



M 2020

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO - ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS AVAC E TIPOLOGIA DE EDIFÍCIOS

JOÃO LUÍS MONTEIRO MARTINO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Avaliação de emissões de carbono - estudo comparativo entre sistemas AVAC e tipologia de edifícios.

Dissertação de Mestrado

de

João Luís Monteiro Martino

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

A400 - Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda.



Orientador na FEUP: Prof. Adélio Mendes

Coordenador na A400: Eng. Paulo Félix



abril de 2021

Agradecimentos

À Isabel, minha mãe, um obrigado especial porque sem ela nada era possível. Agradeço a todo o esforço feito em prol da minha formação e por sempre acreditar nas minhas capacidades. Obrigado pelo amor e suporte.

À Patrícia, minha namorada, agradeço toda a paciência, apoio, companheirismo e presença. Por estar nos melhores e piores momentos, por tornar os piores em bons e os melhores em melhores momentos ainda, pelo exemplo de pessoa que representa, um obrigado.

Ao Armando, meu amigo, que por toda a ajuda, conselhos e saber ao longo da minha vida me tonaram na pessoa que sou hoje, um obrigado.

A toda a minha família, um obrigado por todo apoio.

Ao Professor Adélio Mendes, um forte elogio por toda a ajuda, saber e inspiração. Fico extremamente agradecido pelo apoio que me deu durante a elaboração da dissertação.

Um reconhecimento enorme à Engenheira Fábيا Leal, incansável no apoio que me deu ao longo de toda a tese. Fico extremamente agradecido não só por toda a partilha de conhecimentos e experiências, como também, por toda a constante motivação na realização desta tese.

Um sincero agradecimento ao Engenheiro Paulo Félix, por ter possibilitado a realização do presente trabalho.

Ao Diogo, João, Jorge e Tiago, um obrigado pela amizade, apoio e partilha de conhecimentos ao longo destes 5 anos.

A todos os que contribuíram para que de alguma forma a elaboração deste trabalho fosse possível, um obrigado.

“A ship is always safe at the shore, but that is not what it is built for.”

(Albert Einstein)

Resumo

Como consequência das alterações climáticas, tem-se verificado na sociedade uma adoção de uma mentalidade mais sustentável. O sector do aquecimento e arrefecimento é responsável por 40 % das emissões globais de CO₂ referentes à produção de energia. Neste sentido, o presente trabalho estuda o ciclo de vida dos dois sistemas AVAC projetados para um edifício residenciais. Os sistemas considerados foram sistema 1 - destinado a satisfazer as necessidades de aquecimento e arrefecimento e composto por bombas de calor ar-ar (unidades interior e exterior) e tubagem de cobre; sistema 2 - destinado apenas a satisfazer as necessidades de aquecimento e composto por radiadores elétricos.

Desta forma para o estudo foi utilizada a ferramenta ONE CLICK LCA e implementada uma metodologia de análise de ciclo de vida. Desta foram alvo de estudo as fases de ciclo de vida correspondentes às etapas de extração, processamento e transporte de matéria prima e a manufatura. Também, quanto fase de processo de construção foi contabilizado o de transporte do equipamento. Quanto à fase de uso, foram consideradas as etapas de uso ou aplicação do produto instalado, manutenção, reparação, substituição e reforma. Foi ainda considerada energia utilizada aquando da operação dos equipamentos e quanto à fase de fim de vida foram considerados os processos de demolição, de transporte dos resíduos, de valorização e de envio para aterro. Foi ainda objeto de estudo os futuros impactos ambientais que poderão ser evitados se os resíduos provenientes dos equipamentos dos sistemas forem valorizados. A categoria de impacto de interesse no presente estudo, corresponde ao potencial de aquecimento global e os seus resultados são quantificados em equivalente de emissões de CO₂.

Concluiu-se que quanto às emissões de gases de efeito de estufa totais dos dois sistemas, para um período de operação inferior a 11 anos o sistema 1 é ambientalmente mais favorável, e a partir dos 11 anos de operação o sistema 2 possui um menor impacto ambiental. Quanto à viabilidade económica da utilização dos dois sistemas concluiu-se que o sistema 1 é mais dispendioso que o sistema 2.

Palavras Chave:

Sustentabilidade, sistema AVAC, análise de ciclo de vida, gases com efeito de estufa, ONE CLICK LCA.

Abstract

Due to climate change, there has been a more sustainable mentality in society. The heating and cooling sector accounts for 40% of global CO₂ emissions from energy production. Regarding this, the present work studies the life cycle of the two HVAC systems designed for a residential building. The systems considered were: system 1 - designed to meet the heating and cooling needs and consist of air-to-air heat pumps (indoor and outdoor units) and copper piping; system 2 - intended only to meet the heating needs and composed of electric radiators.

Therefore, the ONE CLICK LCA software was used in this study and a life cycle assessment methodology was implemented. The target of this study was the life cycle phases corresponding to the stages of extraction, processing and transport of raw materials and manufacturing. Also, concerning to the construction process was accounted the transportation of the equipment. The stages of use or application of the installed product, maintenance, repair, replacement and reform were considered regarding the use phase. It was also considered energy used during the operation of the equipment. As for the end-of-life phase, the processes of demolition, transport of waste, recovery and landfilling were considered. It was still aim of the study to quantify the future environmental impacts that can be avoided if waste from the equipments of the systems were valorized. The assessed impact category of interest in this study corresponds to the potential of global warming and its results are quantified in equivalent CO₂ emission equivalent.

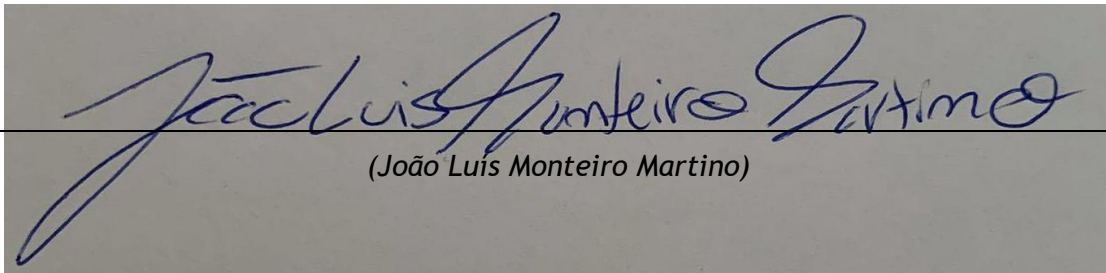
It was concluded that the total greenhouse gas emissions of the two systems, for an operating period of less than 11 years the system 1 is more environmentally friendly, and from the 11 years of operation system 2 has a lower environmental impact. As for the economic feasibility of using the two systems, it was concluded that system 1 is more expensive than system 2.

Keywords:

Sustainability, HVAC system, life cycle assessment, greenhouse gases, ONE CLICK LCA.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.



(João Luís Monteiro Martino)

Porto, 15 de março de 2021

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Contributos do autor para o Trabalho	2
1.4	Organização da Dissertação	2
2	Contexto e Estado da Arte	4
2.1	Estudo do ciclo de vida	4
2.2	Descarbonização da economia.....	6
2.3	Sector da construção.....	8
2.4	Sistemas AVAC	10
2.4.1	Equipamentos que integram os sistemas AVAC	11
2.4.2	Classificação e descrição dos sistemas AVAC	15
2.5	Estado de Arte	18
3	Metodologia	20
3.1	Declaração ambiental do produto	20
3.2	Ferramentas de estudo de ciclo de vida.....	21
3.2.1	One Click LCA.....	21
3.2.2	Tally for Revit	22
3.2.3	Athena Impact Estimator (IE)	22
3.2.4	SimaPro.....	22
3.2.5	GaBi.....	22
3.3	Ferramenta de análise de ciclo de vida utilizada.....	24
3.3.1	Fluxo de trabalho	24
4	Casos de estudo	27
5	Resultados e Discussão.....	29
5.1	Análise ambiental e energética	29
5.1.1	Emissões incorporadas	29

5.1.2	Emissões operacionais	32
5.1.3	Comparação das emissões de GEE totais dos dois sistemas	34
5.2	Análise económica	36
6	Conclusões	39
7	Avaliação do trabalho realizado.....	41
7.1	Objetivos Realizados	41
7.2	Sugestões para futuros trabalhos	41
7.3	Apreciação Final	41
8	Referências	43
	Anexo A - Tarifas da eletricidade.....	49
	Anexo B - Exemplo de folha de resultados obtidos na ferramenta ONE CLICK LCA para uma ACV	50
	Apêndice A - Mapa de trabalhos e quantidades.....	51
	Apêndice B - Tabela de dados de entrada na ferramenta ONE CLICK LCA.....	55
	Apêndice C - Resultados obtidos para as emissões de GEE através da ferramenta ONE CLICK LCA	57

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 - Gráficos representativos da importância da molécula de CO₂ no efeito de estufa. a) Radiação transmitida pela atmosfera; b) Espectro de emissão de um corpo negro a 14 °C; c) Concentração de CO₂ na atmosfera ao longo do tempo. (Extraído de [7-9]).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2 - a) Representação gráfica da intensidade carbónica da economia portuguesa (verde) e da média da união europeia (laranja) ao longo do tempo. b) Representação gráfica de indicadores económicos, energéticos, demográficos e ambientais ao longo dos anos, tendo por base valores do ano 1990. (Adaptado de [48,49])</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.3 - a) Quantidade de dióxido de carbono equivalente associado à produção de materiais para cada setor. b) Quantidade de GEE emitidos por cada setor no Mundo (Extraídos de [15,50])</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.4 - a) Divisão das fases de um ciclo de vida de um edifício quanto as emissões de CO₂. (adaptado de [19]) b) Peso que cada fase de um ciclo de vida de um edifício representa quanto às emissões totais de CO₂. (extraído de [20])</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5 - Distribuição do uso final de energia (esquerda) e de emissões de GEE (direita), por atividade no setor residencial. (extraído de [51])</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.6 - Esquema de funcionamento de: a) Chiller de adsorção; b) Chiller de absorção. (Extraído de [52,53]).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.7 - Sistema de refrigeração solar. (extraído de [54]).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.8 - Esquema do ciclo de compressão de vapor. (extraído de [33]).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.9 - Unidade de tratamento de ar. (extraído de [30]).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.10 - Esquemas representativos de diferentes tipos de ventilação. a) natural; b) forçada; c) híbrida. (Extraído de [54,55]).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.11 - Sistema de climatização: a) centralizado; b) descentralizado. (extraído de [18])</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.1 - Interface da ferramenta One Click LCA.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.2 - Representação esquemática das etapas do estudo de ciclo de vida realizadas no presente trabalho.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.3 - Fases do ciclo de vida segundo as normas EN 15978 e EN 15804.[56]</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.1 - Edifício de estudo para a implementação de um sistema AVAC.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5.1 - Representação gráfica da quantidade de emissões proveniente de cada fase de ciclo de vida para os sistemas 1 e 2, respetivamente a) e b).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5.2 -Representação gráfica das emissões de GEE referentes à fase D.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 5.3 -Representação gráfica das emissões de GEE totais inerentes ao carbono incorporado.</i>	<i>32</i>

Figura 5.4 - Representação gráfica das emissões de GEE resultantes da fase B6 do ciclo de vida dos sistemas. 33

Figura 5.5 - Representação gráfica das emissões totais dos dois sistemas ao fim de 1, 5, 10, 11, 12, 20 e 23 anos. 35

Figura 5.6 - Representação gráfica das emissões totais dos dois sistemas ao fim de 30, 36, 44, 45 e 100 anos. 35

Figura 5.7 - Representação gráfica do custo total de cada sistema para diferentes períodos de cálculo considerando: a) valor médio para o preço de eletricidade; b) valor máximo para o preço de eletricidade 37

Figura B.1 - Exemplo de uma folha de resultados de uma ACV. 50

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Emissões produzidas por três sistemas AVAC (VAV, chilled beam e UAD) e em diferentes fases do ciclo de vida. (adaptado de [1]).....</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3.1 - Normas regentes em diferentes categorias para aprovação de uma DAP. Adaptado de [41].</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 3.2 - Comparação das diferentes ferramentas ACV existentes. (Adaptado de [46]).</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 4.1 - Características de cada sistema dos casos de estudo.</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 5.1 - Quantidade de GEE emitidos por cada equipamento.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 5.2 - Custos anuais de cada sistema e para cada cenário financeiro considerado.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela A.1 - Tarifas Transitórias de Venda a Clientes Finais em média tensão e baixa tensão Portugal continental. Extraído de [47].</i>	<i>49</i>
<i>Tabela A.1 - Mapa de trabalho e quantidades elaborado para os casos de estudo.</i>	<i>51</i>
<i>Tabela B.1 - Folha de excel utilizada para a importação para a ferramenta dos dados dos sistemas em estudo.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela C.1 - Dados das quantidades de emissões de gases de efeito de estufa para cada sistema e para os diferentes períodos de cálculo.</i>	<i>57</i>

Notação e Glossário

c	Constante de boltzman	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
COP	Coeficiente de desempenho	
E_λ	Irradiação espectral	$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
EER	Rácio de eficiência energética	$BTU \cdot W^{-1} \cdot h^{-1}$
h	Constante de plank	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$
k	Constante da velocidade da luz	$m \cdot s^{-1}$
Q_e	Energia fornecida	$W \cdot h$
Q_s	Energia de saída	BTU
T	Temperatura	$^\circ C$
W_e	Potência fornecida	W
W_s	Potência de saída	W

Letras gregas

λ	Comprimento de onda	nm
-----------	---------------------	----

Índices

CO ₂ e	Equivalentes de dióxido de carbono
e	Entrada
s	Saída

Lista de Siglas

ACV	Análise de ciclo de vida
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
BIM	Building information modeling
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
COP	Coefficient of performance
DAP	Declaração ambiental de produto
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EER	Energy efficiency ratio
GEE	Gases com efeito de estufa
ILFI	International Living Future Institute
ISO	International Standard Organization
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MTQ	Mapa de quantidades e trabalhos
OM	Operação e manutenção
PNEC	Plano nacional de energia e clima
RCP	Regras de categoria de produto
UDA	Unidade de distribuição de ar sob o chão
UTA	Unidade de tratamento de ar
UTAN	Unidade de tratamento de ar novo
VAC	Volume de ar constante
VAV	Volume de ar variável
VRV	Volume de refrigerante variável

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

A crescente preocupação ambiental, sobretudo proveniente dos impactos das atividades humanas nos diversos ecossistemas, despoletou uma drástica mudança de mentalidade política, onde se tem observado um aumento de políticas “verdes”, que, entre outras, apoiam e promovem as fontes de energia renovável e a redução de gases de efeito de estufa. Também na economia observa-se uma mudança de paradigma, onde o pilar de crescimento desta não se baseie numa economia linear, mas sim num modelo de economia circular. Por último em termos sociais tem-se noticiado uma mudança de hábitos que visam um menor desperdício de recursos e produção de resíduos.

De todas as consequências ambientais das atividades antropogénicas, destaca-se o aquecimento global. Este tem demonstrado uma cascata de efeitos ambientais, incluindo a subida do nível do mar e alterações na quantidade e padrão da precipitação. Estas alterações podem aumentar a frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, tais como inundações, secas, ondas de calor, furacões e tornados. Outras consequências incluem a produtividade agrícolas, recuo glacial, redução dos fluxos de verão dos cursos de água, extinções de espécies e aumentos nas gamas de vetores da doença.

Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado possibilitam um maior conforto aos seres humanos num ambiente interior, no entanto os problemas ambientais inerentes aos elevados consumos energéticos aquando da sua utilização têm sido levados cada vez mais em consideração. Paralelamente os equipamentos de um sistema AVAC utilizam energia e recursos materiais em diferentes etapas do seu ciclo de vida como na produção, no transporte, na instalação, na operação e no tratamento de fim de vida, o que se traduz num impacto ambiental. Na preocupação de atingir as metas estabelecidas no PNEC 2030, as emissões de CO₂ começam assim a ter um peso cada vez maior na tomada de decisão durante a fase de projeto de um sistema de AVAC a selecionar para um edifício.

Esta dissertação tem como objetivo a comparação do impacto ambiental de dois sistemas AVAC implementados num edifício residencial, localizado em Lisboa. Para isso irá ser utilizada uma metodologia de análise de ciclo de vida com auxílio da ferramenta ONE CLICK LCA para o cálculo das emissões de gases de efeito de estufa. Além do estudo de impacto ambiental, irá ser acoplado um estudo financeiro de modo a perceber a viabilidade económica de cada um dos sistemas, proporcionando uma escolha ponderada destes.

1.2 Apresentação da Empresa

A A400 foi fundada por António Monteiro, Francisco Bernardo e Marco Batista em 1995. Atualmente está referenciada como uma empresa especializada em engenharia de estruturas e que presta serviços de engenharia no ramo da construção. A A400 encontra-se sediada em Portugal, Marrocos, Argélia, Angola e Moçambique, com mais de 100 empregados em todo o mundo. O foco principal da empresa são os edifícios de serviços.

A empresa está estruturada em seis departamentos diferentes, nomeadamente: o departamento de Estruturas, de Hidráulicas, de Mecânicas, de Elétricas e Telecomunicações, de Investigação e Desenvolvimento e o departamento de Coordenação. Em conjunto estes contribuem para os serviços prestados pela empresa, como por exemplo: projetos de instalações mecânicas, projeto de estruturas e fundações, projetos de infraestruturas e vias de comunicação, avaliações técnicas, verificação e certificação de projetos de engenharia e a conceção e desenvolvimento de projetos de engenharia em BIM.

O projeto desenvolvido nesta Dissertação de Mestrado, foi realizado nas instalações do Porto e integra-se no Departamento de Mecânicas.

1.3 Contributos do autor para o Trabalho

Entre vários estudos realizados sobre o impacto ambiental do sector da construção, esta dissertação destaca-se pelo seu foco ser apenas nos sistemas AVAC, permitindo assim uma melhor perceção da contribuição do impacto ambiental destes no sector. Adicionalmente a utilização de uma metodologia de análise de ciclo de vida possibilitou a quantificação das emissões de gases de efeito de estufa das diferentes etapas do ciclo de vida de um sistema AVAC. O trabalho desenvolvido em termos de comparação das diferentes ferramentas para uma ACV existentes no mercado e dos diferentes sistemas estudados prende ser uma oportunidade para a compreensão das principais barreiras e potencialidades de um estudo ACV. Proporcionando assim a implementação a projetos relacionados.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação dividir-se-á em sete capítulos, sendo eles: Introdução, Contexto e Estado da Arte, Metodologia, Caso de Estudo, Resultados e Discussão, Conclusões e Avaliação do Trabalho Realizado.

