para uma típica família americana	Vivenda	ACV Análise económica ( <i>Cradle to grave</i> )	CEP, PC	Los Angeles, Atlanta, Chicago	236 l/dia a 60°C
		-	Auxiliar elétrico						
		-	Auxiliar a gás natural						
<b>Koroneos &amp; Nanaki, 2012</b>	AQS	-	Coletor solar plano	1MW de calor solar utilizado para produção de AQS	Vivenda	LCIA Análise económica ( <i>Cradle to grave</i> )	AG, AT, TH, EU, EA, MP, SV, SI	Grécia	200 l/dia a 60°C
		-	Reservatório com resistência elétrica						
		-	Coletor solar						
<b>Menzies &amp; Roderick, 2010</b>	AQS	-	Coletor solar	1 coletor solar, 1 reservatório e 1 equipamento auxiliar	Vivenda	ACV Análise económica ( <i>Cradle to site</i> )	PC, EI	Reino Unido	200 l/dia a 45°C
		-	Reservatório com resistência elétrica						
		-	Coletor solar plano						
<b>Uctug &amp; Azapagic, 2018</b>	AQS	-	Coletor solar plano	Energia fornecida pelo sistema solar durante o seu tempo de vida.	Vivenda	ACV ( <i>Cradle to grave</i> )	AG, ET, PE, PCFO, DO, TH	Turquia (Antalya, Istanbul, Ankara, Ezurum)	100 l/dia a 60°C
		-	Caldeira a gás natural						

**Legenda:** AG: Aquecimento Global; AT: Acidificação Terrestre; CEP: Consumo de Energia Primária; DO: Depleção da Camada de Ozono; EA: Eutrofização do Ar; EC: Ecotoxicidade de Água Doce; EI: Energia Incorporada; EIJ99: Eco-Indicador 99; ET: Ecotoxicidade Terrestre; EU: Eutrofização de Água Doce; MP: Metais Pesados; PC: Pegada de Carbono; PCFO: Potencial de Criação Fotoquímica de Ozono; PDA: Potencial de Depleção Abiótica; PE: Potencial de Eutrofização; PEAM: Potencial Ecotoxicidade da Água Marinha; PIA: Pontos de Impacte Ambiental; SI: *Smog* de Inverno, SV: *Smog* de Verão; TH: Toxicidade Humana Cancerígena; TH<sub>nc</sub>: Toxicidade Humana Não Cancerígena.

Da tabela verificamos que todos os estudos adotam uma perspetiva *cradle to grave*, com exceção de Koubogiannis & Nouhou (2016), que se foca apenas na produção de caldeiras. Genkinger *et al.* (2012) e Monahan & Powell (2011) complementam o estudo com uma avaliação económica de CV. Os estudos apresentam unidades funcionais relacionadas com a energia produzida por um determinado sistema (em termos totais, anuais, por unidade de energia, ou por área). Os estudos Caduff *et al.* (2014) e Koubogiannis & Nohou (2016) avaliam duas unidades funcionais. Todos os estudos comparam diferentes tipos de equipamentos, à exceção de Koubogiannis & Nohou (2016) e Johnson (2011), que fazem análise a apenas um tipo de equipamento. Johnson (2011) e Monahan & Powell (2011) fazem variar a tipologia de habitação. Quanto ao método de cálculo de necessidades energéticas das habitações, todos estimam um consumo em função da área das habitações ou tempo de utilização dos equipamentos, à exceção de Eicher *et al.* 2014 que utiliza um método de simulação dinâmica.

Johnson (2011) quantifica a pegada de carbono associada ao ciclo de vida de bombas de calor em diferentes tipologias de habitação, onde realiza uma análise de sensibilidade a diferentes aspetos, entre eles, o tipo de refrigerantes e as perdas durante a sua utilização e fim de vida. Este, refere que utilizando um fator de perda de 4,5% e 8% por ano, a pegada de carbono varia  $\pm 3\%$  em relação aos 6% utilizados como referência. Ainda refere que a pegada de carbono associada à utilização do gás refrigerante R134a reduz 2% em relação ao R410A, comparando ainda com outros gases. Quanto ao fim de vida, utilizando como referência a reciclagem de 45% da carga inicial de refrigerante, mostra ainda que, se metade deste valor for reciclado, os impactes aumentam apenas 3%.

Dos estudos que apenas consideram AA, é possível destacar o estudo de Abusoglu & Sedeeq (2013) por ser o único que contabiliza mais do que uma unidade funcional, uma vez que em Li & Smith (2012) e Blom *et al.* 2010 os impactes são alocados apenas à unidade de equipamento. Já em Greening & Azapagic (2012) e Abusoglu & Sedeeq, (2013) é utilizada a energia térmica produzida (kWh) como unidade de referência, para além do tempo, também considerado como unidade funcional, somente no último artigo referenciado. É possível verificar igualmente, que em todos os estudos analisados existe uma concordância quanto às fronteiras de sistema, sendo a perspetiva *cradle to grave* transversal a todos. Todos os estudos comparam a utilização de diferentes equipamentos na mesma tipologia de habitação à exceção de Blom *et al.* (2010) que avalia a sua utilização em

diferentes tipologias de habitação. No que diz respeito ao método de cálculo de necessidades energéticas, existem dois estudos que fazem simulação dinâmica - Blom *et al.* (2010) e Li & Smith (2012) - utilizando os restantes valores estimados ou cálculos simplificados.

Relativamente aos que estudam apenas AQS todos os estudos apresentam apenas uma unidade funcional, podendo ser quantidade de energia térmica produzida ou sistema de aquecimento. Apenas o estudo de Menzies & Roderick (2010) tem uma perspetiva *cradle to site* havendo concordância entre os restantes, com a perspetiva *cradle to grave*. Verifica-se também que todos os estudos, estipulam uma temperatura e quantidade de água para cálculo de consumo energético.

Da revisão bibliográfica conclui-se que a maioria dos estudos não realiza uma ACV de sistemas de AA e AQS simultaneamente, sendo mais comum o estudo destas componentes em separado, em que apenas 50% dos estudos fazem análise económica complementar à análise ambiental. Somente dois estudos fazem variar a tipologia de habitação e/ou número de pessoas e apenas três fazem variar a localização das habitações. Quanto ao cálculo das necessidades de AA só foi realizada simulação dinâmica em três casos.

Por fim, é possível concluir a importância de realizar um estudo de ACV em que se faz variar a localização, tipologia de habitação e equipamentos de aquecimento, aliados a uma simulação dinâmica que considere o comportamento dos consumidores em Portugal. Complementar este estudo com uma análise económica, recorrendo a equipamentos existentes no mercado é fundamental para a comunidade científica, verificando-se assim uma oportunidade de estudo que a presente dissertação pretende colmatar.



## **2. MÉTODO PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÓMICA**

Neste capítulo é descrito o método proposto para avaliação ambiental e económica de equipamentos de AQS e AA, que inclui as seguintes fases:

- Criar diferentes edifícios modelo que representem soluções construtivas de habitações modernas com baixas necessidades energéticas;
- Avaliar as necessidades energéticas e cargas de pico destas habitações, utilizando uma ferramenta de simulação dinâmica, fazendo variar a sua localização;
- Selecionar equipamentos que permitam suprir estas necessidades;
- Fazer uma avaliação ambiental com base na ACV da ISO 14040-14044:2006;
- Fazer uma avaliação económica com base no Regulamento Delegado (EU) nº 244;
- Fazer uma análise de sensibilidade a diferentes parâmetros;
- Analisar e comparar os resultados obtidos de forma crítica.

### **2.1. Seleção de Habitações, Sistemas de Aquecimento e Cálculo de Necessidades Energéticas**

Em Portugal, existem três zonas climáticas, definidas de acordo com o número de graus-dia (DL 118-2013). As localidades foram selecionadas de forma a representar estas diferentes zonas, tendo sido selecionados os casos com maior e menor número de graus-dia - Bragança e Faro, respetivamente - representando Coimbra uma situação intermédia. Foram definidas três tipologias de habitação: dois apartamentos com um e três quartos, T1 e T3, respetivamente, e uma vivenda com cinco quartos, V5, por representam diferentes necessidades energéticas.

As soluções construtivas das habitações não devem ultrapassar os valores limite impostos pelo Dec. Lei nº 118/2013 de 20 de agosto, aproximando-se o máximo possível dos valores de referência. Serão também aplicados os requisitos mandatórios pelo mesmo, para seleção dos equipamentos. A seleção das soluções construtivas foi realizada com base nos requisitos para a cidade de Bragança (requisitos mais restritos), fazendo assim cumprir os requisitos das restantes zonas climáticas, mantendo a comparabilidade entre as diferentes

localidades. De forma a obter habitações de baixas necessidades energéticas para AA, foram selecionadas soluções construtivas atuais, de baixo coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ). As principais dimensões dos edifícios de referência encontram-se resumidos na Tabela 2, sendo que os seus coeficientes de transmissão térmica estão resumidos na Tabela 3, tendo os subscritos “ $pav$ ”, “ $e$ ”, “ $env$ ” e “ $c$ ” o significado de “pavimento”, “envolvente”, “envidraçados” e “cobertura”, respetivamente.

**Tabela 2 - Dimensões dos Edifícios de Referência**

	T1	T3	V5
$A_{pav}$ (área de pavimento)	49 $m^2$	100 $m^2$	200 $m^2$
$h$ (pé direito)	3 $m$		
$A_e$ (área da envolvente)	84 $m^2$	120 $m^2$	240 $m^2$
$A_{env}$ (área de envidraçados)	9 $m^2$	20,3 $m^2$	40,7 $m^2$
$A_c$ (área da cobertura)	49 $m^2$	100 $m^2$	100 $m^2$
Nº de pessoas	2	4	6
Nº de casas de banho	1	2	4

**Tabela 3 - Coeficientes de Transmissão Térmica ( $U$ )**

$U_c$	0,55 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$U_p$	0,53 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$U_{pav}$	0,54 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$U_{env}$	2 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

Valores obtidos através de consulta das soluções construtivas constantes na ITE50 (Santos & Matias, 2006)

### 2.1.1. Sistemas de Aquecimento

De forma a representar fontes de energia distintas (eletricidade e gás natural) foram selecionados os seguintes equipamentos para AA e AQS: esquentador, termoacumulador elétrico, caldeira de condensação (GN), bomba de calor ar-ar e bomba de calor ar-água. De acordo com o Decreto-Lei nº 118/2013, a obtenção anual de energia equivalente à obtida por coletores solares térmicos é obrigatória. No caso de sistemas compostos por equipamentos com utilização de sistemas de aproveitamento de energias renováveis (por exemplo, bombas de calor ar-água), não foram instalados coletores solares térmicos por respeitarem o Decreto-Lei anterior. Já nos restantes casos, a instalação teve de ser considerada. Na Tabela 4 são apresentados os equipamentos selecionados, bem como uma breve descrição do seu funcionamento.

Tabela 4 - Descrição dos Equipamentos Seleccionados

Equipamento	Descrição	Função	Energia Fóssil	Sigla
Esquentador	Proporcionam o aquecimento de águas sanitárias de forma instantânea. A água fria entra no esquentador onde é aquecida instantaneamente à medida que circula no permutador de calor.	AQS	G.N.	Esq
Termoacumulador	Trata-se de um reservatório bem isolado com uma resistência, associada a um termostato, que mantém a água a uma temperatura de saída constante.	AQS	Eletricidade	Term
Caldeira de condensação	Proporciona o aquecimento instantâneo de água para AA e AQS, assim como uma caldeira convencional, embora, através do arrefecimento dos gases de combustão no permutador adicional, permita um aproveitamento do calor que seria dissipado nas mesmas.	AQS + AA	G.N.	Cald
Bomba de calor Ar-Ar	A unidade exterior extrai calor do ar ambiente, vaporizando o líquido refrigerante. O gás obtido é comprimido e aquecido no compressor, transmitindo calor para o ar interior. Permite também o arrefecimento, invertendo o seu ciclo.	AA	Eletricidade	AC
Bomba de calor Ar-Água 1	É uma solução compacta, sem unidade exterior que apenas permite preparação de AQS. Com o termoacumulador acoplado, permite a instalação e qualquer espaço no interior da habitação.	AQS	Eletricidade	BCAAG <sub>1</sub>
Bomba de calor Ar-Água 2	A unidade exterior extrai calor do ar ambiente, vaporizando o líquido refrigerante. O gás obtido é comprimido e aquecido no compressor, transmitindo calor para a água de aquecimento ou de preparação de AQS.	AQS + AA	Eletricidade	BCAAG <sub>2</sub>
Coletores solares	Equipamento capaz de extrair calor proveniente da radiação solar, para um fluido, que aquece a água no interior de um reservatório.	AQS	-	*

Os sistemas com apoio de coletores solares térmicos encontram-se assinalados com o símbolo “\*”, por exemplo, Esq\*, significa que o esquentador se encontra apoiado por coletores solares. Com os equipamentos seleccionados, foram criados 12 sistemas capazes de suprir as necessidades de aquecimento das três tipologias de habitação. Na Tabela 5 estão listados esses sistemas.