O capítulo 1, Introdução, é a apresentação do tema da dissertação, dos objetivos a que se propõe e da empresa na qual foi realizada. No capítulo 2, Contexto e Estado da Arte, é contextualizado o panorama no qual o tema desta dissertação se insere, é elaborada uma revisão da literatura sobre a tecnologia AVAC e sobre a análise de ciclo de vida. No capítulo 3,

Metodologia, é salientada a importância da utilização, base de funcionamento e comparação das ferramentas existentes no mercado para a realização de uma ACV. O capítulo 4, Casos de Estudo, apresenta os sistemas AVAC e todas as considerações feitas antes das simulações. No capítulo 5, Resultados e Discussão, são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo a partir da ferramenta ONE CLICK LCA e pelas folhas de cálculo utilizadas. No capítulo 6, Conclusões, são sumariados os resultados e as lições a retirar do exercício desta tese. Por fim, no capítulo 7, Avaliação do Trabalho Realizado, é feito não só um balanço aos objetivos delineados e os alcançados, mas também, é sugerido propostas para trabalhos futuros.

2 Contexto e Estado da Arte

Um dos maiores desafios que a sociedade enfrenta atualmente é alcançar um futuro económica, ambiental e socialmente mais sustentável. Neste sentido, o presente trabalho estuda o ciclo de vida dos sistemas AVAC usados em edifícios residenciais. Em particular é estudado as emissões de gases de efeito de estufa, quantificadas em equivalente de emissões de CO₂. A quantificação do impacto ambiental dos sistemas AVAC seguiu uma metodologia de análise de ciclo de vida (ACV).

2.1 Estudo do ciclo de vida

A metodologia da análise de ciclo de vida encontra-se normalizada, ISO 14040 [1], e consiste em quatro fases: a) definição dos objetivos e o âmbito do estudo com identificação das unidades funcionais, fronteiras do estudo, métodos e categorias onde irá incidir; b) elaboração dum inventário com os consumos de energia e materiais e descargas para o ambiente; c) Uma terceira fase tem como objetivo avaliar os impactos e implicações ambientais inerentes ao que foi considerado na segunda fase. E por fim, na quarta fase interpreta-se os resultados das duas anteriores de modo a ser possível tecer conclusões e recomendações.[2,3]

Os estudos de ciclo de vida podem ter quatro variantes, consoante as fronteiras consideradas para o sistema em questão. Assim o ACV pode ser:[4]

- Berço ao túmulo, que corresponde a um estudo de ciclo de vida completo desde a extração da matéria prima até ao fim de vida do produto ou processo;
- Berço ao portão, é um ACV parcial no qual são avaliadas as fases desde a extração da matéria até a manufatura do produto ou processo;
- Berço ao berço, esta variante corresponde a um ACV completo de igual modo ao Berço ao túmulo, onde adicionalmente são contabilizadas as etapas de valorização dos resíduos que advém do fim de vida do produto ou processo;
- Portão ao portão, caracteriza-se como uma variante direcionada para as fases de uso;

Segundo a norma EN 15804 o resultado de um estudo de ciclo de vida quantifica e é expresso quanto às seguintes categorias de impacto ambiental: potencial de aquecimento global, depleção do ozono; acidificação do solo e água; eutrofização; criação de ozono fotoquímico, depleção de recursos abióticos, toxicidade humana; ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática de água salgada; ecotoxicidade terrestre, poluição aquática e poluição atmosférica. [5]

O presente trabalho enquadra-se nas consequências das alterações climáticas que estão a acontecer no planeta, mais concretamente o aquecimento global, intimamente ligado ao aumento das emissões de gases de efeito de estufa. Desta forma, de todas as categorias de impacto ambiental resultantes de um ACV é dada mais importância ao potencial de efeito de estufa.

Da radiação emitida pelo Sol e que chega à superfície terrestre, cerca de 45 % da irradiância é visível - Figura 2.1a. De seguida a radiação é absorvida pela Terra e transformada em energia térmica, aquecendo-a. Por outro lado, atendendo à equação de plank, equação (2.1), para um corpo negro a uma dada temperatura, este emite um espectro característico.

$$E_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (2.1)$$

onde E_{λ} corresponde à irradiação espectral, k à constante de boltzmann, h à constante de plank e c à constante da velocidade da luz.

Analogamente a um corpo negro que a uma temperatura de 14 °C imitaria radiação na zona do infravermelho, Figura 2.1b, a terra imite radiação infravermelha. O efeito de estufa é causado por gases na atmosfera que absorvem as radiações infravermelhas emitidas pela Terra. Sendo que temperatura da Terra resulta de um equilíbrio entre a radiação proveniente do Sol com a radiação irradiada para o espaço pela Terra este efeito permite manter o planeta a uma temperatura média de cerca de 14 °C, visto que uma parte da radiação emitida pela terra é absorvida pela atmosfera e emitida de novo. Outra análise feita à Figura 2.1a, permite concluir que os componentes que mais contribuem para este efeito correspondem ao dióxido de carbono e ao vapor de água. Porém, a concentração de vapor de água na atmosfera varia muito rapidamente (dias), já por outro lado uma molécula de CO₂ permanece na atmosfera. Assim o dióxido de carbono assume um papel de maior importância neste fenómeno.[6,7]

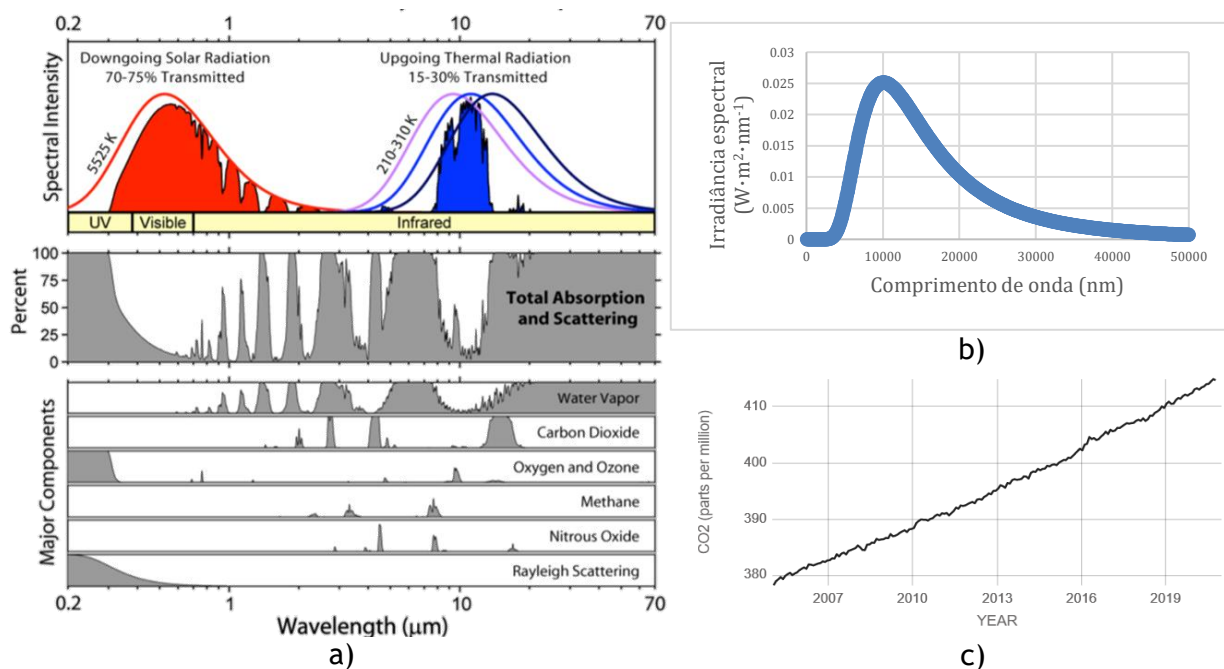


Figura 2.1 - Gráficos representativos da importância da molécula de CO₂ no efeito de estufa. a) Radiação transmitida pela atmosfera; b) Espectro de emissão de um corpo negro a 14 °C; c) Concentração de CO₂ na atmosfera ao longo do tempo. (Extraído de [8-10]).

O efeito do dióxido de carbono no clima foi primeiramente quantificado por Arrhenius em 1896, onde estimou que eram necessários cerca de 3 000 anos para que, em consequência das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, a concentração de CO₂ atingisse o dobro do seu valor. Atualmente, apenas pouco mais de um século depois registou-se um aumento de cerca 48 % desde o período pré era industrial até ao presente, registando-se em outubro de 2020 uma concentração de 414,76 ppm de CO₂, Figura 2.1c.[8,11]

2.2 Descarbonização da economia

Com a entrada no novo milénio, os gases com efeito de estufa começaram a ganhar cada vez mais atenção, o que levou à implementação de medidas para a redução das emissões destes gases e à invenção e desenvolvimento de novas tecnologias que o permitam fazer. Neste sentido, é importante destacar os esforços que têm vindo a ser feitos a nível mundial, caso do Acordo de Paris. Este visa alcançar a descarbonização das economias mundiais e estabelece como um dos seus objetivos de longo prazo limitar o aumento da temperatura média global a níveis bem abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C.[12]

Por conseguinte, a União Europeia estabeleceu metas a alcançar até o ano 2030, compreendendo o objetivo de reduzir em 40 % as emissões de gases com efeito de estufa (GEE)

face aos níveis do ano 1990, de aumentar a parcela das renováveis no conjunto das fontes de energia para 32 % e uma melhoria na eficiência energética em 32,5 %.[13] Paralelamente Portugal submeteu à Comissão Europeia, a 30 de dezembro de 2019, o Plano Nacional integrado Energia Clima 2030 (PNEC2030) onde estabelece metas nacionais a cumprir entre 2021 e 2030, que se encontram em linha com as estabelecidas pela União Europeia. As metas nacionais passam pela diminuição dos GEE em 45 % a 55 %, pelo aumento da eficiência energética em 35 %, pelo aumento da parcela das renováveis no conjunto das fontes de energia para 47 %, pela incorporação de 20 % renováveis no sector do transporte e um aumento de 15 % das interligações energéticas.[14]

Na verdade, os objetivos e metas a alcançar para o ano de 2030 inserem-se numa meta de ainda maior importância e impacto no combate às alterações climáticas, o Pacto Ecológico Europeu. Este tem como objetivo não só atingir a neutralidade carbónica no ano 2050, como também o crescimento económico não ser associado a um aumento de utilização de recursos.[15] Deste último objetivo é possível referir o conceito de intensidade carbónica da economia que corresponde à razão entre as emissões de GEE e o crescimento económico. Na Figura 2.2a está representada a intensidade carbónica da economia ao longo dos anos referente a Portugal e à União Europeia, onde é perceptível observar uma tendência para a emissão de menos quantidade de dióxido de carbono por unidade de riqueza gerada. Já na Figura 2.2b estão representados vários indicadores tendo por base valores do ano 1990 e apenas relativos a Portugal, como é o caso de por exemplo as emissões de GEE per capita ou o consumo energético sendo possível compará-los e perceber a sua variação no tempo.

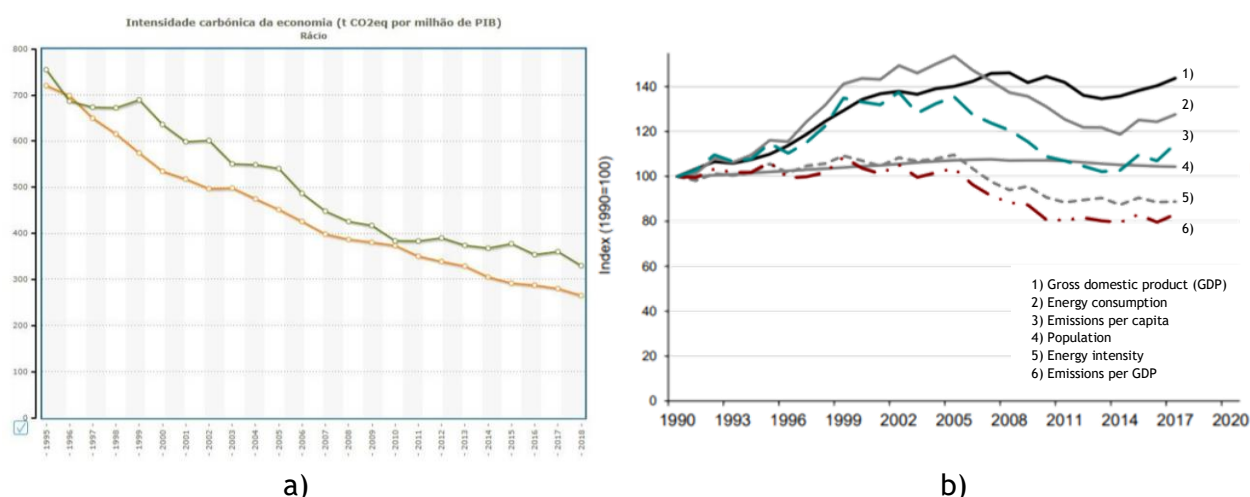


Figura 2.2 - a) Representação gráfica da intensidade carbónica da economia portuguesa (verde) e da média da união europeia (laranja) ao longo do tempo. b) Representação gráfica de indicadores económicos, energéticos, demográficos e ambientais ao longo dos anos, tendo por base valores do ano 1990. (Adaptado de [54,55])

2.3 Sector da construção

Neste trabalho é de especial interesse o foco no sector da construção. Este sector caracteriza-se como o maior consumidor mundial de materiais, sendo que, em 2015, a produção de materiais para a construção representou cerca de 43 % das emissões globais de GEE, Figura 2.3a. [16] Embora não seja o sector que mais contribui para as emissões de GEE, este constitui 13 % das emissões mundiais, 9 % das emissões dos países pertencentes à União Europeia e 7 % das emissões de Portugal. Tem-se verificado uma diminuição das emissões de GEE por parte deste sector, não só em Portugal e na União Europeia, como também no mundo, embora não de forma tão acentuada.

Adicionalmente, em 2018 os edifícios (residenciais e de serviços) foram responsáveis pelo consumo de 32 % e 40 % da energia final consumida em Portugal e na União Europeia, respetivamente.[17,18] Neste sentido, o conceito de edifícios com necessidades energéticas quase nulas tem sido introduzido na nossa realidade social, ambiental e económica de forma a dar resposta às metas do Acordo de Paris. Este conceito caracteriza uma gama de edifícios com um desempenho energético muito elevado, que no caso de Portugal devem satisfazer os requisitos da Portaria nº 98/2019 de 2 de abril para edifícios de habitação e da Portaria nº42/2019 de janeiro para edifícios de comercio e serviços.

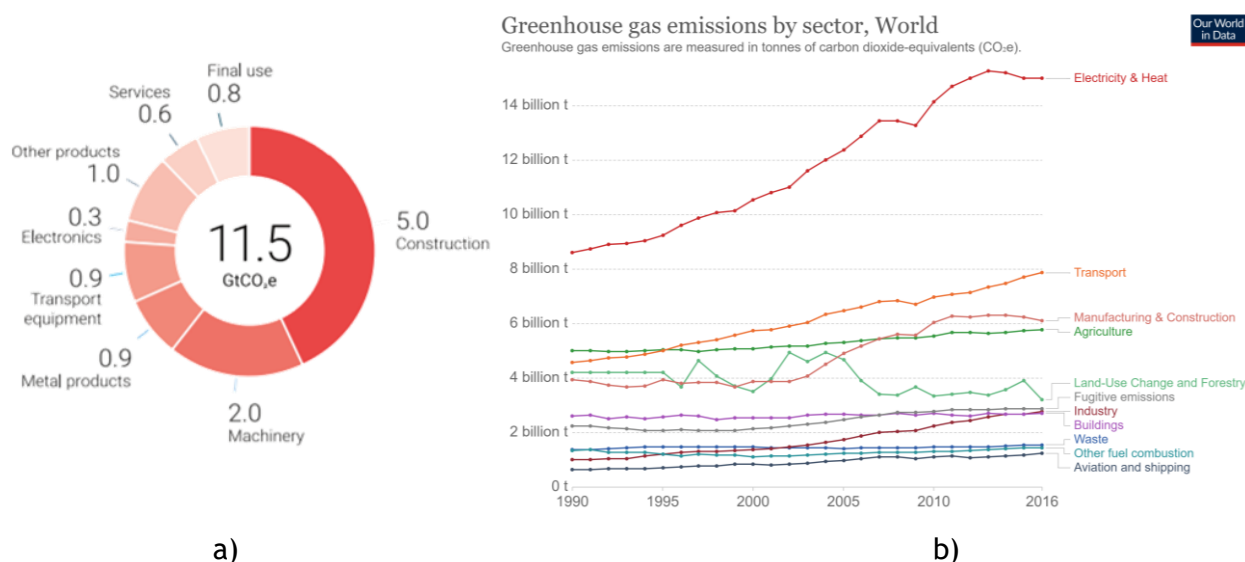


Figura 2.3 - a) Quantidade de dióxido de carbono equivalente associado à produção de materiais para cada setor. b) Quantidade de GEE emitidos por cada setor no Mundo (Extraídos de [16,56])

Quanto ao estudo de ciclo de vida das emissões de CO₂ de um edifício é possível dividi-lo em: emissões incorporadas e emissões operacionais. O CO₂ operacional contabiliza com as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis para a obtenção de calor, frio e

eletricidade para alimentar os sistemas elétricos do edifício. Por outro lado, as emissões de CO₂ incorporado engloba as emissões referentes às diversas atividades sectoriais intrínsecas dos materiais e componentes integrantes de um edifício. [19]

Consequentemente, no estudo de ciclo de vida de um edifício as fontes de emissão de GEE podem encontrar-se divididas em quatro principais fases, sendo elas a preparação dos materiais de construção, a construção, o uso e a demolição, como os esquematizado na Figura 2.4a. A fase de preparação dos materiais inclui etapas como a exploração, refinação, fornecimento e produção e transporte das matérias prima. De seguida, a fase de construção não só engloba as emissões provenientes da construção como também de operações de renovação. A terceira fase corresponde às emissões de CO₂ operacional, assim, a esta estão inerentes atividades como a manutenção das condições de conforto, consumo de água e utilização de eletrodomésticos. Por último, faz parte da fase de demolição, operações de destruição do edifício, de transporte do entulho até aos aterros/centros de reciclagem e de reciclagem e/ou aterro. [20]

Na Figura 2.4b, é representada a percentagem média de cada uma das etapas principais apresenta face às emissões de GEE durante o ciclo de vida do sector de construção, entre o ano de 2005 e 2012 na China. [21] Torna-se importante salientar o peso que a fase de manufactura apresenta e não deixar de notar na fração de emissões de GEE destinada à fase de operação do edifício.

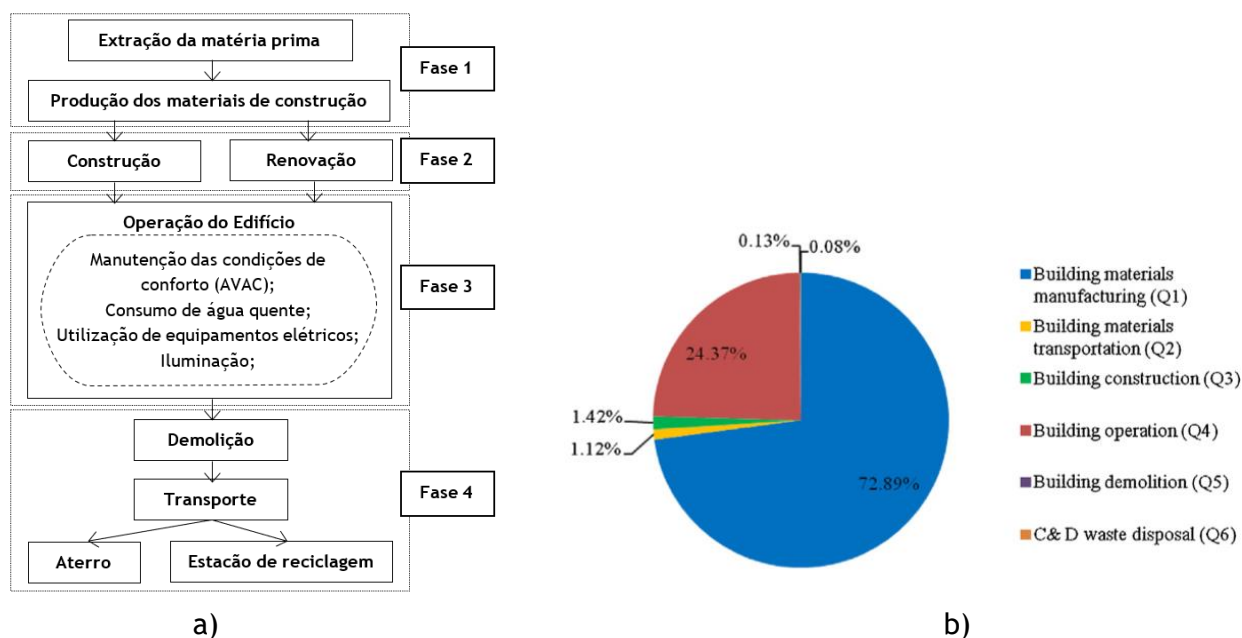


Figura 2.4 - a) Divisão das fases de um ciclo de vida de um edifício quanto as emissões de CO₂. (adaptado de [20]) b) Peso que cada fase de um ciclo de vida de um edifício representa quanto às emissões totais de CO₂. (extraído de[21])

Num estudo realizado por *Chastas et al.* em 2018, onde foram analisadas as emissões de CO₂ emitidas durante o ciclo de vida de 95 edifícios residenciais em diversos países, concluiu-

se que as emissões de CO₂ embutidas estavam compreendidas entre 179,3 e 1050 kg_{CO₂e}·m⁻² e que por outro lado as emissões respetivas ao CO₂ operacional estavam compreendidas entre 156 e 4049,9 kg_{CO₂e}·m⁻². [22]

Com o intuito de mitigar o impacto ambiental deste setor é cada vez mais imperativo o uso de práticas de desenvolvimento sustentável, como os sistemas de classificação de edifícios sustentáveis. Estes são um tipo de sistemas de certificação de edifícios que classifica ou recompensa de acordo com o nível de conformidade ou desempenho em relação a metas e requisitos ambientais específicos. Dos sistemas existentes no mercado destaca-se o LEED, o DGNB e o BREEAM. [23,24]

2.4 Sistemas AVAC

O trabalho desenvolvido ao longo deste relatório incide-se no estudo do ciclo de vida dos sistemas AVAC, inseridos no sector das instalações mecânicas de um edifício. Na sequência da preocupação ambiental é de particular interesse analisar o conforto térmico dos ocupantes dos edifícios residencial com a finalidade de se compreender as exigências energéticas e ambientais inerentes à utilização dos sistemas AVAC.

Em Portugal está regulamentado que como condições de conforto, a temperatura ambiente deverá ser de 20 °C e 25 °C, nas épocas de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente. Por outro lado, a temperatura média ambiente nas residências tem sido entre 12 °C e 21 °C no Inverno e 23 °C a 34 °C no Verão. [25,26] A utilização destes sistemas, em Portugal, representa 37 % da energia primária consumida e 33% das emissões de GEE, no sector residencial, perceptível pela Figura 2.5.

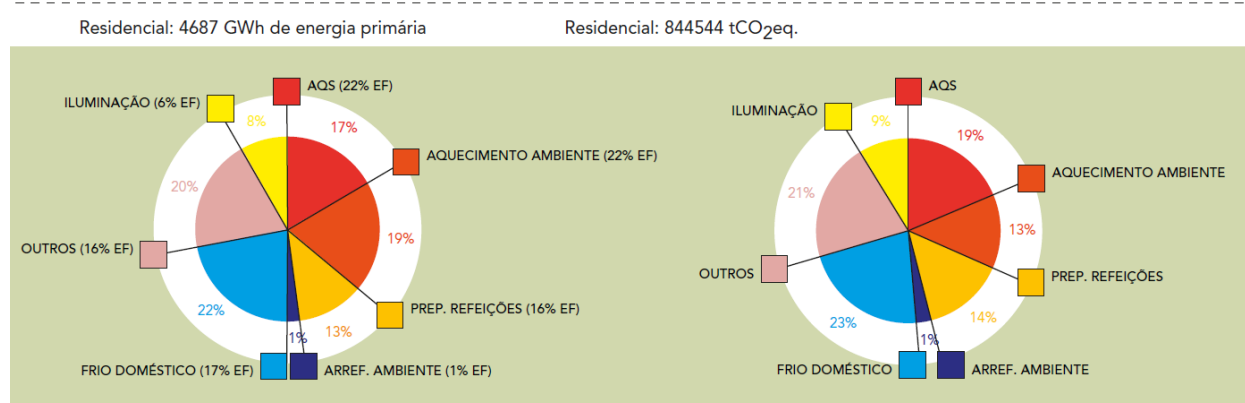


Figura 2.5 - Distribuição do uso final de energia (esquerda) e de emissões de GEE (direita), por atividade no setor residencial. (extraído de [57])

Já no domínio Mundial, cerca de 50 % do consumo energético final é direcionado para aquecimento e arrefecimento, sendo que deste cerca de metade tem como finalidade processos industriais e 46 % destina-se ao sector residencial e comercial. O sector do aquecimento e

arrefecimento é responsável por 40 % das emissões globais de CO₂ referentes à produção de energia.[27]

Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, comumente designados de sistemas AVAC, têm como finalidade proporcionar conforto térmico e uma qualidade do ar interior aceitável. Para isso estes são projetados de forma a ser possível o controlo da temperatura, humidade, contaminantes, diferenças de pressão e fluxo do ar ambiente. A escolha de um sistema AVAC apropriado é realizada com recurso a um balanço entre diversos pontos, nomeadamente, custos (investimento, energia, operação e manutenção), manutenção, requisição espacial, coordenação com outras trocas, acústica, flexibilidade, estética e segurança. [19,28]

2.4.1 Equipamentos que integram os sistemas AVAC

As componentes de um sistema AVAC podem ser agrupadas em: equipamentos de produção, equipamentos terminais, equipamentos intermédios e acessórios e equipamentos de regulação. [29]

Os equipamentos de produção correspondem ao local onde se condicionam os fluidos primários que serão distribuídos até as unidades terminais. Por fluidos primários entende-se ar quente e /ou refrigerado, água quente e/ou refrigerada, ar e a água em simultâneo e fluido refrigerante.[29] Destes fazem parte as unidades de produção de água refrigerada ou unidades de arrefecimento a ar, comumente denominados chillers, e têm por objetivo o arrefecimento do fluido térmico por meio de água ou ar, respetivamente. Quanto a estas unidades distinguem-se os chillers de compressão, absorção e adsorção. O princípio de funcionamento dos chillers de compressão e absorção é o aproveitamento do calor latente em processos de expansão e compressão. A maior diferença entre estes prende-se com o facto de nos de absorção não se usarem compressores e caracterizarem-se por ser processos onde o fluxo no ciclo de refrigeração ser conseguido através de calor. Por outro lado, o princípio de funcionamento dos chillers de adsorção baseia-se em retirar partido dos fenómenos de adsorção e dessorção serem exotérmica e endotérmicos, respetivamente. Este são equipamentos eficientes e apresentam uma boa relação custo/benefício. [30-32]

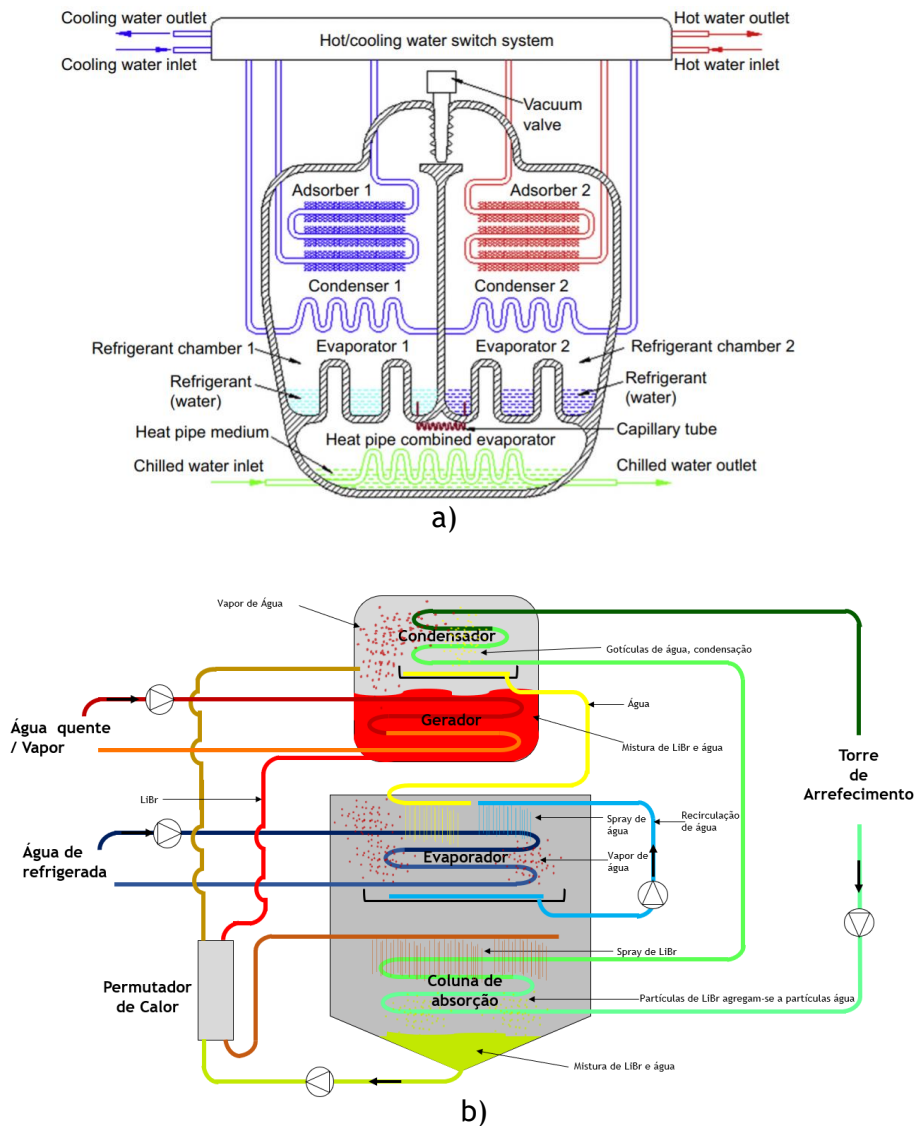


Figura 2.6 - Esquema de funcionamento de: a) Chiller de adsorção; b) Chiller de absorção. (Extraído de [58,59])

No campo oposto situam-se as caldeiras, responsáveis pela produção de calor. Estes equipamentos utilizam a queima de um combustível para o aquecimento de um fluido, como por exemplo água ou um fluido térmico. [30] Para o aquecimento pode também fazer-se uso de energia de fontes renováveis mais concretamente da energia solar térmica. Pelo facto de apenas ser possível a operação deste durante o dia encontram-se associados a outras unidades de aquecimento. É de notar que estes sistemas podem também ter como finalidade o arrefecimento quando associados a outros equipamentos, por exemplo um chiller de absorção - Figura 2.7.[33]

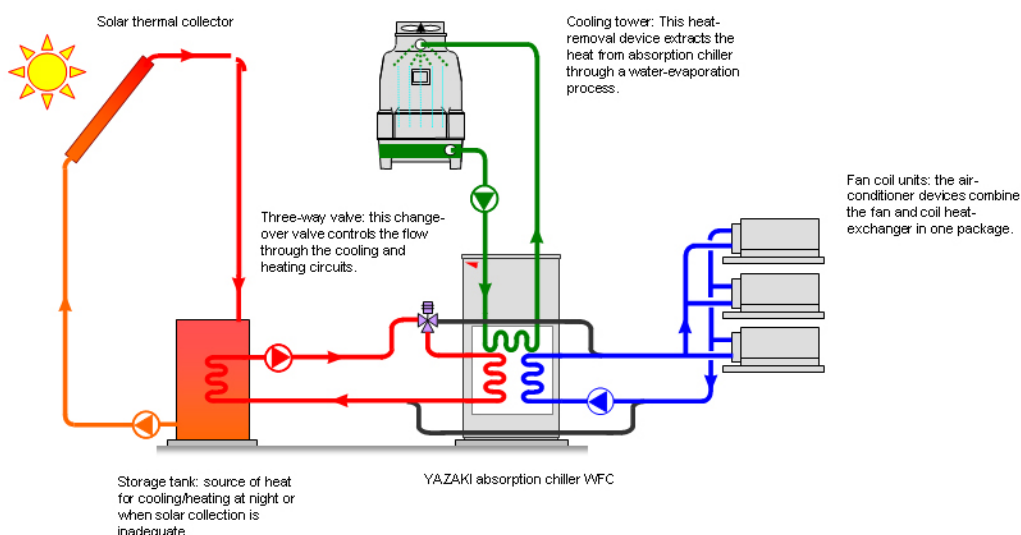


Figura 2.7 - Sistema de refrigeração solar. (extraído de [60])

Outro equipamento de produção são as bombas de calor, que permitem o aquecimento e arrefecimento ambiente ou o aquecimento de água. O termo bomba de calor normalmente define um sistema onde o equipamento de refrigeração é usado tanto para arrefecer, como para aquecer. As bombas de calor podem ser de quatro tipos distintos: ar-ar , ar-água, água-ar e água-água. Os sistemas ar-ar são os mais comuns e são dependentes da temperatura exterior, pelo que é necessário, por vezes, o uso de uma resistência elétrica para obter a energia em falta. Os sistemas ar-água são, frequentemente, usados em edifícios maiores para a produção de água quente ou fria e para recuperação de calor. Uma bomba água-ar utiliza água como fonte de calor ou arrefecimento. Este equipamento apresenta a vantagem de serem sistemas simples e com baixos custos de operação apesar dos altos custos de investimento. Tornam-se mais eficientes quando acoplados com um sistema de recuperação de calor. O princípio de funcionamento de uma bomba de calor tem por base o ciclo de compressão de vapor. O princípio baseia-se no uso do calor latente que ocorre quando se dá a mudança de fase de uma dada substância. A Figura 2.8 é um esquema do ciclo de compressão de vapor. [32,34]

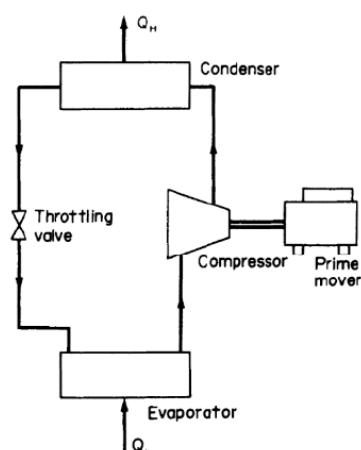


Figura 2.8 - Esquema do ciclo de compressão de vapor. (extraído de [34])

Por último, existem as unidades de tratamento de ar (UTA) e as unidades de tratamento de ar novo (UTAN), Figura 2.9 que são responsáveis pelo tratamento do ar que irá ser insuflado. Estas unidades apenas se diferenciam no âmbito de que as UTA possibilitam o tratamento de ar novo e ar de retorno do espaço, enquanto as UTAN tratam apenas ar novo. Desta unidade fazem parte um ou mais ventiladores, uma bateria de arrefecimento e outra de aquecimento, filtros de ar, um humidificador, um recuperador de calor e uma caixa de mistura. [31,35]

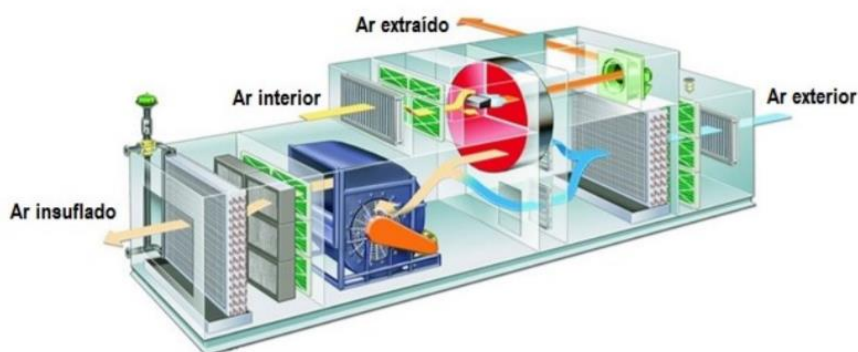


Figura 2.9 - Unidade de tratamento de ar. (extraído de [31])

Já os Equipamento terminais recebem os fluidos primários utilizando-os para o tratamento do ar a fornecer a determinado ambiente, são o caso dos radiadores e pavimento radiante. [29]

Nos equipamentos intermédios e acessórios estão incluídos equipamentos como bombas hidráulicas, reservatórios térmicos, entre outros. Os fluidos primários são distribuídos por condutas e tubagens que possuem acessórios como válvulas, filtros, etc.[29]

Por fim os equipamentos de regulação englobam todos os equipamentos inerentes a ações de medida, controlo, regulação e segurança. Nesta categoria estão incluídos por exemplo sondas, termostatos e reguladores. [29]

2.4.2 Classificação e descrição dos sistemas AVAC

Os sistemas AVAC usualmente mais utilizados são denominados de ativos, pelo facto de estes para trabalharem necessitarem de um fornecimento de energia. Por oposição denominam-se sistemas passivos àqueles que usam recursos naturais como fonte de energia, como é o caso da ventilação natural, do arrefecimento evaporativo e do aquecimento radiativo. Estes sistemas embora mais eficientes, são menos usuais e mais dispendiosos quando instalados em construções não habilitadas para tal.[33]

Um sistema AVAC pode ser classificado em função do seu número de transformações termodinâmicas, sendo estas aquecimento, arrefecimento, humificação e desumificação. Deste modo se o sistema possuir uma ou nenhuma das funções anteriores é classificado como ventilação, já se possuir 2 ou 3 é classificado como climatização ou condicionamento do ar parcial, por fim de se possuir 4 corresponde a um sistema de climatização ou condicionamento de ar total.[29]

- Sistemas de Ventilação

A ventilação é o processo de renovação parcial ou total de ar de um determinado espaço e tem como finalidade o controlo de temperatura e remoção de impurezas. Os sistemas de ventilação podem ser do tipo natural, forçada ou mecânica e híbrida.