**Tabela 5 - Sistemas de Aquecimento Analisados**

Habitação	Sistema	Esquentador	Termoacumulador	Caldeira (GN)	BC Ar-Água <sub>1</sub> (BCAAg <sub>1</sub> )	AC	BC Ar-Água <sub>2</sub> (BCAAg <sub>2</sub> )
T1	Esq* + AC	X				X	
	Term* + AC		X			X	
	BCAAg <sub>1</sub> + AC				X	X	
T3	Esq* + AC	X				X	
	Term* + AC		X			X	
	BCAAg <sub>1</sub> + AC				X	X	
	Cald*			X			
	BCAAg <sub>2</sub>						X
V5	Esq* + AC	X				X	
	BCAAg <sub>1</sub> + AC			X		X	
	Cald*			X			
	BCAAg <sub>2</sub>						X

\*Equipamento apoiado por coletor solar térmico

### 2.1.2. Cálculo das Necessidades Térmicas

Neste subcapítulo será apresentado o cenário para o cálculo das necessidades térmicas de cada tipologia de habitação, na respetiva localidade, que servirá para dimensionar os equipamentos em estudo, bem como calcular o seu consumo de energia final.

Segundo os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), na publicação “Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico” (INE, 2011), constata-se que os hábitos dos portugueses refletem um consumo significativamente mais baixo do que o previsto pelo método sazonal simplificado, proposto pelo Dec. Lei nº 118/2013 de 20 de agosto, uma vez que não são considerados hábitos de climatização dos ocupantes, assumindo aquecimento permanente durante a estação de aquecimento (S. F. Tadeu *et al.*, 2016). Foi, então, utilizado um método de simulação dinâmica de modo a obter resultados mais próximos da realidade. Conforme supracitado, foi utilizado um método de simulação dinâmica para cálculo das necessidades térmicas de AA, calculadas para toda a estação de aquecimento, com recurso ao *software EnergyPlus™*, que se trata de um programa de simulação energética de edifícios, utilizado para modelar o consumo energético para AA, arrefecimento, ventilação, iluminação e AQS. Permite ainda estimar a potência necessária para suprir as necessidades na pior situação do ano, ou seja, a carga de pico.

Relativamente às necessidades térmicas para AQS, calculadas para a totalidade dos dias do ano, serão divididas em duas componentes: uma equivalente à componente de FER – obrigatória por lei (DL n° 118/2013) e calculada no *software Solterm* - e outra por equipamentos complementares. No caso das bombas de calor ar-água, consideradas FER, as necessidades energéticas resultam na soma destas duas parcelas. Para as necessidades térmicas de preparação de AQS, definido como “água potável aquecida até uma temperatura superior a 45°C”, considerou-se o consumo de 40 L/pessoa (DL n° 118/2013), bem como o perfil de distribuição de consumo de água quente, referenciado pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) no *software SCE.ER*, abaixo representado na Figura 1.

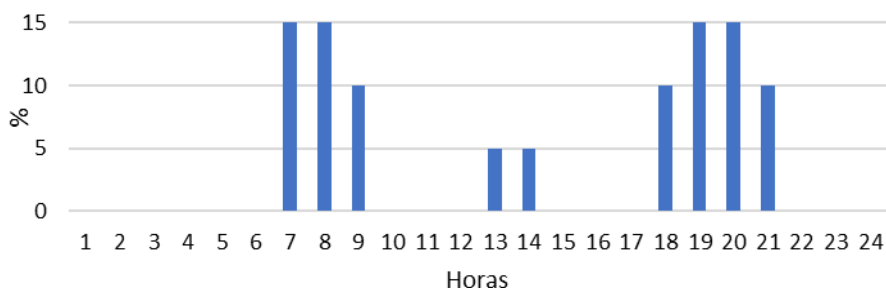


Figura 1 - Distribuição do Consumo de AQS, adaptado de DGEG (2018)

No que diz respeito às necessidades térmicas de AA, assumiu-se que os ganhos internos correspondem a 4 W/m<sup>2</sup> e as renovações horárias de ar ( $R_{ph}$ ) são de 0,6, conforme o Dec. Lei n° 118/2013 de 20 de agosto, sem considerar sombreamentos. Considerou-se também, 20°C como a temperatura de conforto de acordo com o estudo “*Principles for nearly zero-energy buildings*” para habitações de baixas necessidades energéticas (BPIE, 2011). Por fim, para representar os hábitos de consumo em Portugal, foi considerado um perfil de utilização fornecido pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) representado na Figura 2. De notar que todos os equipamentos têm a capacidade de provocar choque térmico para tratamento antilegionela, embora esse consumo não seja tido em conta.

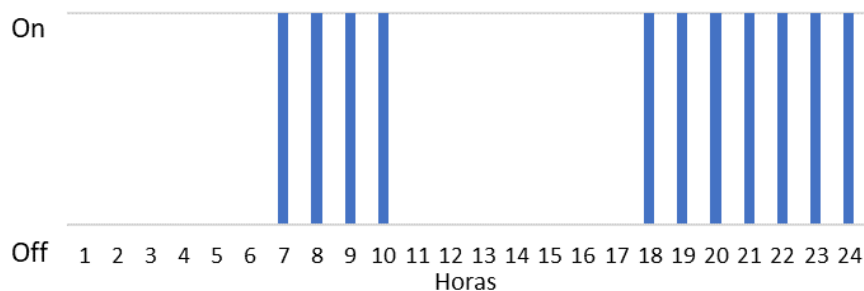


Figura 2 - Perfil de Utilização de Equipamentos de AA, adaptado de DGEG (2018)

## 2.2. Avaliação de Ciclo de Vida

Neste subcapítulo é apresentado o modelo de CV desenvolvido para avaliação dos diferentes equipamentos de aquecimento. Todas as considerações e processos relevantes do ciclo de vida encontram-se aqui descritos.

A ACV é uma ferramenta que permite avaliar a carga ambiental dos produtos nas diferentes fases do seu ciclo de vida, desde a extração de recursos até ao seu descarte, passando pela produção de materiais, do próprio produto e da sua utilização. Permite obter uma perspetiva holística do “berço ao túmulo” (Guinèe, 2002). Para a realização de um estudo ACV é necessário realizar uma abordagem com as seguintes fases (ISO 14040:2006):

- Definição de objetivos e âmbito;
- Análise de inventário;
- Análise de impacto;
- Interpretação de resultados.

### 2.2.1. Definição de Fronteiras e Unidade Funcional

Todos os fluxos de massa e energia são calculados em função da unidade funcional (UF). Como o foco do estudo é o aquecimento ambiente (AA) e águas quentes sanitárias (AQS), a unidade funcional foi definida como 1 MJ de AQS e 1 MJ de AA, ambos em termos de energia térmica útil. Considerou-se 20 anos para o tempo de vida dos equipamentos. As comparações entre os diferentes sistemas foram realizadas tendo em conta o modelo e inventário associados à produção de 1 MJ térmico de AQS e 1 MJ térmico de AA, considerando as fases de ciclo de vida e as fronteiras da avaliação ambiental e económica descritas na Figura 3.

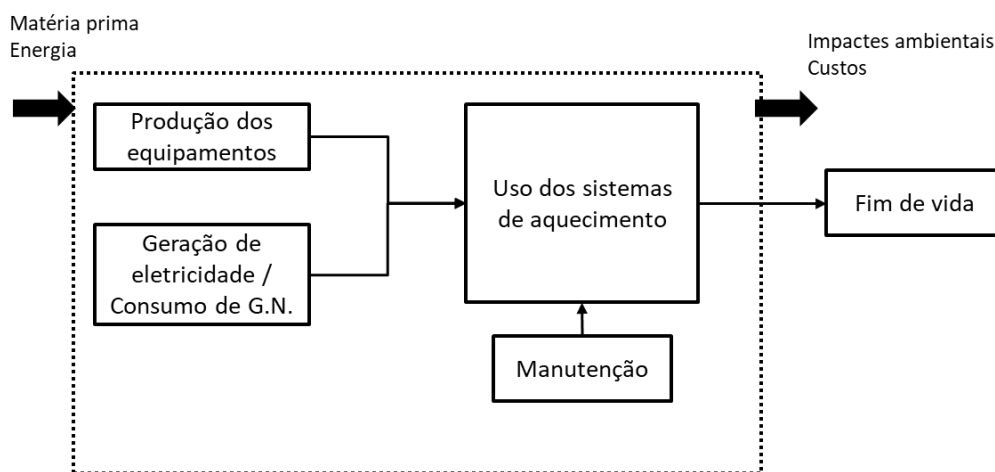


Figura 3 - Fronteiras do Sistema

### 2.2.2. Modelo e Inventário de CV:

Neste subcapítulo serão introduzidos os dados e procedimentos de cálculo. Pode dividir-se esta etapa em três fases: extração/produção, utilização e fim de vida (esta última encontra-se fora das fronteiras de sistema consideradas).

O inventário de ciclo de vida (ambiental e económico) dos diferentes sistemas terá em conta os equipamentos principais de produção de calor e os respetivos emissores. Componentes secundários, como tubagens, bombas de circulação e válvulas de segurança, não serão contabilizados neste estudo, bem como, os custos de instalação dos sistemas de aquecimento.

De modo a fazer o correto dimensionamento dos equipamentos foram também calculadas as cargas de pico para AA, apresentadas na Tabela 6. Visto as necessidades de AQS serem muito semelhantes entre todas as localidades, foi assumido que todas as habitações possuem os mesmos equipamentos. Embora haja casos sobredimensionados para AA, como Coimbra e Faro, todos os equipamentos têm capacidade de arrefecimento das habitações (à exceção da caldeira), compensando assim a potência elevada selecionada para estes casos.

**Tabela 6 - Cargas de Pico AA**

Tipologia	Carga de pico [kW]		
	Bragança	Coimbra	Faro
T1	1,4	0,9	0,7
T3	2,4	1,9	1,2
V5	9	3,7	2,3

As principais características dos sistemas de aquecimento e os custos de aquisição (sem IVA) para a avaliação económica encontram-se resumidas na Tabela 7. A escolha destes equipamentos teve por base uma extensa pesquisa das soluções existentes no mercado, recorrendo a catálogos de marcas de referência e vendedores. À exceção dos esquentadores, onde as suas características foram consultadas nos catálogos da Vaillant (2019) e o seu custo de aquisição no vendedor Leroy Merlin (2019), todos os equipamentos foram selecionados a partir do catálogo da BAXI (2019), que possui tanto as características técnicas dos equipamentos, como o seu custo de aquisição.

**Tabela 7 - Características e Custo de Aquisição dos Equipamentos para as Diferentes Tipologias de Habitação**

Tipologia	Equipamento	Referência	Potência [kW]	Peso [kg]	Dimensões [mm]	Gás refrigerante	Custo (aquisição equipamento) [€]
T1	Solar Termostático	Slim 250	-	44	2,5 m2	-	2178
		Acumulador aço esmaltado 200 l	-	106	Ø580 x 1305	-	284
	Esquentador	Vaillant 111	19,3	12	617*304*222	-	203
		Serie 2 (50l)	1,2	16	Ø451 x 610	-	1879
	Termoacumulador	BC ACS 180	1,5	102	Ø552*1670	R 134 A (0,8 kg)	1945
		Ext: LSGT 50-2M Int: 2 Mural LSGNW 20	4,8 2,15	36 9	800*545*315 800*300*198	R 32 (0,95 kg)	2788
	Solar Termostático	2 Slim 250	-	44	5m2	-	407
		Acumulador aço esmaltado 300 l	-	129	Ø580 x 1820	-	225
	Esquentador	Vaillant 141	24,3	15	617*385*222	-	2035
		Serie 2 (80 l)	1,2	21	Ø451 x 857	-	3687
Termoacumulador	BC ACS 230	1,5	116	Ø552*1990	R134 A (0,8 kg)	2875	
	Ext: LSGT 100-4M Int: 4 Mural LSGNW 20	11 2,15	74 9	985*808*395 800*300*198	R32 (2,3 kg)	6403	
Caldeira	Platinum MAX PLUS 33/33F	33	39,5	735*450*345	-	517	
	Platinum BC Monobloc 6 MR Acumulador aço esmaltado 300 l	5,85 -	59 129	825*675*300 Ø580 x 1820	R410A (1,8)	4041	
T3	Radiadores e toalheiros	Alumínio	-	45,8	-	-	407
	Solar	3 Slim 250	-	44	7,5 m2	-	2788
		AS 400-2E BAXI	-	156	Ø705 x 1672	-	5390
	Esquentador	Vaillant 141	24,3	15	617*385*222	-	4041
		BC ACS 300 IN E 2 Ext: LSGT 70-3M Int: 6 Mural LSGNW 20	1,75 7,9 2,15	105 46 9	Ø600*2000 834*655*328 800*300*198	R134A (1,45kg) R32 (1,05 kg)	2788
	Caldeira	Platinum MAX PLUS 40/40F	40	41	735*450*345	-	4041
		Platinum BC Monobloc 16 MR AS 400-2E BAXI	15,7 -	119 156	1000*1418*356 Ø705 x 1672	R410A (4,8)	10759
	Radiadores e toalheiros	Alumínio	-	127,35	-	-	1393



Os inventários de CV referentes à fase de produção dos equipamentos tiveram em conta as características técnicas dos equipamentos e foram modelados com base em processos da base de dados ecoinvent. No que diz respeito à fase de utilização, teve-se em conta o *mix* de produção de eletricidade e de gás natural, no contexto nacional. O *mix* de produção de eletricidade foi baseado nos estudos “Avaliação ambiental de ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal” de Marques *et al.* (2018) e “*Life-cycle assessment of electricity in Portugal*” de Garcia *et al.* (2014), considerando-se o fator de conversão de energia primária  $1,16 \text{ MJ}_{\text{primário}}/\text{MJ}_{\text{final}}$ . Já a informação respeitante ao gás natural, teve por base os estudo “*Upstream greenhouse gas emissions of natural gas consumed in Portugal*” de Safaei *et al.* (2017) e “*Life-Cycle Greenhouse Gas assessment of Nigerian Liquefied Natural Gas addressing uncertainty*” Safaei *et al.* (2015), sendo o fator de conversão de energia primária  $1,12 \text{ MJ}_{\text{primário}}/\text{MJ}_{\text{final}}$ .

Nos gases refrigerantes, utilizados nas bombas de calor, foi considerada uma perda de 6% (constante no plano de manutenção) da carga inicial por ano, conforme indicado por Caduff *et al.* (2014) e Johnson (2011). Devido à falta de informação, na base de dados ecoinvent, sobre os impactes para as categorias em estudo, assumiu-se que a fase de produção dos diferentes gases refrigerantes é igual para todos os casos. Quanto ao fim de vida, esta fase não foi considerada na presente dissertação, pois, segundo Johnson (2011), não é significativa no CV total.

### 2.2.3. Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida

Para o cálculo dos impactes de CV foi considerado o método “ReCiPe” *midpoint* (Goedkoop *et al.*, 2013). As categorias de impacto são apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8 - Categorias de Impacte Ambiental (ReCiPe)**

Categoria de impacte	Sigla	Unidade
Aquecimento global	AG	kg CO <sub>2</sub> eq
Depleção da camada de ozono	DO	kg CFC-11 eq
Acidificação terrestre	AT	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofização marinha	EM	kg P eq
Eutrofização de água doce	EU	kg N eq
Depleção de metais	DM	kg Fe eq
Depleção de combustíveis fósseis	DF	kg Oil eq

## 2.3. Avaliação Económica

De modo a avaliar o desempenho económico das diferentes soluções para aquecimento, recorreu-se a uma adaptação do Regulamento Delegado (UE) nº 244 de janeiro de 2012, que consiste num quadro metodológico comparativo para calcular os níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético. Neste, é feita uma análise de desempenho de várias soluções possíveis para a envolvente dos edifícios e/ou sistemas capazes de suprir as suas necessidades energéticas, que deve ser avaliado em função das necessidades de energia primária não renovável [kWh/(m<sup>2</sup>.ano)] e custo global [€/m<sup>2</sup>]. Como a unidade funcional deve ser comum a todo o estudo, serão apresentados os custos globais de cada sistema por MJ, sendo depois realizada uma análise de sensibilidade em que os resultados serão avaliados em função das necessidades de energia primária não renovável [MJ/(m<sup>2</sup>.ano)] por custo global [€/m<sup>2</sup>]. No custo global devem ser incluídos os custos de aquisição e manutenção, sendo os cálculos de rentabilidade obtidos sob perspetiva macroeconómica e financeira.

Nem todos os passos serão tidos em conta na presente dissertação, sendo a avaliação económica baseada no método desenvolvido pelo Doutor Sérgio Tadeu (2015) em “Rentabilidade da reabilitação energética de edifícios”, dividida nos seguintes módulos:

- **Módulo 1**

- Avaliação Económica de Tecnologias (AET), realizada com base em pesquisa de produtos existentes no mercado, consultando marcas, distribuidoras e vendedores de equipamentos para aquecimento.
- Dimensionamento de FER, realizado no *Solterm*, programa de simulação e dimensionamento de coletores solares térmicos e fotovoltaicos utilizado pelo DL nº 118/2013.

- **Módulo 2**

- Simulação de Desempenho Energético (SDE), realizada no programa de simulação dinâmica *EnergyPlus*<sup>TM</sup>.

- **Módulo 3**

- Simulação de Rentabilidade de Medidas (SRM) totalmente realizada na folha de cálculo (Anexo A), “\$e<sup>3</sup>”, gentilmente cedida pelo Doutor Sérgio Tadeu, onde é possível calcular o custo global de medidas, utilizando o VAL como indicador na perspetiva financeira e macroeconómica.

Os custos de investimento resultam de uma extensa pesquisa dos preços de mercado, apresentados na Tabela 7, os custos de manutenção anuais foram considerados 4% do investimento inicial para todos os sistemas que contêm bombas de calor, e 2% para os restantes, de acordo com a norma ISO EN 15459:2007, sendo considerada uma taxa de atualização de 4%.

Quanto aos custos da energia foram obtidos através da Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE, 2009) e análise de faturação (Galp, 2019). Para o gás natural, foi realizado um cálculo para estimar o consumo, em m<sup>3</sup>, de cada tipologia de habitação, na respetiva localidade. Quanto ao custo de eletricidade foi assumida uma potência contratada de 3,45; 4,6; e 6,9 kVA para T1, T3 e V5, respetivamente, sendo ainda adicionados os custos da taxa audiovisual, imposto especial e taxa de exploração. Dos dados introduzidos na folha de cálculo, resultam os custos de energia indicados na Tabela 9:

**Tabela 9 - Custos das Fontes de Energia**

Tipologia	Cidade (Potência contratada; escalão GN)	Eletricidade [€/kWh]		G.N [€/kWh]	
		Perspetiva macroeconómica	Perspetiva financeira	Perspetiva macroeconómica	Perspetiva financeira
T1	Bragança (3,45; 1)	0,1199	0,2617	0,0867	0,1066
	Coimbra (3,45; 1)		0,2786	0,0880	0,1083
	Faro (3,45; 1)		0,3309	0,0935	0,1150
T3	Bragança (4,6; 2)		0,2408	0,0697	0,0857
	Coimbra (4,6; 1)		0,2622	0,0731	0,0899
	Faro (4,6; 1)		0,2785	0,0760	0,0935
V5	Bragança (6,9; 3)		0,2272	0,0612	0,0752
	Coimbra (6,9; 2)		0,2487	0,0683	0,084
	Faro (6,9; 2)		0,2675	0,0716	0,881

Ainda são, para a perspetiva macroeconómica, imputados custos às emissões de carbono, considerando um fator de conversão de energia primária 1,16 kWh<sub>ep</sub>/kWh para a eletricidade e 1,12 kWh<sub>EP</sub>/kWh para o gás natural, conforme descrito no subcapítulo 2.2.2. O cálculo das emissões de gases de efeito de estufa considera a emissão de 0,096 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh<sub>EP</sub> para a eletricidade e 0,069 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh<sub>EP</sub> para o GN Finalmente, o custo das emissões é calculado considerando o custo de 0,02 €/kg CO<sub>2</sub> eq.

- **Módulo 4**

- Análise de Sensibilidade de Parâmetros (ASP), realizada para: i) taxa de desconto; ii) utilização de coletores solares; e iii) fatores de conversão de energia primária.

## **2.4. Análise de Sensibilidade**

Será realizada uma análise de sensibilidade a diferentes aspetos do estudo. Esta análise será realizada, apenas, para o T3 em Bragança, porque nesta tipologia são considerados todos os sistemas contidos nas outras tipologias de habitação e por se tratar também da cidade com maiores necessidades de aquecimento. Os pontos a analisar são os seguintes:

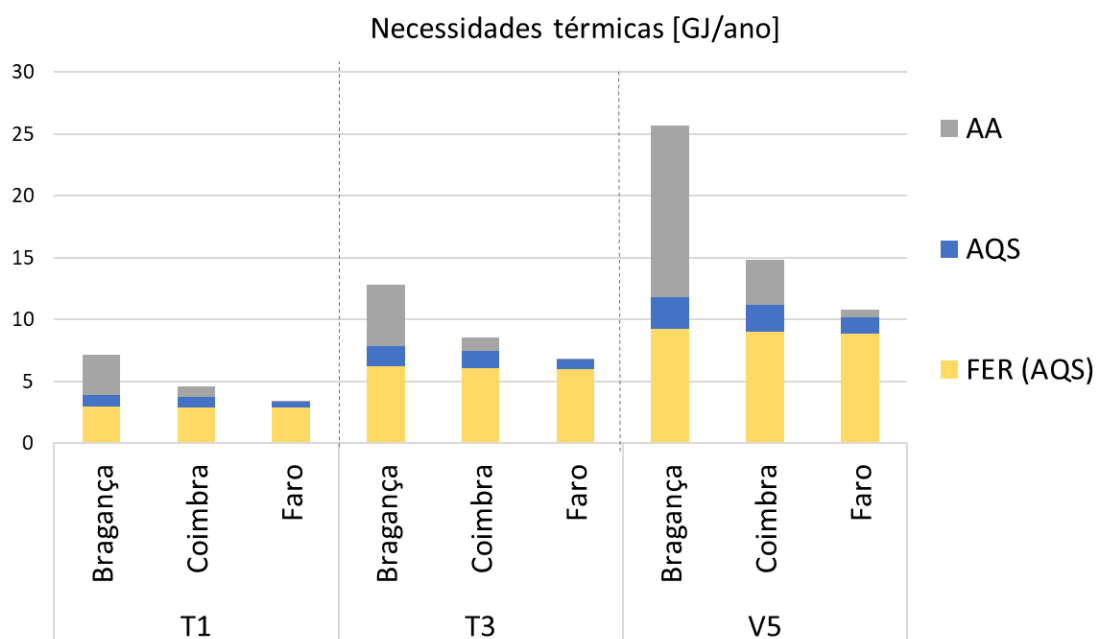
- Utilização de coletores solares (avaliação ambiental e económica):
  - Serão instalados coletores solares térmicos a todos os sistemas em que outrora não tinham e serão removidos a todos os sistemas que os possuíam. Visto a sua instalação ser obrigatória em novas habitações, esta análise permite verificar se, de facto, é vantajoso em termos ambientais e económicos.
- Emissão das perdas dos gases refrigerantes (avaliação ambiental):
  - Serão avaliadas as emissões dos gases refrigerantes utilizados pelas bombas de calor em estudo. Permitirá concluir quais as emissões de gases que mais contribuem para as diferentes categorias de impacto ambiental.
- Taxa de atualização (avaliação económica):
  - Sendo 4% o caso base desta análise económica, será realizada uma variação da taxa de atualização para 7%.
- Fatores de conversão de energia primária (avaliação económica):
  - Será realizada uma análise à utilização dos fatores de conversão de energia primária vigentes na legislação portuguesa que consideram 2,5 kWh<sub>ep</sub>/kWh para eletricidade e 1 kWh<sub>ep</sub>/kWh para o gás natural. Esta análise irá permitir avaliar os melhores sistemas, de acordo com a legislação portuguesa e com os propostos em estudo.

### 3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÓMICA DE CV: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussão da avaliação ambiental e económica dos sistemas de aquecimento, para diferentes tipologias de habitação (T1, T3 e V5). Encontra-se dividido em 3 subcapítulos, em que o primeiro apresenta as necessidades térmicas de cada tipologia de habitação, o segundo os resultados para as diferentes categorias de impacto ambiental e, o último, os resultados da avaliação económica.

#### 3.1. Necessidades Térmicas de Aquecimento

Embora o estudo seja realizado a 20 anos, são apresentados neste capítulo as necessidades térmicas anuais. Na Figura 4 apresentam-se os resultados da simulação dinâmica (AA) e as componentes de energia solar térmica e energia dos sistemas de apoio (AQS). De referir que as soluções construtivas são as mesmas em todas as localidades.



AA: Aquecimento Ambiente; AQS: Águas Quentes Sanitárias; FER: Fontes de Energia Renovável

Figura 4 - Necessidades Térmicas [MJ/ano]

Conforme pretendido, as soluções construtivas das habitações levam a baixas necessidades térmicas para AA, sendo que o dimensionamento dos coletores solares

térmicos mostra que estes suprimem cerca de 80% das necessidades de AQS (relatórios apresentados no anexo B. Tendo por base as necessidades térmicas apresentadas, é então possível fazer a análise ambiental e económica de CV dos diferentes sistemas e equipamentos estudados.

## **3.2. Avaliação Ambiental de CV**

Neste subcapítulo serão apresentados os impactes ambientais dos sistemas de aquecimento avaliados. No subcapítulo 3.2.1 encontram-se os resultados para as diferentes categorias de impacte ambiental em estudo, seguido do subcapítulo 3.2.2 que contém a análise de sensibilidade aos diferentes parâmetros descritos no subcapítulo 2.4. Serão identificados os melhores sistemas para cada tipologia de habitação na respetiva localidade, sendo que, para aumentar a robustez do estudo, o melhor sistema tem de apresentar uma diferença superior a 10% dos restantes, caso contrário não será considerado apenas um sistema, mas sim todos os que estiverem dentro deste intervalo

### **3.2.1. Resultados da Avaliação Ambiental**

Nas Figuras 5, 6 e 7, encontram-se os resultados da avaliação ambiental para o T1, T3 e V5, respetivamente. Adicionalmente, em anexo (Anexo C), são apresentados os impactes ambientais de ciclo de vida para as necessidades totais de aquecimento (AA e AQS) ao longo de 20 anos, para as diferentes tipologias de habitação e diferentes localizações.