Os sistemas de ventilação natural, Figura 2.10a, baseiam-se no fluxo de ar obtido através de diferenças de pressão e/ou temperatura entre o ar exterior e o ar interior. O caudal de ventilação deste sistema depende quer do gradiente de temperatura e/ou pressão interior-exterior, quer da intensidade e direção do vento, como também da arquitetura do espaço. É de notar assim que estão inerentes desvantagens como o difícil controlo do caudal de ventilação, não é possível o controlo da temperatura do ar insuflado, nem a filtragem deste. Nestes sistemas a ventilação é realizada por janelas, grelhas ou respiradores.

De outro modo nos sistemas de ventilação forçada ou mecânica, Figura 2.10b, o ar é extraído e insuflado com recurso a equipamentos mecânicos, como é o caso de UTA's ou ventiladores. Nestes sistemas, embora possam aquecer/arrefecer o ar insuflado, não têm função de climatização apenas atuam de forma neutra, onde o ar é insuflado á temperatura ambiente.

Por último, existem sistemas de ventilação híbridos, Figura 2.10c, onde a extração é mecânica e a insuflação é natural, ou vice-versa. É de notar que quando a insuflação é natural não é possível o controlo da temperatura.

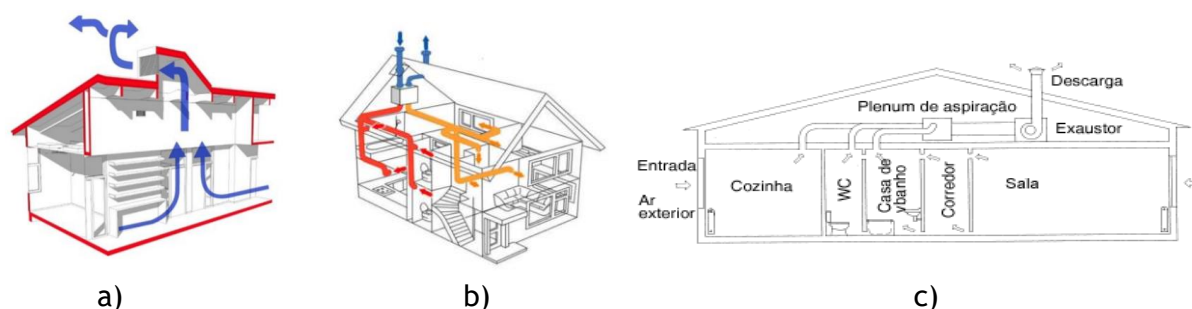


Figura 2.10 - Esquemas representativos de diferentes tipos de ventilação. a) natural; b) forçada; c) híbrida. (Extraído de [60,61])

- Sistemas de Climatização

Um aspeto fulcral nas instalações de sistemas de climatização prende-se com o facto de não só cada edifício requerer as suas próprias necessidades de climatização, como também, certos edifícios requererem diferentes necessidades de aquecimento/arrefecimento em diferentes zonas, assim torna-se importante compreender as diferenças entres os sistemas. Deste modo é possível classificar os sistemas AVAC em diversos tipos em função dos equipamentos com que operam e a sua forma de funcionamento.

Em primeiro lugar é possível classificá-los quanto ao fluido primário, por conseguinte distingue-se quatro sistemas: tudo-ar, tudo-água, ar-água e tudo-refrigerante.[31]

Nos sistemas tudo-ar, a climatização é realizada apenas pela distribuição de ar. Este sistema apresenta a vantagem de ser simples pois apenas terão que existir condutas, por onde circula o ar, entre a unidade de tratamento de ar e as divisões do edifício. Contudo, visto que o ar produzido pela UTA sai todo às mesmas condições, não é possível uma resposta a zonas com necessidades energéticas diferentes. [31]

Os sistemas tudo-água são caracterizados por apenas existir circulação de água entre os equipamentos centrais e os terminais. As vantagens inerentes a este sistema são a tubagem ser mais compacta e haver menos perdas térmicas. Por outro lado, são sistemas mais dispendiosos, onde a humidade é um parâmetro difícil de controlar.[31]

Já os sistemas ar-água situam-se como uma opção híbrida dos dois sistemas referidos anteriormente, ou seja, o transporte de calor é efetuado pela água e de forma simultânea ar novo é insuflado no espaço a uma temperatura neutra. Desta forma a climatização dos espaços é feita por um equipamento local que aquece ou arrefece o ar mediante a temperatura da

água. Embora possuía a desvantagem de ter altos investimentos iniciais, possibilita poupanças aquando da operação e também satisfaz os requisitos de qualidade do ar interiores. [31,35]

Por último, os sistemas tudo-refrigerante operam com um princípio semelhante aos sistemas tudo-água, sendo que o fluido que circula nas tubagens é um fluido refrigerante. Estes sistemas tem a desvantagem, face aos anteriores, de possuírem um tempo de vida útil menor.[31]

Uma outra classificação possível dos sistemas de climatização consiste em diferenciá-los em sistemas centralizados, Figura 2.11a, ou sistemas descentralizados, Figura 2.11b.

Um sistema de climatização descentralizado é composto por uma ou mais unidades AVAC individuais cada um com um ciclo de refrigeração integral, fonte de aquecimento e ventilação direta ou indireta com o exterior. Estes sistemas operam apenas num local, estando situados próximos do mesmo. Assim, fazem parte destes os sistemas split e os sistemas multi-split que se caracterizam por serem constituídos por uma unidade exterior e uma interior, no caso dos split, ou várias interiores, no caso dos multi-split. Os sistemas de volume de refrigerante variável (VRV), são outro caso de sistemas descentralizados que se caracterizam por variar o fluxo de refrigerante com auxílio de um compressor de velocidade e uma válvula de expansão localizados em cada unidade interior. Desta forma torna-se possível alcançar as cargas de aquecimento/arrefecimento variando apenas o fluxo de refrigerante. Estes sistemas podem ainda ser distinguidos quanto a simultaneidade de produção de aquecimento e arrefecimento, sistemas de recuperação de calor VRV ou apenas só aquecimento ou arrefecimento, sistemas bomba de calor VRV. [28,31,32]

Os sistemas descentralizados têm com objetivo serem operados em instalações de pequeno ou médio tamanho. São sistemas de fácil instalação e de baixo custo, contudo são menos eficientes e um têm um tempo de vida útil menor.[33]

Por outro lado, um sistema de climatização centralizado gera o aquecimento/arrefecimento num local para posterior distribuição em múltiplos locais do edifício. Nestes e dentro dos sistemas tudo-ar são englobados os sistemas de volume de ar variável (VAV) e os sistemas de volume de ar constante (VAC). Quanto aos sistemas VAV o caudal de ar insuflado é variável, assim este mecanismo satisfaz diferentes cargas de aquecimento/arrefecimento mantendo a temperatura e humidade pré-determinadas para o conforto térmico. Quanto aos sistemas VAC mantem-se o caudal de ar constante, variando apenas a temperatura de insuflação de ar. Existem ainda sistemas centralizados a água, estes são constituídos por um ou vários equipamentos que produzem água quente/fria que posteriormente é distribuída a equipamentos terminais de climatização e de tratamento de ar. Deste modo quanto à produção de água refrigerada são utilizados equipamentos como chillers que no caso de utilizarem no ciclo refrigeração a condensação da água estão associados a torres

de arrefecimento. Caso se trate da produção de água quente recorre-se a bombas de calor ou a caldeiras.[19,35]

Deste modo os sistemas centralizados são adequados para edifícios de grande tamanho. São sistemas que necessitam de áreas maiores para sua implementação e apresentam-se como sistemas mais complexos do que os centralizados. Também associado ao tamanho dos sistemas estão os custos de instalação elevados. Por outro lado, são sistemas muito eficientes e possibilitam um melhor controlo nas condições de operação.[33]

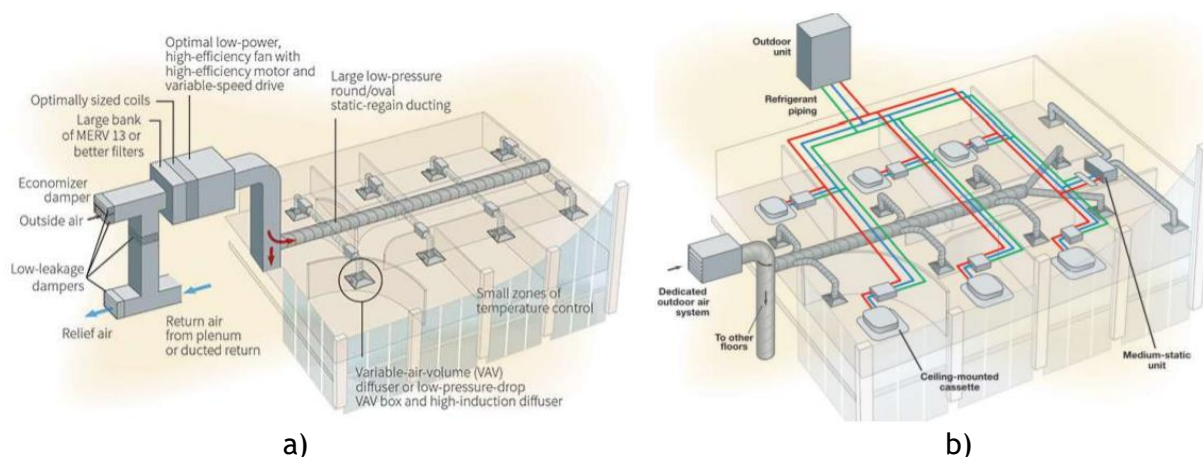


Figura 2.11 - Sistema de climatização: a) centralizado; b) descentralizado. (extraído de [19])

2.5 Estado de Arte

Nesta secção irão ser mencionados estudos que se apresentam em linha com os objetivos do presente trabalho, bem como os respetivos resultados que sejam relevantes para o desenvolvimento do mesmo.

Em 2011, *Chen et al.* estudaram o impacto ambiental associado ao ciclo de vida de 3 sistemas AVAC, sendo eles um sistema VAV, sistema chilled beam e um sistema de distribuição de ar sob o chão (UAD) aplicados a um edifício comercial. Quanto ao edifício comercial sabe-se que tem 13 andares e uma área total de 14337,57 m². Para o cálculo das emissões geradas pelos diferentes sistemas AVAC, os autores realizam um estudo de ciclo de vida que compreende quatro fases: manufatura, construção, operação de manutenção e demolição. Quanto aos resultados, expressos em kg_{CO2e}·m⁻², obtidos neste estudo estão apresentados na Tabela da 2.1 e encontram-se divididos por sistemas e por cada fase do ciclo de vida.[2]

Tabela 2.1 - Emissões produzidas por três sistemas AVAC (VAV, chilled beam e UAD) e em diferentes fases do ciclo de vida. (adaptado de [2])

Sistema	Emissões de GEE em cada etapa de ciclo de vida ($\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$)				
	Manufatura	Construção	Operação anual	Manutenção	Demolição
VAV	19.501	1.596	47	13.15	0.363
Chilled beam	39.691	3.174	32.9	36.9	0.772
UAD	8.687	0.694	45.7	7.15	0.153

Mais recentemente, em 2019, *Rodriguez et al.* estudaram o CO₂ operacional e incorporado de sistemas AVAC num edifício comercial. Neste estudo os autores diferenciam 3 sistemas AVAC típicos para 3 categorias de edifícios: pequenos, médios e grandes. Quanto ao sistema AVAC típico de um edifício pequeno, são mais frequentes unidades rooftop empacotadas podendo ser associadas com bombas de calor. Outro tipo sistema utilizado são os sistemas de VRV incluindo ventiladores de recuperação de calor. Nos edifícios de tamanho médio são largamente utilizados os sistemas VAV de alto desempenho. Também nesta categoria são utilizados sistemas centralizados, nos quais o arrefecimento é alcançado através de unidades de tratamento de ar e a ventilação é fornecida por unidades rooftop. Por último, nos edifícios de tamanho grande a ventilação é fornecida para unidade rooftop, que servem de alimentação a sistemas VAV. O aquecimento nestes é realizado individualmente em cada zona e conseguido por meio de uma ventoinha com reaquecimento elétrico. Consequentemente, os resultados obtidos quanto às emissões de CO₂ operacional foram: 0,8 a 6,08 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ para edifícios pequenos; 0 a 9,15 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ para os médios e 3,4 a 8 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ para os de grande dimensão. Do mesmo modo obtiveram para as emissões de CO₂ incorporado: 8 a 11 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$ para edifícios pequenos; 6 a 12 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$ para os médios e 9 a 10 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$ para os de grande dimensão. [36]

Em 2020, o estudo elaborado por *Kiamili et al.* incidiu sobre o edifício de escritórios, com 32 000 m² e certificação LEED. Estes autores focaram-se no potencial de aquecimento global resultante do CO₂ incorporado e operacional no sistema AVAC, constituído por bombas de calor água-água. Neste estudo, as fases de estudo de ciclo e vida consideradas foram A1-A3, B4, B6, C1-C3 e foi considerado um período de cálculo de 60 anos. Como principais resultados obtiveram as quantidades de emissões anualizadas de 1,32 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$, 1,70 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$, 1,25 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$ e de 0.4 $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} \cdot \text{m}^{-2}$ para as fases A1-A3, B4, B6 e C1-C3 respetivamente. [37]

3 Metodologia

As várias metodologias de análise de ciclo de vida foram inicialmente desenvolvidas com a finalidade de tratar problemas diferentes, nomeadamente análise de produtos, de sistemas de produtos e de serviços. A natureza complexa e morosa de uma análise de ciclo de vida, levou ao desenvolvimento de ferramentas informáticas com o objetivo de reduzirem os esforços envolvidos na realização desta. Assim as ferramentas informáticas assumem um papel fulcral, pois estas fornecem assistência e suporte durante a análise de ciclo de vida, realizam cálculos para da análise do inventário e apoiam na tomada de decisão de processos através do fornecimento de informações relevantes. A base cálculo de todas as ferramentas para a realização de uma ACV é um documento técnico que contém informação sobre o desempenho ambiental de um produto ou serviço, a declaração ambiental de produto (DAP). [38,39]

3.1 Declaração ambiental do produto

A Organização Internacional de Normas (ISO) definiu normas para os princípios e procedimentos para rótulos e declarações que resultem de uma análise de ciclo de vida. O objetivo de um rótulo ecológico é encorajar a procura e a oferta de produtos que causam menores pressões no ambiente ao longo do seu ciclo de vida, através da comunicação da informação verificável e fiável, não enganosa, acerca dos aspetos ambientais de produtos e serviços. Assim estão classificados rótulos ambientais de três tipologias: a) tipo I - rótulos ecológicos certificados (ISO 14021 [40]); b) tipo II - auto-declarações ambientais (ISO 14024 [41]); c) tipo III - declarações ambientais de produto (ISO 14025 [42]). Assim uma declaração ambiental de produto (DAP), insere-se nos rótulos ambientais tipo III e define-se como uma ferramenta normalizada (ISO 14025) e baseada num ACV que tem por finalidade comunicar o desempenho ambiental de um produto. [43,44]

Em termos físicos, uma declaração ambiental de produto consiste em dois documentos: o documento de declaração ambiental de produto sumariza os resultados da análise de ciclo de vida - documento publico, e o relatório privado, realizado por uma entidade independente, que analisa a qualidade do documento publico. Este último contém informações não só sobre como o ACV foi conduzido como também parâmetros e suposições utilizados neste. Torna-se importante também realçar que por norma a validade de uma DAP é de 5 anos.[45]

De forma a uma DAP ser aprovado e publicado tem de obedecer às normas internacionais do ACV, às regras de categorias de produtos (RCP) e ser verificado por um painel internacional. Na tabela 3.1 são indicadas as normas relevantes para a declaração ambiental de produto. Neste sentido, é importante referir as seis etapas para a criação de um DAP: definição da

estratégia do DAP, recolha de dados, realização do ACV, obtenção do relatório referente ao ACV, verificação por uma terceira parte e publicação. [45]

Tabela 3.1 - Normas regentes em diferentes categorias para aprovação de uma DAP.