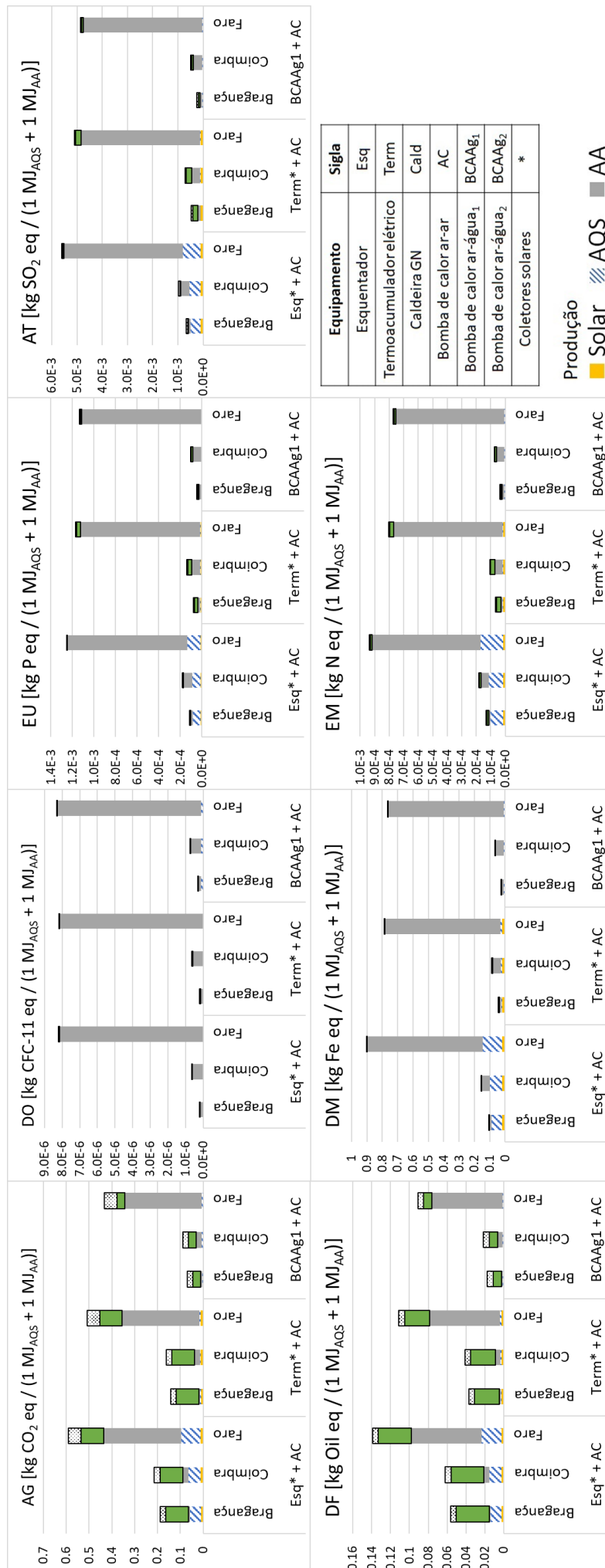


Figura 5 - Resultados da Avaliação Ambiental para T1

Os resultados obtidos nesta tipologia (T1) mostram que existe para todos os indicadores (exceto DO) um sistema com melhor performance ambiental, constituído pelos equipamentos BCAAg<sub>1</sub> (AQS) e AC (AA). Devido às baixas necessidades de energia térmica para AA em Faro, o impacto da produção dos equipamentos é muito elevado representando sempre mais de 70% dos impactos totais de CV. Nesta localidade, existem seis indicadores em que os sistemas BCAAg<sub>1</sub> + AC e Term\* + AC (diferença de impactos inferior a 10%) apresentam menores impactos, não existindo diferenças significativas na categoria DO, entre os três sistemas estudados.

No que diz respeito aos equipamentos para AQS, o equipamento com melhor performance ambiental é, claramente, a BCAAg<sub>1</sub>. Para os equipamentos considerados como fontes de energia renováveis (FER), a produção de coletores solares é pior em todas as categorias de impacto (exceto DO) devido aos gases refrigerantes das bombas de calor. Na fase de utilização, os equipamentos complementares aos coletores solares, são piores em todas as categorias exceto na DO. A fase de produção é, no geral, mais significativa que a fase de utilização para a maior parte dos indicadores e localidades, devido às baixas necessidades de AA.



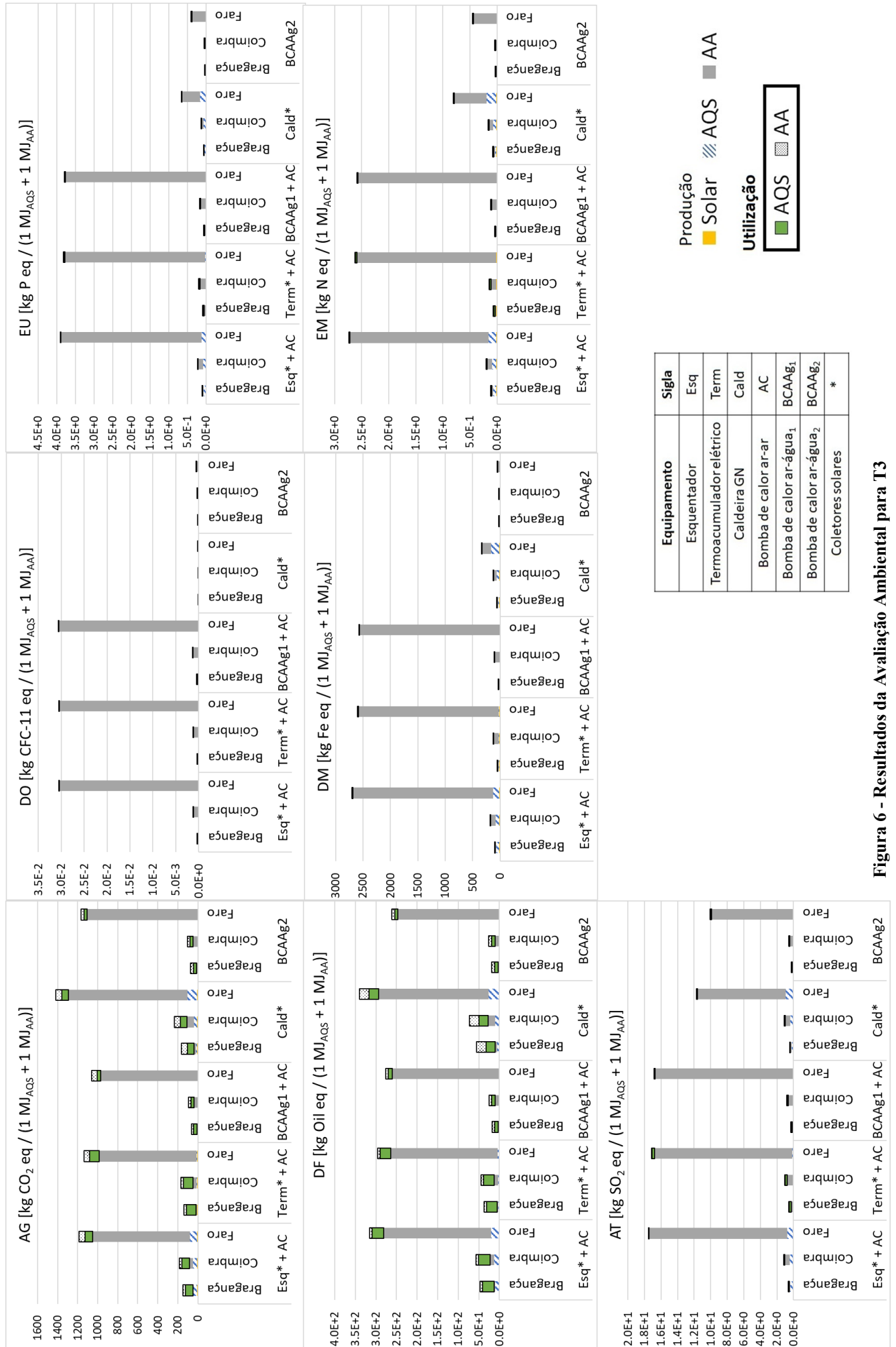


Figura 6 - Resultados da Avaliação Ambiental para T3

Dos resultados da Figura 6 verifica-se que para as categorias AT, EU, EM, DM e DF o sistema BCAAg<sub>2</sub> é o que tem melhor performance ambiental nas três localidades, não havendo diferenças significativas (inferiores a 10%) no indicador DM para o sistema BCAAg<sub>1</sub> + AC, em Bragança. O sistema BCAAg<sub>1</sub> + AC juntamente com BCAAg<sub>2</sub> é também o melhor sistema para a categoria de impacto DF, nas três localidades. Verifica-se que no indicador DO, o sistema Cald\* é o que apresenta melhor performance em todas as localidades. No indicador AG, o melhor sistema é o BCAAg<sub>1</sub> + AC para Coimbra, Bragança e Faro.

Resumidamente, é possível verificar uma tendência que classifica como melhor sistema o BCAAg<sub>2</sub> para todos os indicadores, exceto para o indicador DO e AG. Os sistemas que têm GN como fonte de energia (caldeira e esquentador) são as piores soluções para os mesmos indicadores, podendo ser apenas considerados como soluções favoráveis segundo a perspectiva do indicador DO.

De seguida é feita uma avaliação detalhada dos equipamentos com melhor performance para as componentes AQS e AA. No que diz respeito à componente de AQS, para as categorias de impacto AT, EU, EM e DM, o melhor equipamento é a BCAAg<sub>1</sub>, sendo para AG e DF a BCAAg<sub>2</sub>. Apenas para a categoria de impacto DO, o termoacumulador elétrico com apoio solar corresponde à melhor solução. Dos equipamentos avaliados para AA, a BCAAg<sub>2</sub> demonstrou ser o melhor equipamento nas categorias AT, EU, EM, DM e DF (nesta última categoria unicamente em Faro). A caldeira a gás natural demonstra ser a melhor solução em todas as localidades, de acordo com o indicador DO, sendo ar condicionado como o equipamento com menores impactos para a categoria AG.

A fase de produção é, no geral, mais significativa do que a fase de utilização para a maior parte dos indicadores e localidades, devido ao baixo consumo. Fazendo uma comparação entre os sistemas considerados FER, os sistemas compostos por coletores solares térmicos são piores na fase de produção do que as bombas de calor ar-água, em todos os indicadores, excetuando DO.

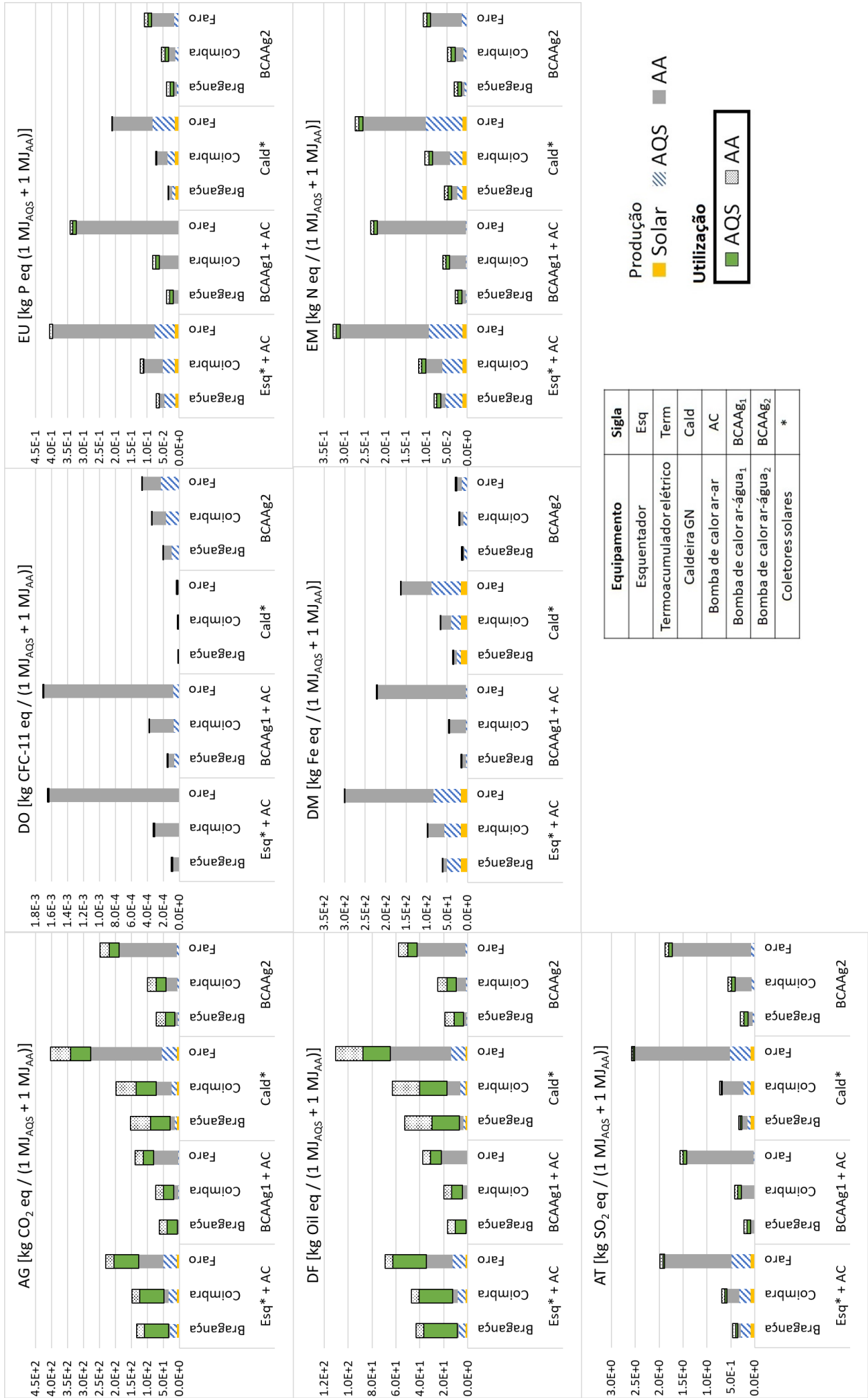


Figura 9 - Resultados da Avaliação Ambiental para X7

Os resultados da Figura 7 mostram que nesta tipologia de habitação não existe, à semelhança do T3, um sistema que apresente melhor desempenho ambiental em todos os indicadores analisados. O sistema BCAAg<sub>1</sub> + AC (em Bragança, Coimbra e Faro) apresenta a melhor performance ambiental nas categorias AG, AT e DF, sendo o sistema BCAAg<sub>2</sub> o melhor nas categorias EM, EU e DM. Em Bragança, para a categoria DM, os sistemas BCAAg<sub>1</sub> + AC e BCAAg<sub>2</sub> apresentam resultados semelhantes (diferença inferior a 10%). Já para a categoria EU, o melhor sistema é o Cald\*, sistema que apresenta também menores impactes na categoria DO. Os sistemas com impactes mais elevados são, à exceção da categoria DO, aqueles que utilizam a combustão de gás natural como fonte de energia.