Adaptado de [45].

Mercado	Normas DAP e Regras de categorias de produtos	Normas ACV	Normas de verificação independentes
Internacional	ISO 21930 [46] (compatível com EN 15804+A1)		
União europeia	EN 15804+A1 e EN 15804+A2 [47]	ISO 14040 e 14044	ISO 14025
América do Norte	ISO 21930		

Um DAP pode desempenhar diferentes papéis aquando da sua utilização, como uma função de documentação, ferramenta para o desenvolvimento de um ACV e como fonte de informação para escolha de diferentes produtos através da comparação entre eles. Adicionalmente, no sector de construção, com a maior exigência e gradual utilização de sistemas de classificação de edifícios sustentáveis, os DAP's são um componente fulcral visto que os produtos acompanhados destes são creditados pelos sistemas. [45]

Assim destaca-se a importância dos DAP's visto serem amplamente reconhecidos por todo o setor de construção e vistos com credibilidade e confiança devido ao seu estatuto de documentos verificados independentemente e regulamentados por regras e normas internacionais. Os DAP's apoiam ainda o desafio do CO₂ incorporado pois estes tornam mais visíveis o impacto ambiental dos produtos e materiais, permitindo assim uma melhor estratégia da redução do impacto deste. [45]

3.2 Ferramentas de estudo de ciclo de vida

Estas ferramentas são utilizadas essencialmente por arquitetos, engenheiros, consultores ambientais, especialistas em responsabilidade social corporativa, inspetores de quantidade e profissionais na área de edifícios sustentáveis. De seguida são apresentadas e descritas 5 ferramentas para a realização de um ACV.

3.2.1 One Click LCA

O One Click LCA é uma ferramenta desenvolvida pela Bionova Ltd. Através desta é possível o cálculo da pegada ambiental de projetos de construção e de produtos, sendo especializada no estudo de ciclo de vida de edifícios suportando sistemas de classificação de edifícios sustentáveis, como as certificações LEED e BREEAM. Caracteriza-se pela rapidez e acessibilidade da interface. Adicionalmente, esta ferramenta apresenta outras funções, destacando-se, por exemplo, a possibilidade de obter custo do ciclo de vida, rastrear materiais

mais ecológicos e o local e ainda resiliência climática. O One Click LCA é uma ferramenta certificado por uma terceira parte em conformidade com as normas: EN 15978, ISO 14040/44, ISO 21931-1, ISO 21929-1, EN 1580. [48]

3.2.2 Tally for Revit

A ferramenta Tally é uma aplicação para Revit, permitindo aos utilizadores desta incorporar na modelação de informação de edifícios (BIM), informação mais completa quanto aos materiais de construção. A ferramenta Tally foi desenvolvido pela KT Innovations, pela Autodesk e pela Thinkstep e com esta é possível quantificar o impacto ambiental incorporado de um edifício ou material. A metodologia utilizada pelo Tally encontra-se em linha com as normas LCA ISO 14040-14044, ISO 21930:2017, ISO 21931:2010, EN 15804:2012 e EN 15978:201. [49]

3.2.3 Athena Impact Estimator (IE)

A ferramenta Athena Impact Estimator para edifícios foi desenvolvida pela The Athena Sustainable Materials Institute em colaboração com a Morrison Hershfield. Esta ferramenta permite o estudo do impacto ambiental de todo o edifício, contudo não calcula a energia operacional sendo necessário a introdução do valor desta recorrendo a uma ferramenta de simulação de energia. [39,50]

3.2.4 SimaPro

A ferramenta SimaPro foi desenvolvida pela PRe Sustainability e atualmente está implementada em mais de 80 países. Esta ferramenta é utilizada para recolher, analisar e monitorizar dados referentes à sustentabilidade de um produto ou serviço. É uma ferramenta útil em diversas funções como para o cálculo da pegada ecológica, para o design ecológico de produtos, para o impacto ambiental de produtos e serviços e para relatórios ambientais. É caracterizada como sendo uma ferramenta complexa, contudo possui uma elevada flexibilidade necessária a modelos de edifícios mais complicados. [48]

3.2.5 GaBi

A ferramenta GaBi foi desenvolvida pela PE Engineering GmbH e mais recentemente adquirida pela SPHERA. Caracteriza-se como sendo uma ferramenta genérica para a realização de um ACV, de acordo com a ISO 14040/44, capaz de realizar um estudo detalhado do impacto ambiental, da quantidade de energia e dos custos referentes aos materiais e processos de um produto. [39,51]

Na Tabela 3.2 são comparadas as 3 ferramentas que mais se enquadram no âmbito de trabalho da empresa e do presente estudo, devido a caracterizarem-se como ferramentas de

análise de ciclo de vida do edifício inteiro. Na tabela são analisadas características chaves de cada ferramenta.

Tabela 3.2 - Comparação das diferentes ferramentas ACV existentes. (Adaptado de [52]).

Ferramenta ACV	Athena Impact Estimator (IE)	Tally for Revit	One Click LCA
Tipo de software	Independente	Plug-in para Revit 2015-2020	Independente e plug-in para Revit
Região	América do Norte (número limitado de localizações) e Canada	América do Norte	América do Norte, Europa, Médio oriente, Asia (zona do pacífico), América do Sul
Integração com outras ferramentas/Importação da lista de materiais	AutoCAD Ficheiros do tipo CSV, xml, Excel, tab delimitado Permite adição manual sem um modelo	Importação de ficheiros Revit Dynamo importa dados do Excel para o Tally Não permite adição manual sem um modelo	Revit, IES-VE, Design Builder, Excel, CSV, gbXML, SketchUp Pro, ArchiCAD Permite adição manual sem um modelo
Adição e modificação da lista de materiais	É possível adicionar/modificar família de materiais e materiais em qualquer altura do processo ACV	Modificações nas famílias de materiais, quantidades, volumes ou áreas tem de ser feitas primeiro no Revit e só depois adicionadas ao Tally. Os materiais podem ser adicionados diretamente no Tally se não implicarem a mudança de área ou volume dos já existentes	É possível adicionar/modificar família de materiais e materiais em qualquer altura do processo ACV
Fonte dos DAP's	Inventario desenvolvido pela Athena e certos DAP's	Base de dados Thinkstep personalizada	Dados de diferentes inventários, base de dados genérica da One Click e DAP's específicos dos fabricantes
Acessibilidade aos DAP's	Não é possível o acesso aos DAP's durante o mapeamento	Apenas estão disponíveis os DAP's completos depois de ser gerado o relatório, contudo é disponibilizado informação básica aquando do processo	Estão sempre disponíveis
Adição de novas DAP's na base de dados	Possível, através de um pedido aos engenheiros de software	Possível, apenas se for desenvolvido pela Thinkstep	Possível, é apenas necessária uma revisão interna pelos engenheiros de sof
Sistemas de Classificação	LEED, ILFI's certifications, Green Globes	LEED, ILFI's certifications, Green Globes	LEED, ILFI's certifications, BREEAM, DGNB e mais 20 outros esquemas globais de certificação

3.3 Ferramenta de análise de ciclo de vida utilizada

Das ferramentas existentes no mercado, a utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho foi o One Click LCA. O One Click LCA destaca-se das restantes ferramentas não só pelo tamanho da base de dados e amplitude dos sistemas de classificação de edifícios sustentáveis, como também pela interface acessível e intuitiva, Figura 3.1. Com a utilização desta ferramenta é ainda possível a integração com inúmeras outras, o que se traduz numa maior simplicidade e eficácia de trabalho.

Figura 3.1 - Interface da ferramenta One Click LCA.

3.3.1 Fluxo de trabalho

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho realizado é demonstrada na Figura 3.2, na qual é perceptível a existência de 3 momentos distintos. O primeiro prende-se essencialmente com um trabalho de preparação e organização do material a ser estudado. Um segundo momento corresponde há integração de todo o inventário na ferramenta One Click LCA e por fim, um último momento engloba a preparação e análise dos resultados para uma subsequente análise dos mesmos.

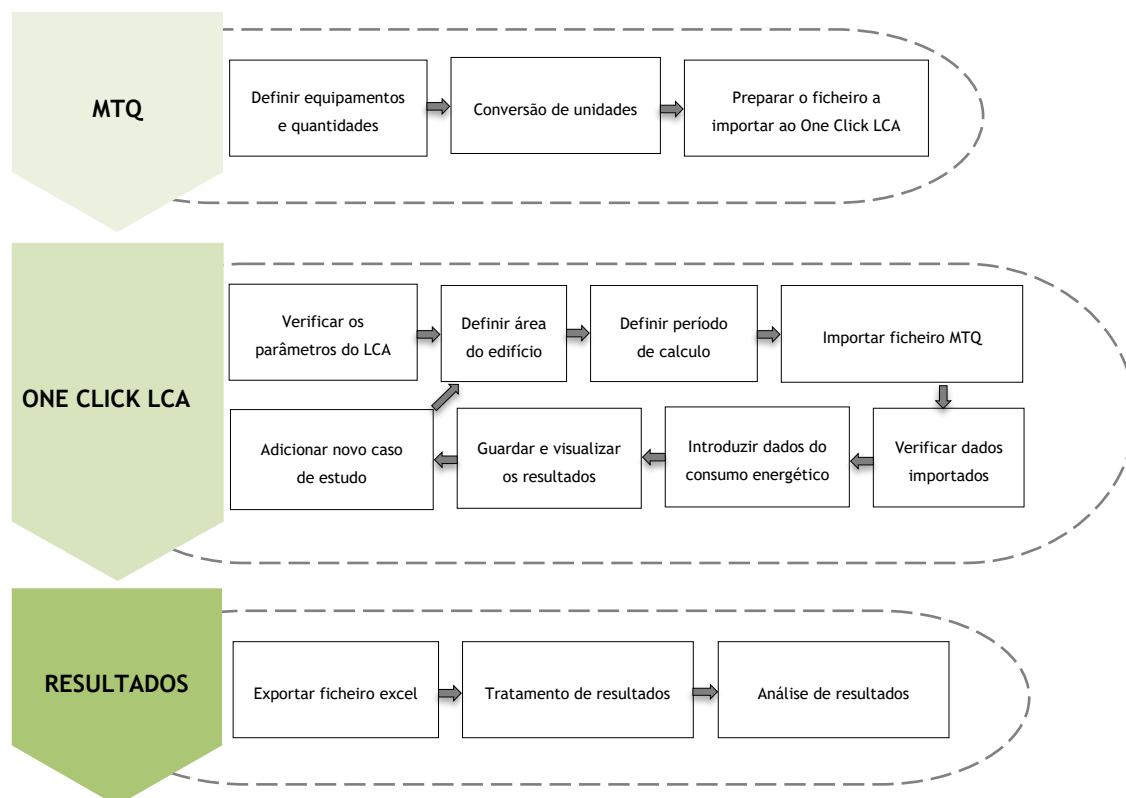


Figura 3.2 - Representação esquemática das etapas do estudo de ciclo de vida realizadas no presente trabalho.

A primeira etapa para a realização do estudo de ciclo de vida correspondeu à realização do mapa de trabalhos e quantidades (MTQ). Para tal, é necessário serem definidos os equipamentos e quantidades dos sistemas a estudar. Por fim, a partir do MTQ elaborado, é necessário a criação de um ficheiro excel de forma a ser possível a importação dos equipamentos e quantidades destes.

Num segundo momento, agora já na interface da ferramenta One Click, foram num primeiro instante verificados e definidos os parâmetros do ACV, como a região onde o estudo está a ser feito, o perfil da eletricidade usado, a tipologia do edifício e definições quanto às metodologias de cálculo usadas pela ferramenta. De seguida, importa-se o ficheiro previamente preparado e é introduzido o consumo energético inerente ao sistema em estudo.

Para a obtenção dos resultados, a ferramenta One Click LCA calcula os impactos ambientais a partir da informação contida nas DAP's e das quantidades respetivas a cada equipamento considerado para o estudo. Quanto aos impactos ambientais associados ao consumo de energia, estes são calculados atendendo às diferentes percentagens das diferentes fontes de energias nos perfis energéticos.

No mercado europeu as fases do ciclo de vida são estabelecidas pelas normas EN 15978 e EN 15804 e podem ser visualizadas na Figura 3.3.

Product Stage			Construction Process Stage		Use Stage							End-of-Life Stage				Benefits and loads beyond the system boundary		
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport to building site	Installation into building	Use/application	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction/demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse	Recovery	Recycling
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	D	D

Figura 3.3 - Fases do ciclo de vida segundo as normas EN 15978 e EN 15804. [62]

Um último momento é direcionado para os resultados que são expressos em diversas categorias de impacto, fruto da metodologia de avaliação de impacto CML-IA 2012 utilizada nos mercados Europeus e requerida pelas normas europeias EN 15978 e EN 15804. Na Figura 1 do Anexo B contém interface da página de resultados da ferramenta One Click LCA.

4 Casos de estudo

Nesta dissertação são avaliadas duas soluções para aquecimento e para aquecimento e arrefecimento de um edifício residencial, Figura 4.1, de 14 andares e 7760 m², situado em Lisboa.



Figura 4.1 - Edifício de estudo para a implementação de um sistema AVAC.

Como anteriormente referido, atendendo às temperaturas médias ambientes nas residências nas estações de aquecimento e arrefecimento e às condições de conforto implementadas, os casos de estudo considerados no presente trabalho pretendem retratar um panorama atual praticado em Portugal. Na medida que, aquando da decisão de implementação de um sistema AVAC está presente a incerteza sobre se é necessário um sistema com aquecimento e arrefecimento ou, por outro lado, se parte do conforto térmico é abdicável em prol de se optar apenas por um sistema de aquecimento.

Assim, a primeira solução corresponde à utilização de um sistema AVAC para satisfazer as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício. Por outro lado, a segunda solução pretende apenas satisfazer as necessidades de aquecimento, não considerando assim as de arrefecimento. As principais características destes sistemas estão apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características de cada sistema dos casos de estudo.

	Sistema 1 (aquecimento e arrefecimento)	Sistema 2 (só aquecimento)
Equipamentos	Bomba de calor ar/ar (unidade interior e exterior); Tubagem de cobre;	Radiador elétrico
Eficiência dos equipamentos¹	8.5 (arrefecimento) e 4.94 (aquecimento)	1 (aquecimento)
Custo de investimento dos equipamentos²	359 547 €	125 111 €
Custo de manutenção dos equipamentos anual²	9 380 €	2 680 €
Tempo de vida útil dos equipamentos³	22 anos (Bomba de calor ar/ar) e 35 anos (Tubagem de cobre)	20 anos (Radiador elétrico)
Consumos elétricos dos sistemas de climatização²	43 930 kWh	56 843 kWh

1 - As eficiências energéticas são dadas pelos parâmetros, coeficiente de desempenho (COP) e rácio de eficiência energética (EER), para os sistemas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

2 - Valores fornecidos pela A400.

3 - Valores extraídos da ferramenta One Click LCA.

Para a realização deste estudo, no sistema 1 foram consideradas o uso de 90 unidades externas de bombas de calor, 268 unidades interna de bombas de calor e 5222 m de tubagem de cobre. Por outro lado, para o sistema 2 foram 250 radiadores elétricos. No Apêndice A, encontra-se a Tabela A.1 que corresponde ao MTQ elaborado para este estudo. Nesta é possível compreender não só quais e quantos foram os equipamentos considerados para o estudo, como também a distribuição dos equipamentos dos dois sistemas pelas tipologias de apartamentos.

Para o presente estudo, as fases de ciclo de vida analisadas corresponderam aos módulos A1, A2 e A3 agregados e representam as etapas extração, processamento e transporte de matéria prima e a manufatura. De seguida, quanto ao estágio de processo de construção apenas foi contabilizado o modulo de transporte do equipamento, A4. Quanto à fase de uso, foram considerados os módulos B1, B2, B3, B4 e B5 agregados, que representam o uso ou aplicação do produto instalado, manutenção, reparação, substituição e reforma, respetivamente. Foi ainda considerado o módulo B6 que contabiliza a energia utilizada aquando da operação dos equipamentos. Quanto à fase de fim de vida foi mais uma vez considerada a agregação dos módulos C1, C2, C3 e C4 integrando nestes os processos de demolição, de transporte dos resíduos, de valorização e de envio para aterro. Foi ainda objeto de estudo a fase D que incide nos potenciais de valorização dos equipamentos, ou seja, futuros impactos ambientais que poderão a vir ser evitados. A categoria de impacto de interesse no presente estudo, corresponde ao potencial de aquecimento global e os seus resultados vêm expressos em kgCO₂e.

5 Resultados e Discussão

O principal objetivo do presente trabalho é avaliar e comparar a pegada ecológica de dois sistemas AVAC, contudo é de particular interesse copular uma análise económica. Deste modo este capítulo encontra-se subdividido em duas partes, primeiro uma análise ambiental e energética e na segunda parte uma análise económica. Adicionalmente nos Apêndices C encontram-se os dados referentes aos resultados obtidos das quantidades de GEE emitidas para os dois sistemas e para os períodos de calculo em análise.

5.1 Análise ambiental e energética

5.1.1 Emissões incorporadas

Uma primeira análise é direcionada para as emissões de GEE nas fases A1-A3, A4, B1-B5, C1-C5 e D, ou seja, o impacto ambiental que resulta de diversas atividades sectoriais inerentes aos materiais que constituem um sistema AVAC.

Numa primeira instância, é possível analisar o peso que cada equipamento dos dois sistemas representa na totalidade, desta forma na Tabela 5.1 são apresentadas as emissões de GEE destes.

Tabela 5.1 - Quantidade de GEE emitidos por cada equipamento.