O melhor equipamento para AQS consiste na BCAAg<sub>1</sub> para as categorias AT, EU, DM (todas as localidades), sendo que para o indicador AG apenas em Coimbra e Faro, e no indicador DF, apenas em Faro. A BCAAg<sub>2</sub> apresenta os menores impactes para o indicador AG, somente em Bragança, e DF, em Bragança e Coimbra. Ainda no âmbito AQS, relativamente à categoria DO, a melhor solução é a caldeira. No que toca aos equipamentos para AA, o AC tem os menores impactes nas categorias AG, AT e DF e a BCAAg<sub>2</sub> em EM e DM. Em Bragança, o equipamento que apresenta menores impactes para a categoria EU corresponde à caldeira e, em Coimbra e Faro, a BCAAg<sub>1</sub>, sendo, esta última a melhor solução para todas as localidades, para o indicador DO. Fazendo uma comparação entre os sistemas FER, pode-se inferir que os sistemas solares térmicos são sempre piores na fase de produção do que as bombas de calor ar-água, com exclusão do indicador DO, e na fase de utilização, os sistemas complementares aos coletores solares térmicos são sempre piores que as bombas de calor ar-água.

### 3.2.2. Análise de Sensibilidade

Neste ponto será realizada uma análise de sensibilidade a dois parâmetros: i) utilização de coletores solares térmicos e ii) emissão de gases refrigerantes.

#### i) Utilização de coletores solares:

Como explicado anteriormente, foi realizada uma análise à utilização de coletores solares térmicos, onde se retirou este equipamento aos sistemas que os possuíam e se colocou aos restantes. Os resultados dos sistemas para a presente análise de sensibilidade encontram-se resumidos na Figura 8, discutidos posteriormente. Realça-se que os sistemas representativos da utilização de coletores solares encontram-se assinalados com “\*”, estando limitados por uma linha amarela.

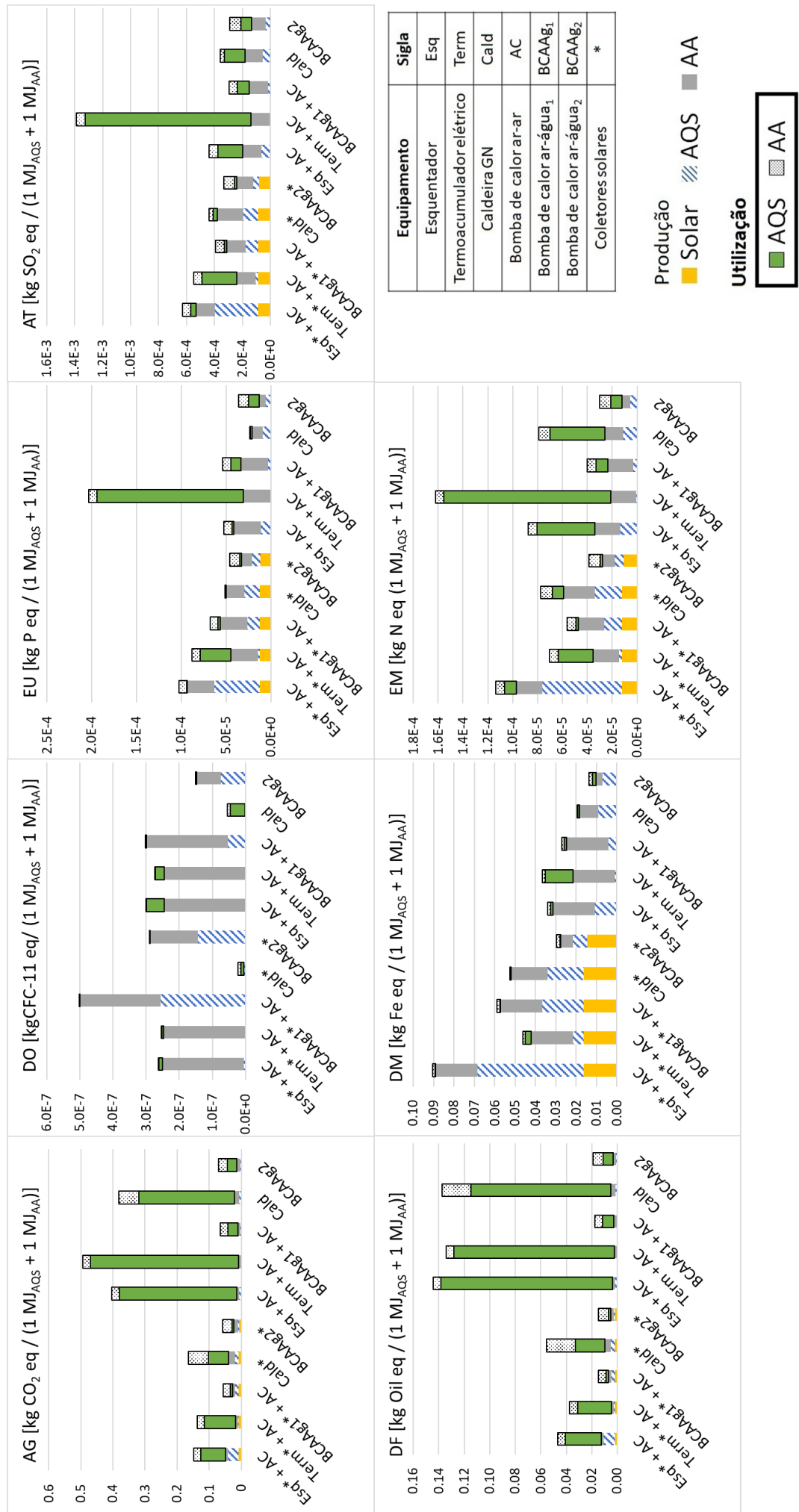


Figura 8 - Análise de Sensibilidade à Utilização de Coletores Solares (Avaliação Ambiental)

Da análise da Figura 8 verifica-se que o sistema  $BCAAG_1^* + AC$  é o apresenta menores impactes nas categorias AG e DF, o sistema Cald (constituído apenas pela caldeira) apresenta menores impactes para as categorias DM e EU. A utilização de sistemas com coletores solares térmicos evidencia menores impactes na maior parte das categorias consideradas, à exceção de DM.

Para o indicador AG, evidencia-se uma diminuição de impactes em todos os sistemas quando são utilizados coletores solares, sendo mais significativa esta diminuição na caldeira (72%) e menos significativa nas  $BCAAG_1 + AC$  e  $BCAAG_2$  com redução de 13% e 19%, respetivamente. Os resultados mostram também que no indicador DF os impactes associados à utilização de coletores solares térmicos diminuem em todos os sistemas (72% para o  $Term^* + AC$  e 15% para a  $BCAAG_1^* + AC$ ). Quanto ao indicador DO, observa-se uma diminuição dos impactes para todos os sistemas à exceção das bombas de calor. Para AT e EU a utilização de coletores solares térmicos traduz-se num aumento de impactes em todos os sistemas à exceção do  $Term^* + AC$ , bem como na categoria de impacte EM, onde não se evidenciam alterações significativas para o sistema composto apenas pela caldeira (2%). Os impactes associados à categoria DM aumentam em todos os sistemas compostos por coletores solares térmicos.

Depreende-se, através dos dados analisados, que a instalação de coletores solares térmicos reduz os impactes associados à utilização (AG e DF), aumentando os impactes associados à produção (DM). O sistema com maiores vantagens de utilização de coletores solares é o  $Term^* + AC$ , apresentando redução de impactes para todas as categorias (exceto DM), sendo os sistemas constituídos por bombas de calor ar-água aqueles que apresentam menos melhoria da performance ambiental (apenas para AG e DF).

ii) Emissão de gases refrigerantes:

Quanto à análise realizada à emissão de gases refrigerantes, verificou-se que estes apenas apresentam diferenças no indicador AG, não tendo qualquer impacte nas restantes categorias. Assim, na Tabela 10, apresentam-se os valores dos diferentes potenciais de AG.

**Tabela 10 - Potencial AG da Emissão de Gases Refrigerantes**

Gás Refrigerante	AG [kg CO <sub>2</sub> eq / kg]
R32	205
R134a	435
R410A	653

É então possível concluir que, dos gases estudados, o que apresenta melhor performance ambiental é o R32.

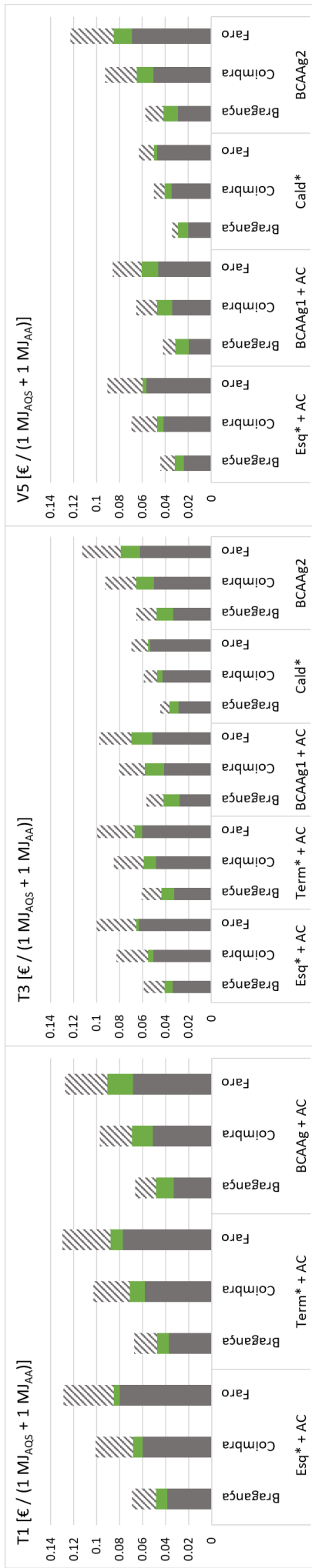
### **3.3. Avaliação Económica de CV**

Através da avaliação ambiental de ciclo de vida foi possível identificar quais os sistemas que apresentam maior sustentabilidade ambiental, no entanto é importante verificar se são viáveis em termos económicos. Neste subcapítulo serão apresentados os custos dos diferentes sistemas em estudo, em que no subcapítulo 3.3.1 são apresentados os resultados por UF e no 3.3.2 os resultados da análise de sensibilidade realizada a diferentes fatores da avaliação económica, descritos no subcapítulo 2.4. À semelhança da avaliação ambiental, também a avaliação económica terá um intervalo de segurança dos resultados de 10%.

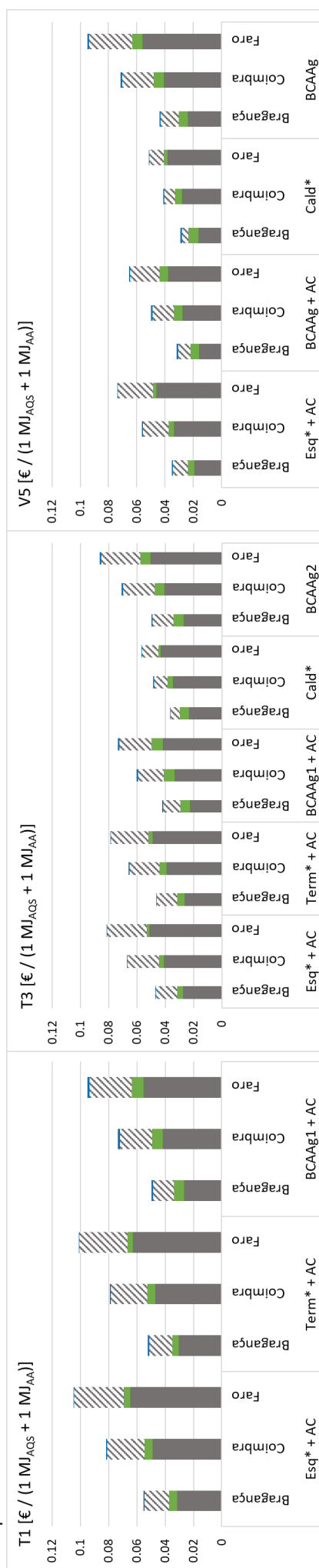
#### **3.3.1. Resultados da Avaliação Económica**

Na Figura 9 são apresentados resultados do custo global por MJ na perspetiva financeira e macroeconómica para a taxa de atualização de 4%.

### Perspetiva Financeira



### Perspetiva Macroeconómica



■ Sistemas ■ Energia ▨ Manutenção ■ Carbono

**Esq:** Esquentador; **Term:** Termoacumulador elétrico; **Cald:** Caldeira de condensação; **AC:** Bomba de calor ar-ar; **BCAAg1:** Bomba de calor ar-água (AQS); **BCAAg2:** Bomba de calor ar-água (AA + AQS); **\***: Coletor solar térmico

Figura 9 - Resultados da Avaliação Económica com o Método VLA



Dos resultados (Figura 9) para a tipologia de habitação T1, os sistemas BCAAg<sub>1</sub> + AC e Term\* + AC são os que apresentam maior rentabilidade económica, não havendo diferenças significativas entre eles (o sistema Esq\*+ AC é que apresenta maiores custos). Para o T3 e V5 o sistema Cald\* apresenta-se como o sistema economicamente mais viável, sendo a BCAAg<sub>2</sub> o sistema com maiores custos em ambas as tipologias, independentemente da localização.