Sistema	Equipamento	tCO ₂ e
Sistema 1	Tubagem de Cobre	1,7
	Bomba de calor (Ar-Ar), unidade interna	33,3
	Bomba de calor (Ar-Ar), unidade externa	61,2
Sistema 2	Radiador elétrico	16,7

Assim, numa primeira análise é perceptível um maior impacto ambiental do sistema 1, sendo que os equipamentos integrantes deste representam a emissão de aproximadamente 6 vezes mais do que o sistema 2.

Por outro lado, é possível analisar as emissões que advém de cada fase do ciclo de vida de um sistema AVAC, desta forma na Figura 5.1 são representadas as emissões de GEE das fases A1-A3, A4, B1-B5, C1-C4 para os dois sistemas. Nesta análise foram realizadas 3 simulações, para 10, 30 e 100 anos, com o intuito de se compreender a evolução das emissões nas diferentes fases.

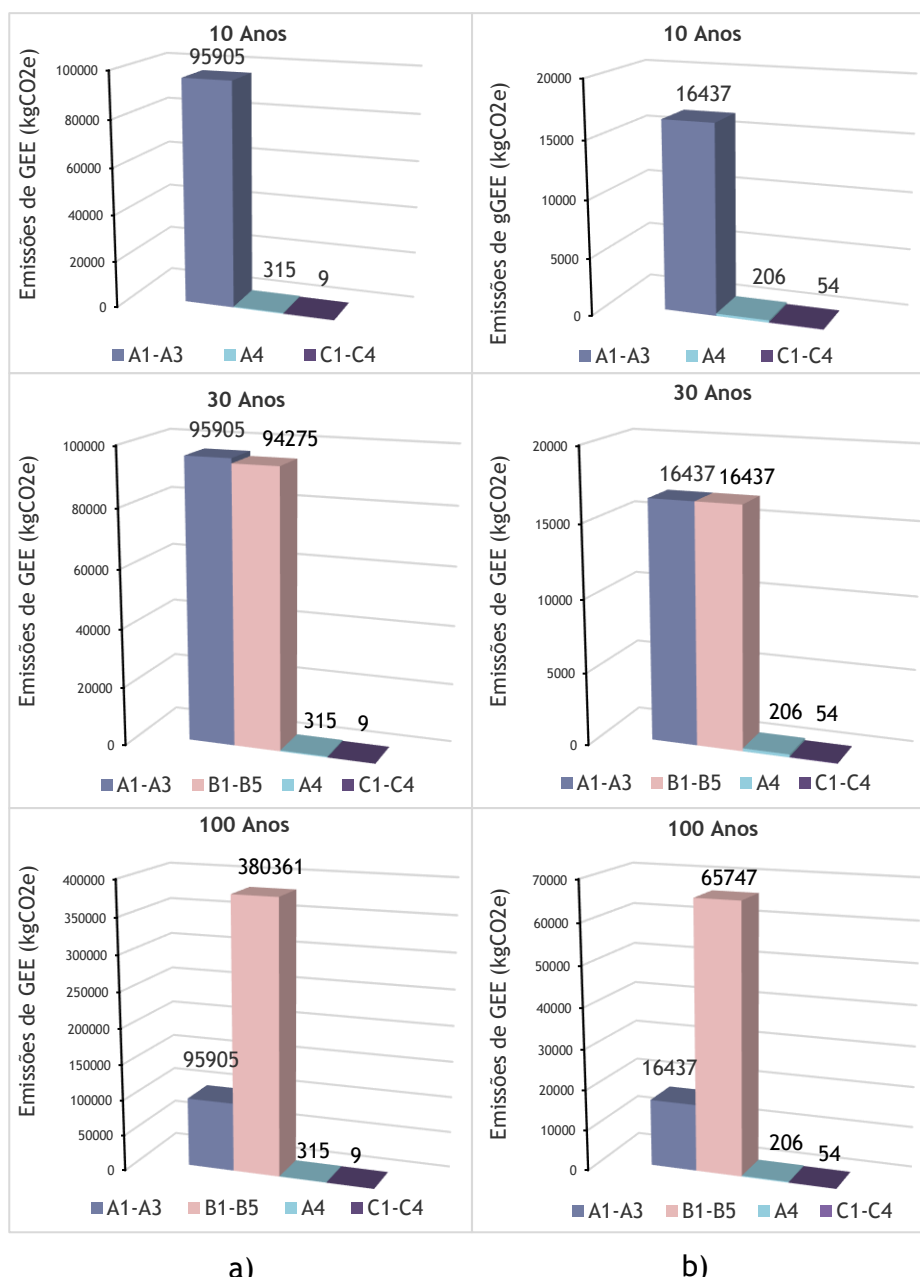


Figura 5.1 - Representação gráfica da quantidade de emissões proveniente de cada fase de ciclo de vida para os sistemas 1 e 2, respetivamente a) e b).

Por interpretação da Figura 5.1, não só é de novo perceptível um maior impacto ambiental do sistema 1, como também é possível constatar que as fases A1-A3, ou seja, as etapas de ciclo de vida que englobam todo processo de extração e manufatura dos equipamentos têm um grande peso face às restantes etapas. A importância da realização das 3 simulações para diferentes períodos de cálculo, isto é, para diferentes expectativas de tempos de utilização dos sistemas permite a compreensão do impacto ambiental das fases B1-B5 em função do tempo. Como seria de esperar quanto mais anos se considerar na utilização do sistema em questão, maior será o impacto ambiental que advém desta, pois consoante o tempo

de vida útil dos equipamentos, será necessário operações de manutenção, reparação, substituição e reforma.

Uma segunda análise, direciona-se sobre as emissões de GEE que se poderão evitar caso, se no fim de vida dos equipamentos sejam submetidos a operações de valorização. Desta forma, na Figura 5.2 são apresentadas a emissões que se poderão evitar para cada um dos sistemas em análise.

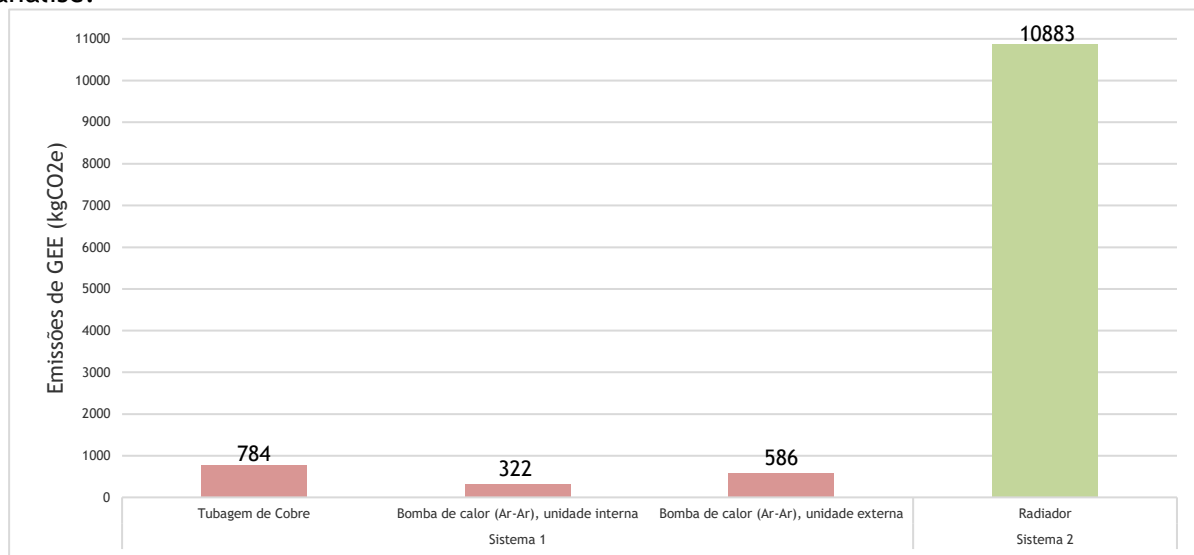


Figura 5.2 -Representação gráfica das emissões de GEE referentes à fase D.

Pela interpretação da Figura 5.2, é de notar um maior potencial de aproveitamento, aquando do fim de vida, do sistema 2 face ao sistema 1. Este facto poderá ser explicado pela diferença de complexidade e de diversidade de materiais dos equipamentos dos dois sistemas.

Por fim, na Figura 5.3 estão representados os resultados das emissões totais referentes ao CO₂ incorporado dos dois sistemas. Foram consideradas simulações também, com um período de cálculo de 10, 30 e 100 anos.

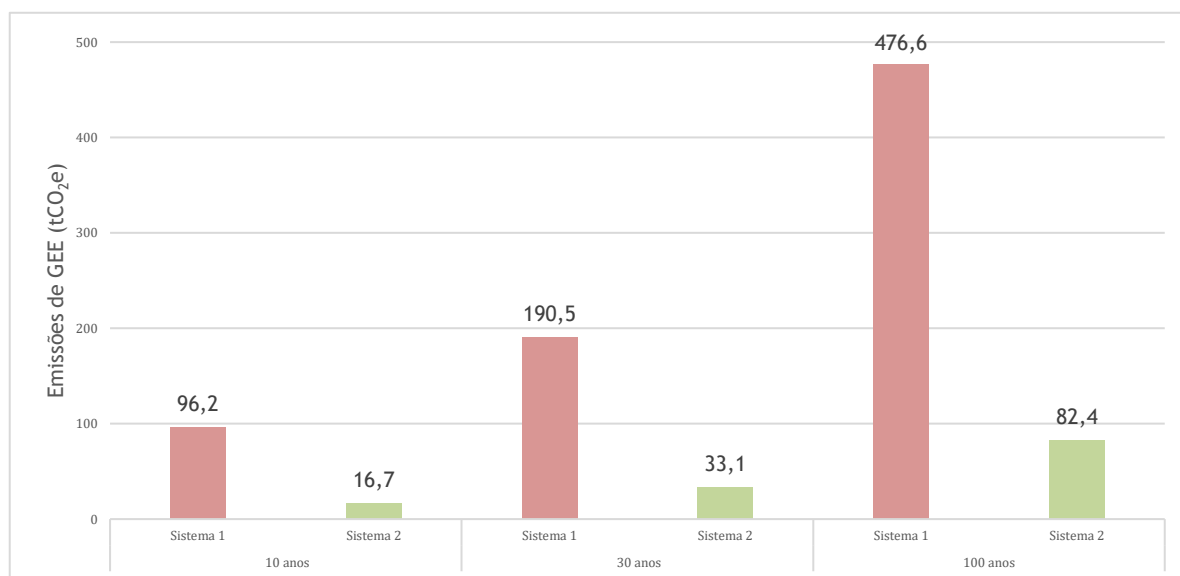


Figura 5.3 - Representação gráfica das emissões de GEE totais inerentes ao carbono incorporado.

Por conseguinte, por análise da Figura 5.3 infere-se que para qualquer que seja o intervalo de tempo considerado para a utilização dos sistemas, as emissões provenientes do CO₂ incorporado dos equipamentos no sistema 1 são aproximadamente 6 vezes maiores que no sistema 2. Assim, o impacto ambiental que advém do CO₂ incorporado é maior no sistema 1 face ao sistema 2, facto que pode ser explicado pelo maior número de equipamentos do sistema 1 em detrimento do sistema 2.

5.1.2 Emissões operacionais

Uma segunda análise é focada no impacto ambiental da fase B6, ou seja, as emissões de GEE resultantes do uso de energia, que advém do processo de produção de energia.

Relembrando que o sistema 1 engloba necessidades de aquecimento e arrefecimento e o sistema 2 apenas de aquecimento, portanto seria de esperar que o consumo energético do sistema 1 fosse maior, o que não se verifica. Posto isto, os consumos elétricos anuais do sistema 1 correspondem a 43 930 kWh e as do sistema 2 de 56 843 kWh, estes resultados são possíveis de explicar com auxílio aos parâmetros de eficiência energética. Para expressar a eficiência de aquecimento é utilizado o coeficiente de desempenho (COP), por outro lado, no arrefecimento utiliza-se o rácio de eficiência energética (EER), obtidos através das equações (5.1) e (5.2).

$$COP = \frac{\sum W_s}{W_e}, \left[\frac{W}{W} \right] \quad (5.1)$$

onde W_s representa a potência de saída e W_e representa a potência fornecida por uma fonte externa.

$$EER = \frac{\sum Q_s}{Q_e} \left[\frac{BTU}{W \cdot h} \right] \quad (5.2)$$

onde Q_s representa a energia de saída e Q_e representa a quantidade de energia fornecida por uma fonte externa.

A eficiência energética, é superior no sistema 1, quer para o aquecimento (COP=4.94), quer para o arrefecimento (EER=8,5) do que para o aquecimento (COP=1) no sistema 2. Assim, quanto menor for a eficiência energética dos equipamentos para as mesmas necessidades térmicas, ou seja, para a mesma potência de saída, maior será o consumo energético do sistema.

Deste modo, para um gasto energético de 43 930 kWh e de 56 843 kWh para os sistemas 1 e 2 são emitidos 23.9 e 31.0 toneladas de gases com efeito de estufa, expresso em tCO₂e. Foi assumido um consumo energético constante anual e, por conseguinte, os valores das emissões de GEE obtidos, são valores cumulativos. Na Figura 5.4, estão representados os valores das emissões de GEE de cada sistema ao fim de 1, 10, 20, 30 e 100 anos.

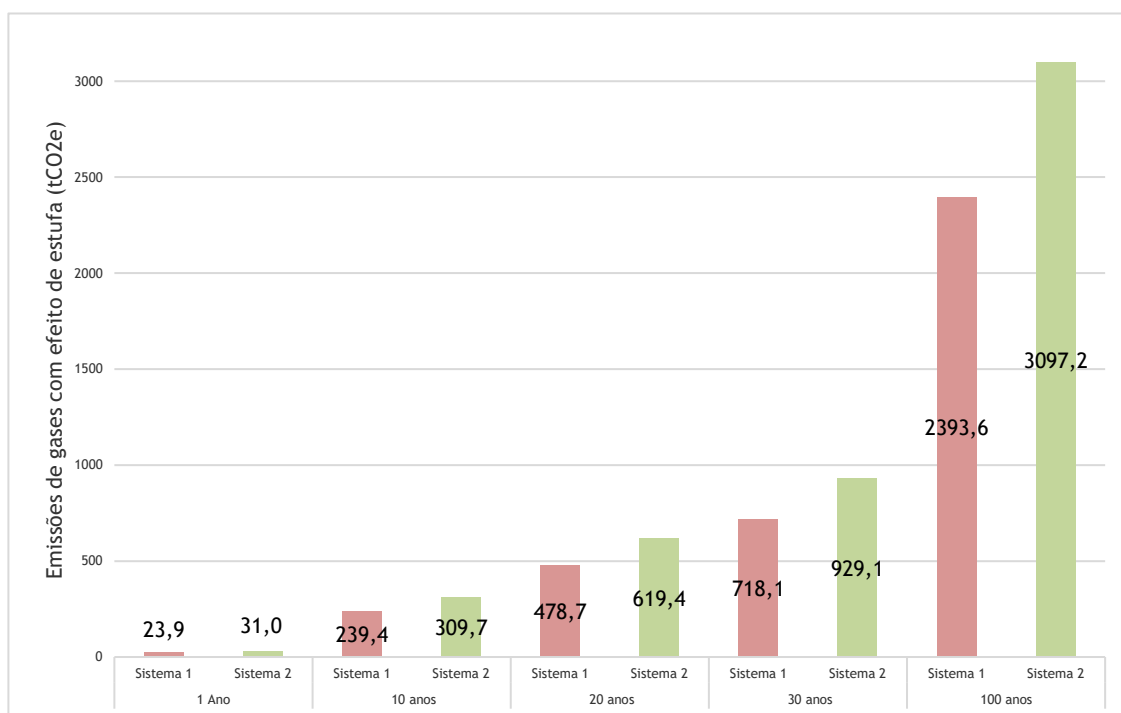


Figura 5.4 - Representação gráfica das emissões de GEE resultantes da fase B6 do ciclo de vida dos sistemas.

Analisando a Figura 5.4 torna-se perceptível a diferença do impacto ambiental ao longo dos anos ser maior no sistema 2 do que no sistema 1. Sendo que ao final de 100 anos o sistema 2 emite aproximadamente mais 704 tCO₂e de GEE.

5.1.3 Comparação das emissões de GEE totais dos dois sistemas

De forma a se poder tecer uma conclusão sobre qual dos sistemas representa um menor impacto ambiental, nas Figuras 5.5 e 5.6 encontram-se representados os somatórios das emissões incorporadas com as operacionais dos dois sistemas para diferentes intervalos de tempo considerados mais relevantes. Os períodos de operação foram escolhidos não só de modo a ser perceptível quando e qual o sistema que se apresenta como mais favorável em relação ao outro, mas também de modo a ser possível observar qual a influência das fases B1-B5 no resultado global. Deste modo, atendendo aos tempos de vida útil dos equipamentos, explica-se a necessidade de realizar simulações para períodos de cálculo de 23, 36, 44 e 45 anos de forma a ser possível compreender que não existe mais do que um momento de viragem das emissões dos dois sistemas.