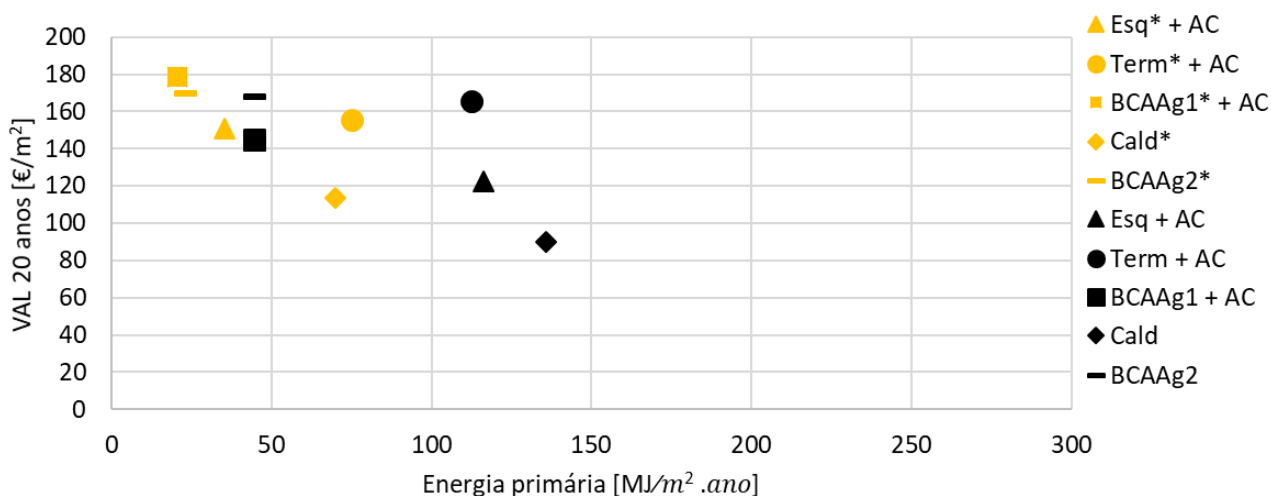
Da perspetiva macroeconómica, em que são contabilizados os custos de carbono (para os mesmos cenários da perspetiva financeira), verifica-se que para o T1 os sistemas que refletem o melhor investimento são BCAAg<sub>1</sub> + AC e Term\* + AC, tratando-se o Esq\* + AC, mais uma vez, da opção mais cara.

As tipologias de habitação T3 e V5 coincidem, igualmente, com a situação da perspetiva financeira, já descrita. Evidencia-se, novamente, o sistema BCAAg<sub>2</sub> como o mais caro, sendo o sistema Cald\* o mais rentável.

### 3.3.2. Análise de Sensibilidade

#### i) Utilização de coletores solares

Na Figura 10, encontra-se a compilação dos resultados obtidos num gráfico de energia primária, em função do custo global a 20 anos, referentes ao T3 em Bragança. Foi, então, realizada uma análise que permitisse entender a influência da utilização de coletores solares e para tal, foram comparados todos os sistemas com e sem recurso a estes equipamentos.



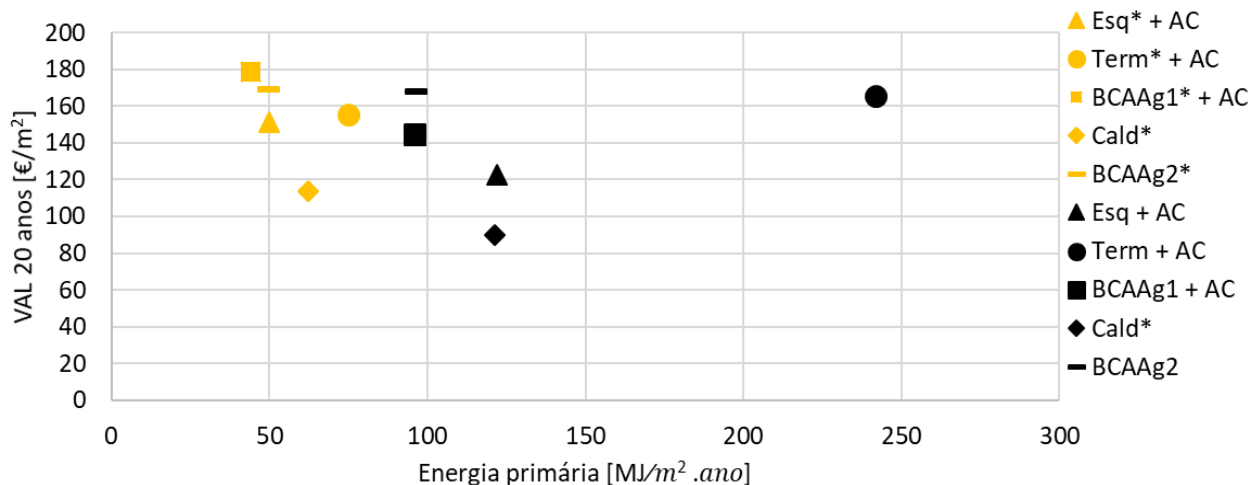
**Esq:** Esquentador; **Term:** Termoacumulador elétrico; **Cald:** Caldeira de condensação; **AC:** Bomba de calor ar-ar; **BCAAG<sub>1</sub>:** Bomba de calor ar-água (AOS); **BCAAG<sub>2</sub>:** Bomba de calor ar-água (AA + AOS); \*: Coletor solar  
**Figura 10 - Análise de Sensibilidade à Utilização de Coletores Solares (Avaliação Económica)**

Neste cenário, é possível verificar que os sistemas com menor consumo de energia primária são os que apresentam maiores custos. Dentro dos sistemas com os mesmos equipamentos, verifica-se um aumento do custo e diminuição da energia primária, sempre que são utilizados coletores solares térmicos, à exceção do Term\* + AC que apresenta maiores custos sem utilização destes equipamentos (Term + AC). Tal facto deve-se ao elevado consumo de energia, que leva a custos de utilização superiores ao custo de aquisição de coletores solares.

É possível eleger os sistemas BCAAg<sub>1</sub> + AC e Cald\* como os que apresentam melhor relação entre custo e necessidades de energia primária (com maior proximidade à origem). À exceção do sistema Term\* + AC, todos os sistemas com apoio de coletores solares térmicos são opções de investimento menos rentáveis.

## ii) Utilização de diferentes fatores de conversão de energia primária

Na Figura 11, encontra-se a análise para os mesmos cenários do ponto anterior, tendo-se alterado apenas os fatores de conversão de energia primária, para os vigentes na legislação nacional. Desta forma, é permitida a comparação dos melhores sistemas tendo em vista diferentes pressupostos.



**Esq:** Esquentador; **Term:** Termoacumulador elétrico; **Cald:** Caldeira de condensação; **AC:** Bomba de calor ar-ar; **BCAAg<sub>1</sub>:** Bomba de calor ar-água (AQS); **BCAAg<sub>2</sub>:** Bomba de calor ar-água (AA + AQS); \*: Coletor solar térmico

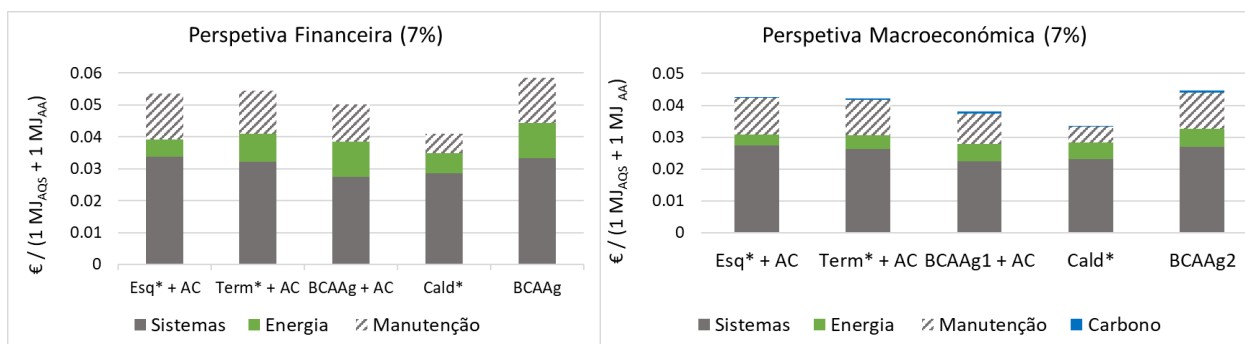
**Figura 11 - Análise de Sensibilidade aos Fatores de Conversão de Energia Primária**

À semelhança do caso anterior, o custo dos equipamentos é inversamente proporcional ao consumo de energia primária. Já no que diz respeito aos melhores cenários verifica-se uma mudança de paradigma, uma vez que neste caso a caldeira com e sem apoio de coletores solares térmicos é indicada como o sistema com menores custos.

Comparativamente à análise anterior, é possível verificar que os sistemas compostos por equipamentos que funcionam com recurso a eletricidade apresentam um consumo de energia primária superior, devido aos fatores de conversão utilizados pela legislação portuguesa serem mais elevados. Os equipamentos a GN têm uma diminuição do consumo de energia primária, embora menos acentuada. Isto reflete que os fatores de conversão de energia primária, em vigor na legislação portuguesa, são penalizadores face à atual situação em Portugal, prejudicando os equipamentos elétricos.

iii) Taxa de atualização:

Na Figura 12 encontram-se os resultados obtidos à análise de sensibilidade à taxa de atualização utilizada.



**Esq:** Esquentador; **Term:** Termoacumulador elétrico; **Cald:** Caldeira de condensação; **AC:** Bomba de calor ar-ar; **BCAAg1:** Bomba de calor ar-água (AQS); **BCAAg2:** Bomba de calor ar-água (AA + AQS); \*: Coletor solar térmico

**Figura 12 - Análise de Sensibilidade à Taxa de Atualização**

Os resultados evidenciados na Figura 12, são semelhantes aos obtidos para a taxa de atualização de 4% (Figura 9). O melhor sistema para Bragança continua a ser a Cald\*, não só na perspetiva financeira, mas também na perspetiva macroeconómica. É possível, ainda, realçar uma ligeira descida de cerca de 0,004€/MJ e 0,006€/MJ na perspetiva macroeconómica e perspetiva financeira, respetivamente, sendo que, não se evidencia uma mudança no desempenho económico dos sistemas. Em suma, pode dizer-se que o aumento da taxa de desconto, não altera as conclusões acerca da performance económica dos sistemas.

A Tabela 11 combina os resultados da análise de impactes ambientais e económicos de CV conjugando os melhores sistemas de aquecimento em função da tipologia de habitação e localização.

Tabela 11 - Resumo dos Resultados da ACV

Habituação	T1			T3			V5		
	Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
AG	BCAAg <sub>1</sub> + AC			BCAAg <sub>1</sub> + AC			BCAAg <sub>1</sub> + AC		
DO	Esq* + AC	Esq* + AC	Esq* + AC	Cald*			Cald*		
	Term* + AC	Term* + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC					
	Term* + AC	AC	AC	BCAAg <sub>2</sub>					
AT	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>2</sub>	BCAAg <sub>2</sub>	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC
EU	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>2</sub>			BCAAg <sub>2</sub>		
EM	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>2</sub>			BCAAg <sub>2</sub>		
DM	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>2</sub>			BCAAg <sub>1</sub> + AC	BCAAg <sub>2</sub>	BCAAg <sub>2</sub>
DF	BCAAg <sub>1</sub> + AC			BCAAg <sub>1</sub> + AC			BCAAg <sub>1</sub> + AC		
VAL (Financeira)	BCAAg <sub>1</sub> + AC			Cald*			Cald*		
VAL (Macroeconómica)	Term* + AC			Cald*			Cald*		
	BCAAg <sub>1</sub> + AC			Cald*			Cald*		
	Term* + AC			Cald*			Cald*		

INDICADORES

\*: equipamento apoiado com coletores solares térmicos

Da tabela verifica-se que para a tipologia de habitação T1 o sistema  $BCAAG_1 + AC$  apresenta melhor desempenho na maioria dos indicadores analisados. Para o caso do T3 o sistema  $BCAAG_2$  apresenta melhor performance em cinco dos sete indicadores ambientais analisados, sendo o sistema  $Cald^*$  o que apresenta melhor performance em termos económicos. Para a V5, existem dois sistemas ( $BCAAG_2$  e  $BCAAG_1 + AC$ ) que se destacam, apresentando melhor performance ambiental em três das sete categorias, sendo o sistema  $Cald^*$  aquele que apresenta menores custos, à semelhança do T3.

Assim, é possível concluir que é necessária uma criteriosa avaliação de todos os parâmetros avaliados para cada habitação e respetiva localidade, não havendo um único sistema que apresente melhor performance ambiental e económica em todas as situações analisadas.



## 4. CONCLUSÃO

A avaliação ambiental e económica de CV permitiu obter uma visão global da performance de diferentes sistemas de aquecimento, em diferentes localizações e tipologias de habitação, identificando as melhores soluções.

Do ponto de vista ambiental, os sistemas compostos por bombas de calor ar-água são aqueles que apresentam melhor desempenho para a maioria das categorias de impacto, mostrando ser uma boa solução para aplicar em qualquer das localidades e tipologias de habitação em estudo. Na perspetiva económica, o sistema preferencial consiste na caldeira apoiada com coletores solares térmicos para as tipologias T3 e V5, sendo a combinação da bomba de calor ar-água com ar condicionado a situação mais favorável para o T1.

Detalhando a análise por tipologia de habitação, verifica-se que no T1, o melhor sistema para as localidades Bragança e Coimbra é o BCAAg<sub>1</sub> + AC com melhor performance ambiental em seis de sete categorias analisadas, sendo também, a par do Term\* + AC o investimento com menores custos. Já em Faro, existem dois sistemas sem diferenças significativas entre si, o BCAAg<sub>1</sub> + AC e Term\* + AC, com melhor performance em cinco das sete categorias de impacto e nos dois indicadores económicos.

Relativamente à tipologia T3, o sistema com melhor desempenho ambiental é a BCAAg<sub>2</sub>, com melhores resultados em seis das sete categorias em Faro, e cinco das sete em Coimbra e Bragança. Em termos económicos, a solução mais favorável é Cald\* nas diferentes áreas geográficas.

Por fim, no que diz respeito à vivenda (V5), não existe nenhum sistema que apresente melhor performance em todas as categorias ambientais, sendo possível observar apenas que o BCAAg<sub>1</sub> + AC, a par do BCAAg<sub>2</sub>, são os melhores sistemas em três das sete categorias. Do ponto de vista económico, a melhor alternativa de investimento é o sistema Cald\* no T3 e V5.

Dos resultados obtidos pela análise de sensibilidade, é possível concluir utilização de coletores solares térmicos reduz os impactes ambientais nas categorias AG e DF em todos os sistemas, verificando-se a redução de impactes associados à utilização (aumentando na fase de produção). Estes equipamentos devem ser instalados nos sistemas que utilizam termoacumuladores elétricos, esquentadores e caldeiras para AQS, não havendo melhorias significativas da instalação com bombas de calor ar-água. Do ponto de vista económico, pode concluir-se que a instalação deste equipamento se traduz num aumento de

custos em todos os sistemas, exceto no Term\* + AC. Quanto aos fatores de conversão de energia primária em vigor na legislação portuguesa privilegiam os sistemas a gás natural, quando comparando com os fatores utilizados no presente estudo. A utilização de diferentes taxas de atualização não altera a opção de investimento, quer do ponto de vista financeiro, quer do ponto de vista macroeconómico. No que diz respeito às bombas de calor, devem ser selecionados equipamentos com utilização do gás refrigerante R32 em detrimento do R410A e R134-a.

Por fim, conclui-se que não existe uma solução única que apresente melhor desempenho em todos os indicadores avaliados.

#### **4.1. Limitações e Trabalho Futuro**

Durante a realização da presente dissertação, foram identificados alguns pontos que não puderam ser avaliados ou tiveram que ser simplificados, constituindo oportunidades para estudos futuros, conforme apresentado de seguida.

Foi considerada a utilização dos mesmos sistemas de aquecimento nas diferentes localidades. A adequação da potência dos equipamentos para as diferentes localidades surge como motivação de trabalho futuro.

A análise comparativa entre as diferentes localidades, teve por base a consideração das mesmas soluções construtivas. Propõe-se fazer um estudo em que se adeque as soluções construtivas às localidades.

Devido à falta de dados referentes à produção de gases refrigerantes utilizados nas bombas de calor, foi utilizado um modelo genérico, e não específico para cada um.

Finalmente, estender o estudo a equipamentos como caldeiras a biomassa e bombas de calor geotérmicas contribuirá para uma perspetiva mais alargada das soluções com melhor performance.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abusoglu, A., & Sedeeq, M. S. (2013). Comparative exergoenvironmental analysis and assessment of various residential heating systems. *Energy and Buildings*, 62, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.024>

BAXI (2019), [consultado em julho de 2019]. Disponível em <https://www.baxi.pt/produtos/catalogo-tabela>

Blom, I., Itard, L., & Meijer, A. (2010). LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. *Building and Environment*, 45(11), 2362–2372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.012>

Caduff, M., Huijbregts, M. A. J., Koehler, A., Althaus, H. J., & Hellweg, S. (2014). Scaling Relationships in Life Cycle Assessment: The Case of Heat Production from Biomass and Heat Pumps. *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), 393–406. <https://doi.org/10.1111/jiec.12122>

Comissão das Comunidades Europeias (2004). “Comunicação da comissão ao conselho e ao parlamento europeu: Política integrada de produtos - Desenvolvimento de uma reflexão ambiental centrada no ciclo de vida”. Bruxelas. [Consultado em 18 de agosto de 2019]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52003DC0302&from=PT>

Comissão Europeia, Regulamento Delegado (EU) N° 244/2012 (2012a) da Comissão que contempla a diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios, através do estabelecimento de um quadro metodológico comparativo, vol. L 81, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2012, p. 18–36.

Comodi, G., Bevilacqua, M., Caresana, F., Paciarotti, C., Pelagalli, L., & Venella, P. (2016). Life cycle assessment and energy-CO<sub>2</sub>-economic payback analyses of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels. *Applied Energy*, 164, 944–955. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.036>

Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) (2018), SCE.ER, versão 1.6.1, [consultado em julho de 2019]. Disponível em <http://www.dgeg.gov.pt/?cr=15161>

EC, (2003). Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Integrated Product Policy (IPP). Building on Environmental Life-Cycle Thinking. COM (2003) 302 final, 18.06.2003

Economidou, M., Atanasiu, B., Despret, C., Maio, J., Nolte, I., & Rapf, O. (2011). "Europe's buildings under the microscope". Buildings Performance Institute Europe (BPIE). ISBN: 9789491143014

Eicher, S., Hildbrand, C., Kleijer, A., Bony, J., Bunea, M., & Citherlet, S. (2014). Life cycle impact assessment of a solar assisted heat pump for domestic hot water production and space heating. *Energy Procedia*, 48, 813–818. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.094>

Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) (2009). "Portal ERSE". [Consultado em 20 de novembro de 2019]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/Paginas/home.aspx>.

Galp (2018). "Tarifário Galp Particulares". [Consultado em agosto de 2019]. Disponível em: [https://energia-galp.com/Tarifario\\_Galp\\_Particulares.pdf](https://energia-galp.com/Tarifario_Galp_Particulares.pdf)

Garcia, R., Marques, P., & Freire, F. (2014). Life-cycle assessment of electricity in Portugal. *Applied Energy*, 134(2014), 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.067>

Genkinger, A., Dott, R., & Afjei, T. (2012). Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production. 30, 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.013>

Goedkoop, M.J.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.A.J.; De Schryver, A.M.; Struijs, J.; Van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition (version 1.08) Report I: Characterisation. May 2013

Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, 39(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>

Greening, B., & Azapagic, A. (2014). Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK? *Renewable Energy*, 63, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.048>

Guinée, J.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. (2002). "Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background". Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, 692 pp

Hang, Y., Qu, M., & Zhao, F. (2012). Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States. *Energy and Buildings*, 45, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.057>

Instituto Nacional de Estatística, “Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico - 2010,” Lisboa - Portugal, 2011.

ISO 14040 (2006). Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. EN ISO 14040:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.

ISO 14044 (2006). Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. EN ISO 14044:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça

ISO 15459 (2007). Information technology. EN ISO 15459:2007 International Organization for Standardization, Geneva, Suíça

Johnson, E. P. (2011). Air-source heat pump carbon footprints: HFC impacts and comparison to other heat sources. *Energy Policy*, 39(3), 1369–1381. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.009>

Koroneos, C. J., & Nanaki, E. A. (2012). Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.001>

Koubogiannis, D., & Nouhou, C. (2016). How much Energy is Embodied in your Central Heating Boiler? *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012094>

Leroy Merlin (2019), [consultado em julho de 2019]. Disponível em [https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Aquecimento-e-Climatizacao/Aquecimento-de-agua/Esquentadores/WPR\\_REF\\_82201531](https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Aquecimento-e-Climatizacao/Aquecimento-de-agua/Esquentadores/WPR_REF_82201531)

Leroy Merlin (2019), [consultado em julho de 2019]. Disponível em [https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Aquecimento-e-Climatizacao/Aquecimento-de-agua/Esquentadores/WPR\\_REF\\_82202808](https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Aquecimento-e-Climatizacao/Aquecimento-de-agua/Esquentadores/WPR_REF_82202808)

Li, M., & Smith, T. M. (2012). Life Cycle Assessment of Residential Heating and Cooling Systems in Minnesota.

Marques, P., Kabayo, J. K., Garcia, R., & Freire, F. (2018). Avaliação Ambiental de Ciclo de Vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal. LALCA -

Revista Latino-Americana Em Avaliação Do Ciclo de Vida, 1(Espec), 110–127.  
<https://doi.org/10.18225/lalca.v2iespec.4467>

Menzies, G. F., & Roderick, Y. (2010). Energy and carbon impact analysis of a solar thermal collector system. *International Journal of Sustainable Engineering*, 3(1), 9–16.  
<https://doi.org/10.1080/19397030903362869>

Ministério da Economia e do Emprego, Decreto-Lei 118/2013, Portugal: Diário da República, 2013

Monahan, J., & Powell, J. C. (2011). A comparison of the energy and carbon implications of new systems of energy provision in new build housing in the UK. *Energy Policy*, 39(1), 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.041>

Odyssee-mure (2015) “HEATING CONSUMPTION PER M2”. [Consultado em 20 de novembro de 2019]. Disponível em: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/heating-consumption-per-m2.html>

Piekarski, C.M.; Luz, L.M.; Zocche, L.; Francisco, A.C. (2012). Life Cycle Impact Assessment Methods: a discussion of methods adoption in Brazilian specificities. *Revista Gestão Industrial* 09/2012; 8(3):222-240. DOI:10.3895/S180804482012000300011

Safaei, A., Freire, F., & Henggeler Antunes, C. (2015). Life-cycle greenhouse gas assessment of nigerian liquefied natural gas addressing uncertainty. *Environmental Science and Technology*, 49(6), 3949–3957. <https://doi.org/10.1021/es505435j>

Santos, C. e Matias, L., ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica da Envolvente dos Edifícios, Laboratório de Engenharia Civil, 2006.

Tadeu, S. F., Alexandre, R. F., Tadeu, A. J. B., Antunes, C. H., Simões, N. A. V., & Silva, P. P. Da. (2016). A comparison between cost optimality and return on investment for energy retrofit in buildings-A real options perspective. *Sustainable Cities and Society*, 21, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.11.002>

Tadeu, S.F. (2015). - Rentabilidade da reabilitação energética de edifícios (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/29148>

Uctug, F. G., & Azapagic, A. (2018). Life cycle environmental impacts of domestic solar water heaters in Turkey: The effect of different climatic regions. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1202–1216.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.057>

Vaillant (2019), [consultado em julho de 2019]. Disponível em <https://www.vaillant.info/clientes/produtos/tecnologia/esquentadores/>

# Anexo A – Folha de Cálculo $\$e^3$ (Gentilmente Cedida pelo Dr. Sérgio Tadeu)

Edifício de referência		Dados gerais				
Categoria	Tipologia	Localização	Construção	Altitude [m]	CDD [°C-dia]	HDD [°C-dia]
Habitação multifamiliar	T 3	Bragança	superior a 2006	158	50	2 015
Sistemas						
Código de cores		ACS	Aquecimento	* Ventilação	* Iluminação	Soma
Campos cinzas: Cabeçalhos, parâmetros ou equações (protegidos)		Esquentador	Nenhum	Nenhum	Nenhum	
Campos azuis: Dados recebidos de outras folhas de cálculo (protegidos)		0,86	Multi-Split	---	0,69	
Campos brancos: Dados de entrada		Gás Natural	4,00	---	0,69	
Envolvente		Solar Térmico	Elétrica	Elétrica	Elétrica	
Cobertura	Paredes	Pavimento	Envidraçados			
100,00	120,00	100,00	20,30			
2,25	0,96	-	2,90			
Ciclo de vida	10 000	10 000	10 000	10 000		
Custo de invest. [€]	-	-	-	-		
Renováveis		Solar Fotovoltaico				
Produção [kWh.a]	1 726	0				
Ciclo de vida	10 000	10 000				
Custo de invest. [€]	2 788	0				
Parâmetros adicionais		Sala [m²]:	Manutenção:	4%		
		IVA:	IVA FER:	23%		
Perspetiva Financeira		Taxa de Descont. 4%	Custo Global <sub>ip</sub> : 15 103	Custo Global <sub>op</sub> : 15 557	Custo Global <sub>ip</sub> : 20 085	VAL ↓
Investimentos		Envidraçados	Sistemas	Renováveis	Soma	
-	-	5 185,68	3 429	8 615	8 615	
0,00%	0,00%	34,34%	22,71%	57,04%	57,04%	
Custos		Energia	Manutenção	Soma		
		1 804,44	4 683,18	6 488	6 488	
		11,95%	31,01%	42,96%	42,96%	
Investimentos		Isolamento	Envidraçados	Sistemas	Renováveis	Soma
		-	-	4 216,00	2 788	7 004
		0,00%	0,00%	35,22%	23,29%	58,52%
Custos		Energia	Manutenção	Carbono	Soma	
		1 101,30	3 807,47	57	4 965	
		9,20%	31,81%	0,47%	41,48%	
Perspetiva Macroeconómica		Taxa de Descont. 4%	Custo Global <sub>ip</sub> : 11 969	Custo Global <sub>op</sub> : 12 276	Custo Global <sub>ip</sub> : 15 921	
Investimentos		Isolamento	Envidraçados	Sistemas	Renováveis	Soma
		-	-	4 216,00	2 788	7 004
		0,00%	0,00%	35,22%	23,29%	58,52%
Custos		Energia	Manutenção	Carbono	Soma	
		1 101,30	3 807,47	57	4 965	
		9,20%	31,81%	0,47%	41,48%	