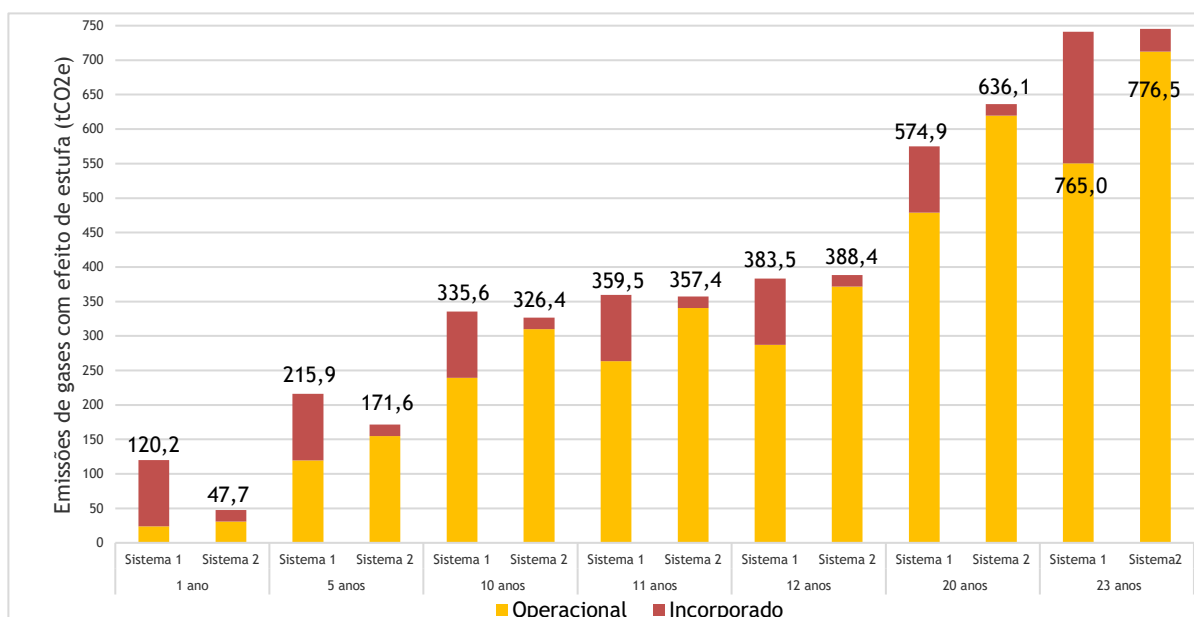


Figura 5.5 - Representação gráfica das emissões totais dos dois sistemas ao fim de 1, 5, 10, 11, 12, 20 e 23 anos.

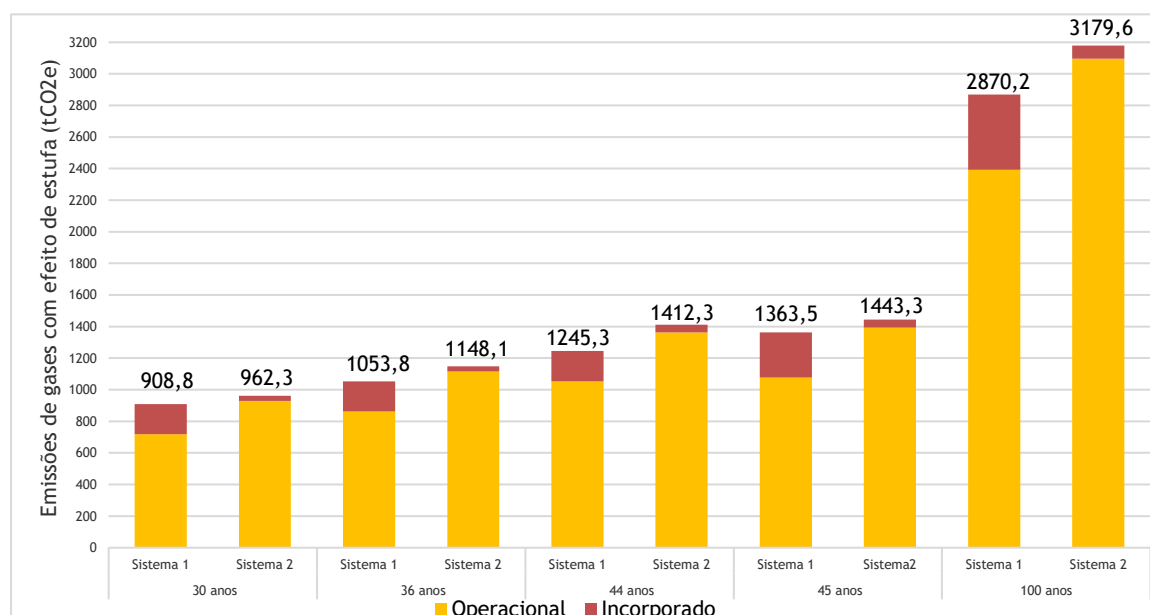


Figura 5.6 - Representação gráfica das emissões totais dos dois sistemas ao fim de 30, 36, 44, 45 e 100 anos.

Nos capítulos anteriores foram analisadas separadamente as emissões incorporadas nos equipamentos e as emissões provenientes do uso destes. Por conseguinte, foi observado que o sistema 1 possui um maior impacto ambiental resultante dos processos de produção, transporte, e de tratamento de fim de vida, por outro lado, o sistema 2 destaca-se como o que emite maior quantidade de GEE na sua fase operacional.

Por análise das Figuras 5.5 e 5.6 é possível particularizar o ano a partir do qual um sistema é ambientalmente mais vantajoso que o outro e vice-versa. Assim no seguimento da análise das Figura 5.5 e 5.6, percebe-se a existência de duas realidades, a primeira que

corresponde aos períodos de cálculo inferiores a 11 anos e uma segunda referente aos com maior de 11 anos. Pode-se ainda destacar, por análise da Figura 5.5, a importância do momento em que o sistema 1 se torna vantajoso face ao sistema 2 que corresponde a aproximadamente metade do tempo necessário para a substituição dos equipamentos dos sistemas.

Nos primeiros 11 anos de operação observa-se que o sistema 1 corresponde àquele que possui um maior impacto ambiental, sendo que neste as emissões incorporadas detêm uma elevada percentagem no total das emissões, mais concretamente no primeiro ano estas correspondem a 80 %, em 5 anos representam 45 % e aos 11 anos, 27 % das emissões totais. Quanto ao sistema 2, verifica-se que a componente de emissões incorporadas é expressivamente menor correspondendo a 35 % no primeiro ano, 10 % aos 5 anos e 5 % das emissões totais ao fim de 11 anos.

Uma segunda realidade prende-se com a importância das emissões operacionais. Desta forma, das Figuras 5.5 e 5.6 é possível interpretar que a partir dos 11 anos a componente de emissões de GEE operacional torna-se cada vez mais expressiva, constatando-se que ao fim de 20 anos a componente operacional contabiliza 83 % e 97 % das emissões totais dos sistemas 1 e 2, respetivamente. É a partir deste momento que o uso do sistema 2 torna-se ambientalmente menos favorável.

Pode-se referir assim que o sistema 1 corresponde ao ambientalmente mais favorável a partir dos 11 anos de operação.

5.2 Análise económica

Atendendo ao conceito da sustentabilidade e de modo a poder ser feita uma escolha ponderada sobre qual dos dois sistemas é mais favorável, é imprescindível alienar uma componente financeira.

Para a realização da análise económica, foi considerado um custo de investimento de 359 547 € e 125 111 € para os sistemas 1 e 2, respetivamente. Anualmente, em operações de manutenção o sistema 1 tem um custo de 9 380 € e um consumo energético de 43 930 kWh, por outro lado o sistema 2 um custo de 2 680 € e um consumo de 56 843 kWh.

Na Figura 5.8 estão representados dois cenários para cada sistema. No primeiro, Figura 5.8a, foi considerado um preço de eletricidade resultante da média aritmética da tarifa de venda a clientes finais em média tensão, sendo esta $0,10 \text{ €}\cdot\text{kWh}^{-1}$. No segundo cenário, Figura 5.8b, foi considerado o valor mais elevado praticado na tarifa de venda a clientes finais em média tensão, correspondendo assim a um cenário mais pessimista, sendo este $0,20 \text{ €}\cdot\text{kWh}^{-1}$. Na Tabela 5.2 estão apresentados os custos anuais de cada sistema para os dois cenários.

Tabela 5.2 - Custos anuais de cada sistema e para cada cenário financeiro considerado.

		Cenário 1	Cenário 2
Sistema 1	OM	9 380 €	9 380 €
	Eletricidade	4 448 €	8 874 €
	Totais	13 828 €	18 254 €
Sistema 2	OM	2 680 €	2 680 €
	Eletricidade	5 755 €	11 482 €
	Totais	8 435 €	14 162 €

É de notar que os custos de operação e manutenção para cada sistema são constantes em cada cenário. Analisando o cenário 1 na Tabela 5.2 é perceptível que embora os custos da eletricidade sejam menores para sistema 1, os custos de OM para este sistema são muito superiores aos do sistema 2. Deste modo o somatório dos custos OM com os de eletricidade é maior para o sistema 1. No cenário 2 é considerado um panorama pessimista onde o preço da eletricidade é o dobro. Neste verifica-se que a diferença entre o custo da eletricidade do sistema 2 e do sistema 1 não é maior que a diferença entre os custos OM do sistema 1 e do 2. Este facto permite entender que mesmo para um cenário pessimista o custo total anual do sistema 1 é maior. Para que o custo total anual do sistema 1 fosse menor ao do sistema 2 era necessário considerar um cenário onde o preço da eletricidade fosse 0,52 €, o que não é um valor realista praticado nos mercados.

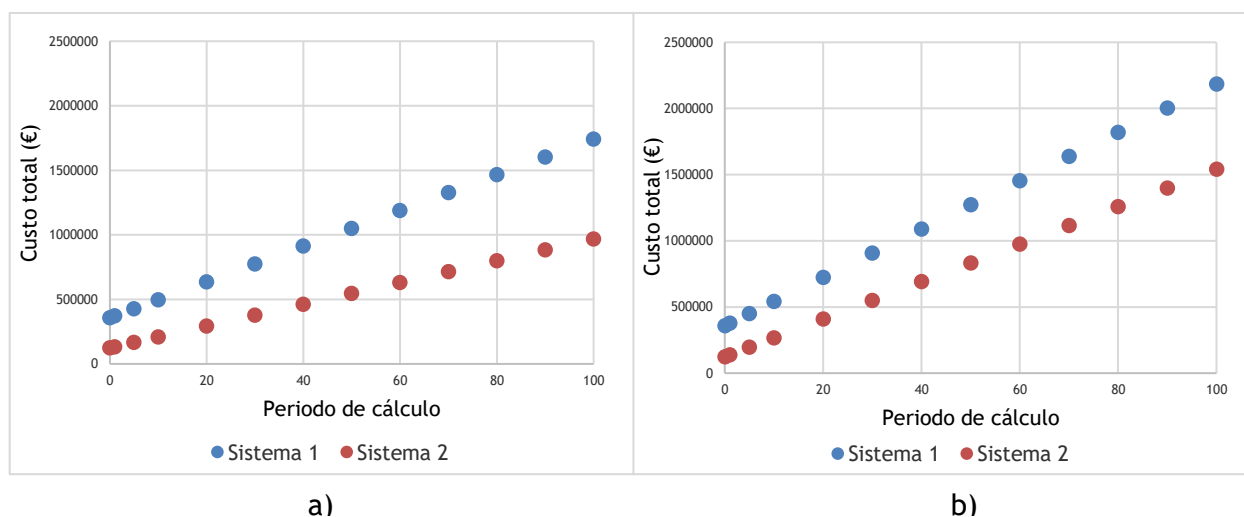


Figura 5.7 - Representação gráfica do custo total de cada sistema para diferentes períodos de cálculo considerando: a) valor médio para o preço de eletricidade; b) valor máximo para o preço de eletricidade

Portanto, por análise das Figuras 5.7 a) e b) é perceptível, em ambos os cenários, que o sistema mais dispendioso corresponde ao sistema 1, mesmo quando considerado um preço de eletricidade mais elevado no cenário pessimista, sendo o sistema 1 o com menor gasto energético. Este resultado é explicado pelo facto dos custos de investimento e manutenção serem muito superiores face aos do sistema 2.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivos não só avaliar o impacto ambiental que advém das emissões de gases com efeito de estufa das diferentes fases do ciclo de vida de dois sistemas AVAC como também estudar a viabilidade económica dos mesmos, possibilitando assim uma escolha ponderada. Para este estudo os dois sistemas AVAC considerados foram: sistema 1 - destinado a satisfazer as necessidades de aquecimento e arrefecimento e composto por bombas de calor ar-ar (unidades interior e exterior) e tubagem de cobre; sistema 2 - destinado apenas a satisfazer as necessidades de aquecimento e composto por radiadores elétricos.

A ferramenta utilizada para a implementação da metodologia de análise de ciclo de vida foi o ONE CLICK LCA. Esta ferramenta permitiu a o cálculo da quantidade de emissões de gases com efeito de estufa que advêm das diferentes etapas do ciclo de vida de um sistema AVAC.

Numa primeira análise foram estudadas as emissões de gases com efeito de estufa incorporadas para cada sistema um dos dois sistemas AVAC. Nesta foi concluído, que as fases de ciclo de vida que mais emitem gases com efeito de estufa são as fases A1 a A3 e B1 a B5, para os dois sistemas considerados. Foi também concluído que o sistema 2 corresponde àquele que apresenta maior potencial de aproveitamento aquando do fim de vida dos seus equipamentos. Por último, conclui-se que o sistema 1 apresenta um maior impacto ambiental associado as emissões de GEE incorporadas totais emitindo 476,6 kgCO₂e ao fim de 100 anos, face ao sistema 2 que emite 82,4 kgCO₂e.

Uma segunda análise é direcionada para as emissões de gases com efeito de estufa operacionais. Nesta conclui-se que para as mesmas necessidades térmicas o sistema 1 menor quantidade de GEE que advêm do uso de eletricidade para o seu funcionamento. Para este sistema as emissões de GEE ao fim de 100 anos foram de 2393,6 kgCO₂e, já para o sistema 2 foram 3097,2 kgCO₂e.

Por fim, é possível tecer uma conclusão quanto às emissões de GEE totais dos dois sistemas conclui-se que para um período de operação inferior a 11 anos o sistema 1 é ambientalmente mais favorável, contudo a partir de dos 11 anos de operação o sistema 2 possui um menor impacto ambiental. Sendo que ao final de 100 anos o sistema 1 e o sistema 2 emitem uma quantidade de GEE correspondente a 2870,2 kgCO₂e e a 3179,6 kgCO₂e, respetivamente.

Quanto ao estudo de análise económica dos dois sistemas verificou-se que o sistema 1 apresenta custos de investimento e custos anuais de operação e manutenção maiores que o sistema 2. Sendo estes de 359 547 € e de 9 380 € para o sistema 1 e 125 111€ e 2 680 € para o sistema 2, respetivamente. Para um cenário onde o preço da eletricidade é o preço médio praticado no mercado, conclui-se que os custos anuais totais do sistema 1 e do sistema 2 são

de 13 828 € e 8 435 €. Adicionalmente colocou-se a hipótese do custo da eletricidade ser o máximo praticado no mercado e neste cenário conclui-se que os custos anuais totais do sistema 1 e do sistema 2 são de 18 254 € e 14 162 €, respetivamente. Concluindo assim que o sistema 1 é uma solução mais dispendiosa que o sistema 2.

Em suma, de maneira a poder ser feita uma escolha refletida é necessário avaliar os sistemas em estudo quanto aos pilares da sustentabilidade. Assim o sistema 1 destaca-se por ser ambientalmente melhor e socialmente mais aceitável visto possibilitar a aquecimento e arrefecimento, logo maior conforto. Por outro lado, o sistema 2 destaca-se por ser economicamente mais vantajoso.

7 Avaliação do trabalho realizado

7.1 Objetivos Realizados

O primeiro objetivo consistia na utilização de uma metodologia de análise de ciclo de vida recorrendo à ferramenta de One Click LCA com a finalidade de comparar o impacto ambiental de dois sistemas AVAC a implementar num edifício residencial. Este objetivo foi alcançado com sucesso, apesar de alguma dificuldade deparada aquando da seleção dos componentes dos sistemas AVAC na ferramenta One Click LCA.

O segundo objetivo referente à análise económica das duas soluções a implementar foi alcançado com êxito.

7.2 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para trabalhos futuros, na ótica um melhor aproveitamento da ferramenta One Click LCA, sugere-se a utilização total das funcionalidades que esta dispõe, ou seja, a realização de uma análise de ciclo de vida a todo o edifício e não só analisar o impacto ambiental que advém da emissão de gases com efeito de estufa, mas também estudar as restantes categorias de impacto, como a depleção do ozono, a acidificação do solo e água, a eutrofização e a criação de ozono fotoquímico.

Propõe-se também, uma análise de ciclo de vida não só de uma maior diversidade de sistemas AVAC, como também integrando tecnologias de energia renováveis, como por exemplo painéis fotovoltaicos, energia solar térmica e o armazenamento eletroquímico de energia.

7.3 Apreciação Final

Globalmente, o trabalho desenvolvido decorreu da melhor forma. A temática abordada nesta dissertação é de interesse atual, pelo que este tipo de preocupação do impacto ambiental dos produtos, sistemas ou serviços estará cada vez mais presente na realidade das empresas e dos mercados. Este trabalho permitiu-me não só o desenvolvimento de diversas competências através da utilização ferramenta One Click LCA como também adquirir conhecimentos nas áreas do sector da construção e sistemas AVAC.

Este projeto não se enquadrou no ramo tradicional de engenharia química, o que muitas vezes se situou como uma barreira na compreensão de determinados conceitos. Contudo, o grande desafio deste trabalho de impulsionar-me para fora da minha zona de conforto, proporcionou-me não só o enriquecimento do meu conhecimento científico como também a

utilização de ferramentas adquiridas ao longo do meu percurso académico, para o desempenho de inúmeras e diversificadas tarefas.