Figura 13- Impressão da Célula de Introdução de Dados da Folha de Cálculo  $\$e^3$



## ANEXO B – RELATÓRIOS DO DIMENSIONAMENTO DE COLETORES SOLARES

-----  
 Localização, posição e envolvente do sistema  
 -----

Concelho de Bragança

Coordenadas nominais: 41.8°N, 6.7°W

TRY para RCCTE/STE e SOLTERM ( LNEG(2009) [www.lneg.pt](http://www.lneg.pt) [solterm.suporte@lneg.pt](mailto:solterm.suporte@lneg.pt))

Obstruções do horizonte: Instalação

Orientação do painel: inclinação 31° - azimute 0°

-----  
 Balanço energético mensal e anual  
 -----

	Rad.Horiz. kWh/m <sup>2</sup>	Rad.Inclin. kWh/m <sup>2</sup>	Desperdiçado kWh	Fornecido kWh	Carga kWh	Apoio kWh
Janeiro	40	66	.	110	207	97
Fevereiro	56	82	.	122	184	62
Março	99	124	.	159	196	37
Abril	132	144	3.	161	184	23
Maio	175	174	8.	173	180	6
Junho	197	186	19.	161	163	2
Julho	217	211	38.	160	160	0
Agosto	188	200	35.	161	161	0
Setembro	120	144	.	159	164	5
Outubro	75	104	.	148	183	35
Novembro	46	72	.	115	191	76
Dezembro	34	59	.	97	206	108
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Anual	1380	1565	104.	1728	2179	451

Fracção solar: 79.3%

Rendimento global anual do sistema: 23%

Produtividade: 365 kWh/[m<sup>2</sup> colector]

**Figura 14 - Relatório do Dimensionamento de Coletores Solares Térmicos para o T3 em Bragança**





# ANEXO C – IMPACTES TOTAIS DE CV

• T1

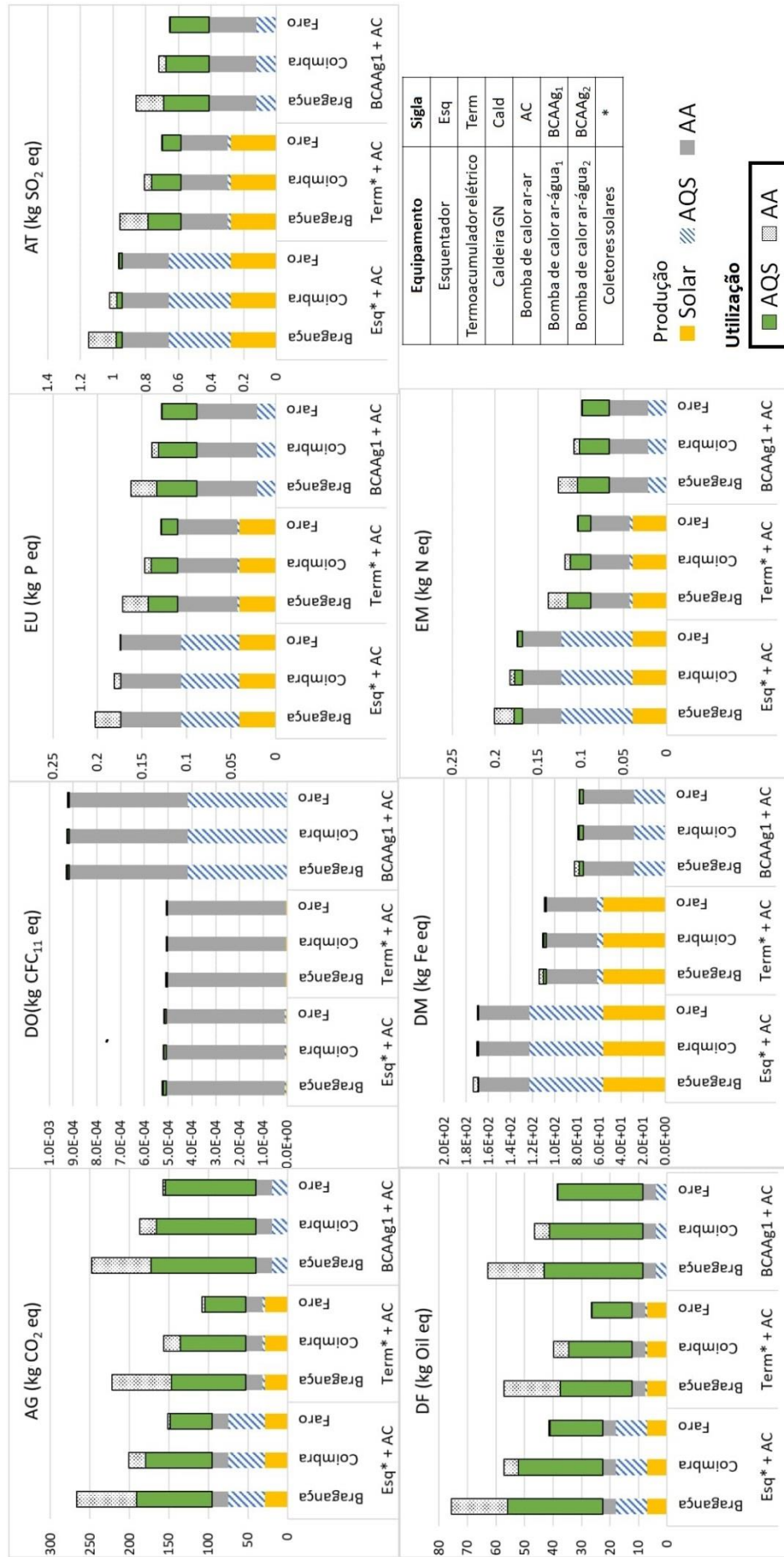


Figura 15 - Impactes Totais da Produção e Utilização de 20 Anos dos Sistemas de Aquecimento (T1)

• T3

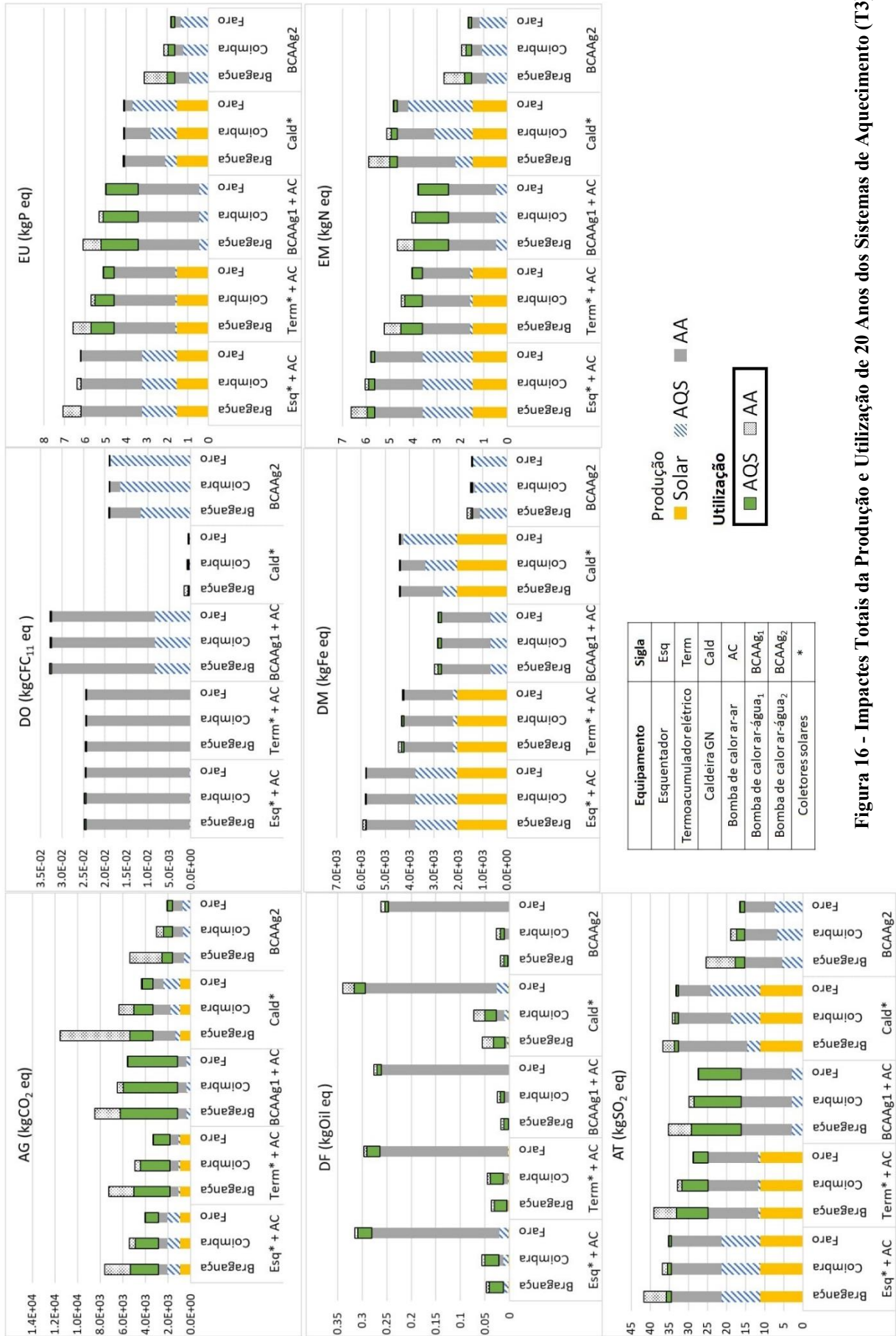


Figura 16 - Impactes Totais da Produção e Utilização de 20 Anos dos Sistemas de Aquecimento (T3)

• V5

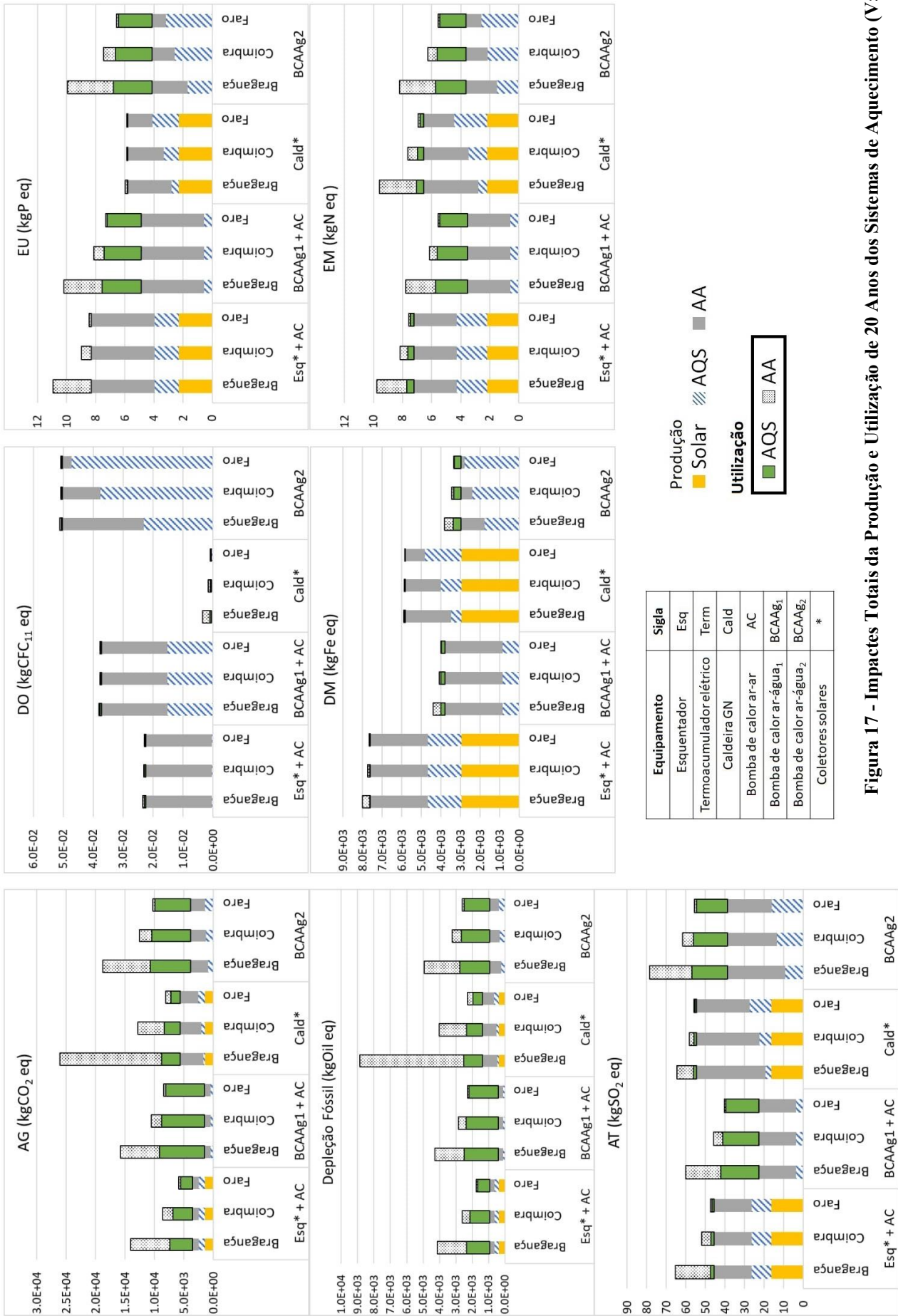


Figura 17 - Impactes Totais da Produção e Utilização de 20 Anos dos Sistemas de Aquecimento (V5)