8 Referências

1. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
2. Chen S, Zhang K, Setunge S. Comparison of three HVAC systems in an office building from a life cycle perspective [Internet]. Vol. 5, 2011 International Conference on Future Management Science and Engineering (Icfmse 2011), Vol 1. Kandy, Sri Lanka; 2011. Available from: <http://dl.lib.mrt.ac.lk/handle/123/9109>
3. Curran MA, editor. Goal and Scope in Life Cycle Assessment. LCA Compendium - The Complete World of Life Cycle Assessment. Springer, Dordrecht; 2017. 1-170.
4. Bayer C, Gamble M, Gentry R, Joshi S. Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice. American Institute of Architects. 2010;1-193.
5. Impact Categories (LCA) - Overview [Internet]. [cited 2021 Jan 24]. Available from: <https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/>
6. Azevedo J. New Solar energy storage technologies. 2019.
7. Harde H. Scrutinizing the carbon cycle and CO₂ residence time in the atmosphere. Global and Planetary Change [Internet]. 2017;152:19-26. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818116304787>
8. Keeling CD, Piper SC, Bacastow RB, Wahlen M, Whorf TP, Heimann M, et al. Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ Exchange with the Terrestrial Biosphere and Oceans from 1978 to 2000: Observations and Carbon Cycle Implications. In: A History of Atmospheric CO₂ and Its Effects on Plants, Animals, and Ecosystems. Springer, New York, NY; 2005. p. 83-113.
9. NASA: Climate change and global warming [Internet]. [cited 2020 Nov 22]. Available from: <https://climate.nasa.gov/>
10. Photovoltaics Education Website [Internet]. [cited 2021 Jan 24]. Available from: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/the-greenhouse-effect>
11. Mendonça GLT. Response characteristics of the global carbon cycle in earth system models [Internet]. 2020. Available from: https://pure.mpg.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_3264280
12. Nations U. The Paris Agreement [Internet]. [cited 2020 Nov 29]. Available from: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
13. European Commission. 2030 climate & energy framework [Internet]. [cited 2020 Nov 29]. Available from: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en

14. PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030) [Internet]. 2019. Available from:
https://www.apambiente.pt/_zdata/Alteracoes_Climaticas/Mitigacao/PNEC/PNEC_PT_Template_Final_2019_30122019.pdf
15. Europeia C. Pacto Ecológico Europeu [Internet]. [cited 2020 Nov 29]. Available from:
https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt
16. Emissions Gap Report 2019 [Internet]. 2019. Available from:
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
17. DGEG, ADENE, Observatório da Energia. Energia em Números - Edição 2020 [Internet]. 2020. Available from: <https://www.observatoriodaenergia.pt/wp-content/uploads/2020/06/Energia-em-Números-2020.pdf>
18. Energy statistics - an overview [Internet]. [cited 2020 Nov 29]. Available from:
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption
19. Rodriguez BXD. Embodied Carbon of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigerants (HVAC+R) Systems [Internet]. 2019. Available from:
<http://hdl.handle.net/1773/44736>
20. Wang Z, Fan L, Mark H. Life-cycle assessment of CO2 emissions of buildings. In: 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. 2011. p. 438-41.
21. Zhang Z, Wang B. Research on the life-cycle CO2 emission of China's construction sector. Energy and Buildings [Internet]. 2016;112:244-55. Available from:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304631>
22. Chastas P, Theodosiou T, Kontoleon KJ, Bikas D. Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO2 emissions of residential buildings. Building and Environment [Internet]. 2018;130(December 2017):212-26. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>
23. Vigovskaya A, Aleksandrova O, Bulgakov B. Life Cycle Assessment (LCA) of a LEED certified building. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365(2).
24. Green Building Standards And Certification Systems [Internet]. [cited 2021 Mar 6]. Available from: <https://www.wbdg.org/resources/green-building-standards-and-certification-systems>

25. Almeida AMM de. Rehabilitation Project for an Energy Autonomous House. 2019.
26. Matias L, Santos CP dos. CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO NO SETOR RESIDENCIAL EM PORTUGAL. Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono. 2013;(November):1-12.
27. IRENA, IEA, REN21. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling [Internet]. 2020. Available from: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_IEA_REN21_Policies_Heating_Cooling_2020.pdf
28. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2016 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment. 2016;(28):955.
29. Marques J. Manutenção de Uma Instalação de AVAC das Áreas Limpas de Uma Indústria Farmacêutica. 2005;
30. Abreu VD da C. Eficiência Energética Num Edifício do Setor do Retalho. 2019.
31. Lopes VMG. Sistemas de AVAC - Estratégias de operação para redução de custos energéticos. 2017.
32. Marques LFB. Avaliação Técnico-Económica de Sistemas de AVAC. 2011.
33. Landi N. Life Cycle Cost Analysis of HVAC systems in office buildings [Internet]. 2019. Available from: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113705328/Nicole_Landi_87991_MEGE_Master_Thesis.pdf
34. Cerqueira RJ da S. Projeto de Construção de uma Casa Energeticamente Autónoma. 2019.
35. Cagigal LD de LC e T. Análise da Eficiência Energética numa unidade de Ensino Hoteleiro [Internet]. 2020. Available from: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/126586>
36. Rodriguez BX, Amany L, Simonen K. Embodied and Operational Carbon of Typical Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems in Office Buildings in Washington State: A study of buildings registered under LEED v3 2009. {IOP} Conference Series: Earth and Environmental Science [Internet]. 2019;294:12057. Available from: <https://doi.org/10.1088%2F1755-1315%2F294%2F1%2F012057>
37. Kiamili C, Hollberg A, Habert G. Detailed assessment of embodied carbon of HVAC systems for a new office building based on BIM. Sustainability (Switzerland). 2020;12(8).

38. Speck RL. A comparative analysis of commercially available Life Cycle Assessment Software [Internet]. 2014. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/095965269400001H>
39. Diakoumakou V. Building Related Life Cycle Assessment (LCA) Software Tools: a State of the Art Review [Internet]. 2016. Available from: [https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/6629/2/Building related Life Cycle Assessment LCA software tools a state of the art review.pdf](https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/6629/2/Building%20related%20Life%20Cycle%20Assessment%20LCA%20software%20tools%20a%20state%20of%20the%20art%20review.pdf)
40. ISO 14021:2016 Environmental labels and declarations – Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling).
41. ISO 14024:2018 Environmental labels and declarations – Type I environmental labelling – Principles and procedures.
42. ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures.
43. Borghi A del. LCA and communication : Environmental Product Declaration. 2013;293-5. Available from: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42235445/s11367-012-0513-9.pdf?1454796440=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLCA_and_communication_Environmental_Prod.pdf&Expires=1609781873&Signature=U2cFT8He0w9vzc1zqC0U9PRW3HBm5Is-PKZl7GAePnWG6x6hjn
44. Trindade P. Rotulagem ambiental [Internet]. 2009. Available from: <http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/581/1/ROTULAMBIENTALTRINDL.pdf>
45. Bionova Ltd. How to make an Environmental Product Declaration and how it helps your business [Internet]. 2020. Available from: <https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2020/11/EPD-Ebook-181120-Final-v3.pdf>
46. ISO 21930:2017 Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services.
47. EN 15804:2012+A1:2013 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.
48. AYGENÇ M. LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF A LEED-CERTIFIED GREEN BUILDING USING TWO DIFFERENT LCA TOOLS [Internet]. 2019. Available from: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12624583/index.pdf>
49. Tally [Internet]. [cited 2020 Dec 20]. Available from: <https://www.choosetally.com/methods/>

50. The Athena Sustainable Materials Institute [Internet]. [cited 2020 Dec 20]. Available from: <http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/>
51. GaBi Solutions [Internet]. [cited 2020 Dec 20]. Available from: <http://www.gabi-software.com/international/index/>
52. Herrero-Garcia V. Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparison of Available Tools. *Technology|Architecture + Design* [Internet]. 2020;4(2):248-52. Available from: <https://doi.org/10.1080/24751448.2020.1804771>
53. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos [Internet]. [cited 2021 Feb 11]. Available from: <https://www.erse.pt/atividade/regulacao/tarifas-e-precos-eletricidade/>
54. PORDATA. Intensidade carbonica [Internet]. [cited 2020 Dec 1]. Available from: <https://www.pordata.pt/DB/Europa/Ambiente+de+Consulta/Gráfico/5817964>
55. Pereira TC, Amaro A, Borges M, Silva R, Canaveira P. PORTUGUESE NATIONAL INVENTORY REPORT ON GREENHOUSE GASES. 2019.
56. Our World In Data [Internet]. [cited 2020 Dec 1]. Available from: <https://ourworldindata.org/life-expectancy/>
57. de Oliveira Fernandes E, Varela A, Samúdio M, Sá E, Silva J, Leal V, et al. Matriz de Energia da Área Metropolitana do Porto. 2014.
58. Wang RZ, Pan QW, Xu ZY. 12 - Solar-powered adsorption cooling systems. In: Wang RZ, Ge TS, editors. *Advances in Solar Heating and Cooling* [Internet]. Woodhead Publishing; 2016. p. 299-328. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081003015000126>
59. Chiller Types And Application Guide [Internet]. [cited 2021 Mar 12]. Available from: <https://theengineeringmindset.com/chiller-types-and-application-guide/>
60. CERTUS. Tecnologias - Sistemas AVAC [Internet]. 2015. Report No.: 620906. Available from: http://certus-project.eu/download/downloads/Downloads/wp_5_training_materials/training_courses_portugal/1.3-Tecnologias%25E2%2580%2593Sistemas-AVAC.pdf
61. A400 Projetistas e Consultores de Engenharia. Apresentação AVAC. 2020.
62. Life Cycle Assessment software FAQ [Internet]. [cited 2021 Mar 6]. Available from: <https://www.oneclicklca.com/support/faq/>

Anexo A - Tarifas da eletricidade

Tabela A.1 - Tarifas Transitórias de Venda a Clientes Finais em média tensão e baixa tensão Portugal continental. Extraído de [53].

TARIFA TRANSITÓRIA DE VENDA A CLIENTES FINAIS EM MT		PREÇOS	
Termo tarifário fixo		(EUR/mês)	(EUR/dia) *
		44.09	1.4495
Potência		(EUR/kW·mês)	(EUR/kW·dia) *
Tarifa de longas utilizações	Horas de ponta	9.786	0.3217
	Contratada	1.503	0.0494
Tarifa de médias utilizações	Horas de ponta	9.859	0.3241
	Contratada	1.418	0.0466
Tarifa de curtas utilizações	Horas de ponta	14.286	0.4697
	Contratada	0.754	0.0248
Energia ativa		(EUR/kWh)	
Tarifa de longas utilizações	Períodos I, IV	Horas de ponta	0.1321
		Horas cheias	0.1050
		Horas de vazio normal	0.0712
		Horas de super vazio	0.0615
	Períodos II, III	Horas de ponta	0.1331
		Horas cheias	0.1053
		Horas de vazio normal	0.0725
		Horas de super vazio	0.0665
Tarifa de médias utilizações	Períodos I, IV	Horas de ponta	0.1364
		Horas cheias	0.1084
		Horas de vazio normal	0.0718
		Horas de super vazio	0.0617
	Períodos II, III	Horas de ponta	0.1413
		Horas cheias	0.1061
		Horas de vazio normal	0.0748
		Horas de super vazio	0.0665
Tarifa de curtas utilizações	Períodos I, IV	Horas de ponta	0.2020
		Horas cheias	0.1131
		Horas de vazio normal	0.0751
		Horas de super vazio	0.0664
	Períodos II, III	Horas de ponta	0.2012
		Horas cheias	0.1127
		Horas de vazio normal	0.0754
		Horas de super vazio	0,0699

Anexo B - Exemplo de folha de resultados obtidos na ferramenta ONE CLICK LCA para uma ACV

Life-cycle assessment results

Result category	Global warming kg CO ₂ e ②	Acidification kg SO ₂ e ②	Eutrophication kg PO ₄ e ②	Ozone depletion potential kg CFC11e ②	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee ②	Total use of primary energy ex. raw materials MJ ②
A1-A3 ② Construction Materials	9,59E4	9,75E2	3E2	4,28E2	5,05E2	1,73E6
A4 ② Transportation to site	3,15E2	1,27E0	2,74E-1	6,07E-5	2,63E-2	8,79E3
A4 Transportation to site	3,15E2	1,27E0	2,74E-1	6,07E-5	2,63E-2	8,79E3
A4-leg2 Transportation to site - leg 2						
A5 ② Construction/installation process						
B1-B5 ② Maintenance and material replacement	1,9E5	1,94E3	5,99E2	8,55E2	1,01E3	3,44E6
B6 ② Energy use	1,12E6	5,28E3	7,35E2	8,59E-2	2,64E2	1,84E7
B7 ② Water use						
C1-C4 ② Deconstruction	9,23E0	5,46E-2	7,44E-3	8,7E-12	4,34E-3	1,38E2
D ② External impacts (not included in totals)	-1,69E3	-8,33E0	-6,74E-1	-1,91E-8	-8,39E-1	-2E4
Total	1,41E6	8,2E3	1,63E3	1,28E3	1,78E3	2,35E7
Results per denominator						
Gross Internal Floor Area (IPMS/RICS) 7660.0 m ²	1,84E2	1,07E0	2,13E-1	1,67E-1	2,32E-1	3,07E3

Figura B.1 - Exemplo de uma folha de resultados de uma ACV.

Apêndice A - Mapa de trabalhos e quantidades

Tabela A.1 - Mapa de trabalho e quantidades elaborado para os casos de estudo.

MAPA DE TRABALHOS E QUANTIDADES						
		Nexity P3, Lda. Torre Novafacar		PBA - Projeto Base IME - Instalações Mecânicas AVA - Ar Condicionado e Ventilação		
Nº ARTIGO	DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS	UNIDADES	QUANT.	UNIDADE ONE CLICK	QUANTIDADE UNITARIA	QUANTIDADE ONE CLICK
1A	<p>NOTAS:</p> <p>Todos os trabalhos deverão ser realizados de acordo com o projecto (peças escritas e desenhadas) e satisfazendo o especificado no Caderno de Encargos.</p> <p>Os critérios de medição a considerar são os estipulados pelo LNEC. Está compreendido nos artigos todos os trabalhos, materiais e equipamentos necessários à execução dos mesmos e ao seu perfeito acabamento.</p> <p>Os trabalhos a seguir discriminados referem-se a fornecimentos e montagens.</p> <p>CONDICIONAMENTO DE AR E VENTILAÇÃO DOS LOCAIS - SOLUÇÃO MULTISPLIT</p>					

1A.1	Sistema de climatização de expansão directa, do tipo "Split" , Inverter, em versão bomba de calor, encravado em frio, formado por unidades exteriores (UE's) com compressores "Scroll" e unidades interiores (UI's) do tipo mural, cassette de 4 vias , ou condutas de montagem em tecto falso, conforme indicado no C.E. ,incluindo carga de fluido frigorigéneo, apoios anti-vibráteis, filtros, e todos os acessórios, conforme especificado:					
1A.1.1	Apartamento - Tipo 1					
1A.1.1.1	UE 1.1	Unidade	68	kg	57	3876
1A.1.1.2	UI 1.1	Unidade	68	kg	10	680
1A.1.1.3	UI 1.2	Unidade	136	kg	10	1360
1A.1.2	Apartamento - Tipo 2					
1A.1.2.1	UE 2.1	Unidade	12	kg	32	384
1A.1.2.2	UI 2.1	Unidade	12	kg	10	120
1A.1.3	Apartamento - Tipo 3					
1A.1.3.1	UE 3.1	Unidade	36	kg	32	1152
1A.1.3.2	UI 3.1	Unidade	36	kg	10	360
1A.1.4	Apartamento - Tipo 4					
1A.1.4.1	UE 4.1	Unidade	10	kg	57	570
1A.1.4.2	UI 4.1	Unidade	10	kg	10	100
1A.1.4.3	UI 4.2	Unidade	20	kg	10	200
1A.1.5	Apartamento - Tipo 5					
1A.1.5.1	UE 5.1	Unidade	4	kg	57	228
1A.1.5.2	UI 5.1	Unidade	4	kg	10	40
1A.1.5.3	UI 5.2	Unidade	8	kg	10	80
1A.1.6	Apartamento - Tipo 6					
1A.1.6.1	UE 6.1	Unidade	2	kg	57	114
1A.1.6.2	UE 6.2	Unidade	2	kg	36	72
1A.1.6.3	UI 6.1	Unidade	2	kg	10	20
1A.1.6.4	UI 6.2	Unidade	4	kg	10	40
1A.1.6.5	UI 6.3	Unidade	2	kg	10	20
1A.1.6.6	UI 6.4	Unidade	2	kg	10	20
1A.1.7	Apartamento - Tipo 7					

1A.1.7.1	UE 7.1	Unidade	2	kg	57	114
1A.1.7.2	UE 7.2	Unidade	2	kg	57	114
1A.1.7.3	UI 7.1	Unidade	10	kg	10	100
1A.1.7.4	UI 7.2	Unidade	2	kg	10	20
1A.2	Tubagem de cobre para circulação de fluido refrigerante R410A, com isolamento em coquilha de borracha esponjosa, revestida a chapa de alumínio, do tipo ArmaCheck ou equivalente, incluindo acessórios e suportes, conforme especificado nos seguintes diâmetros:					
1A.2.1	Apartamento - Tipo 1					
1A.2.1.1	Ø 6,4 mm	m	1706.8	kg	0,119	203
1A.2.1.2	Ø 9,5 mm	m	1706.8	kg	0.198	338
1A.2.2	Apartamento - Tipo 2					
1A.2.2.1	Ø 6,4 mm	m	74.4	kg	0.119	9
1A.2.2.2	Ø 9,5 mm	m	74.4	kg	0.198	15
1A.2.3	Apartamento - Tipo 3					
1A.2.3.1	Ø 6,4 mm	m	241.2	kg	0.119	29
1A.2.3.2	Ø 9,5 mm	m	241.2	kg	0.198	48
1A.2.4	Apartamento - Tipo 4					
1A.2.4.1	Ø 6,4 mm	m	276	kg	0.119	33
1A.2.4.2	Ø 9,5 mm	m	276	kg	0.198	55
1A.2.5	Apartamento - Tipo 5					
1A.2.5.1	Ø 6,4 mm	m	92.4	kg	0.119	11
1A.2.5.2	Ø 9,5 mm	m	92.4	kg	0.198	18
1A.2.6	Apartamento - Tipo 6					
1A.2.6.1	Ø 6,4 mm	m	100	kg	0.119	12
1A.2.6.2	Ø 9,5 mm	m	100	kg	0.198	20
1A.2.7	Apartamento - Tipo 7					
1A.2.7.1	Ø 6,4 mm	m	120	kg	0.119	14
1A.2.7.2	Ø 9,5 mm	m	120	kg	0.198	24

1B	CONDICIONAMENTO DE AR E VENTILAÇÃO DOS LOCAIS - SOLUÇÃO RADIADORES ELÉTRICOS					
1B.1	Radiadores elétricos, incluindo controlador e demais acessórios, conforme especificado:					
1B.2.1	Apartamento - Tipo 1					
1B.2.1.1	RAD 1.1	Unidade	68	kW	1,8	122.4
1B.2.1.2	RAD 1.2	Unidade	136	kW	0.75	102
1B.2.2	Apartamento - Tipo 2					
1B.2.2.1	RAD 2.1	Unidade	12	kW	1.2	14.4
1B.2.3	Apartamento - Tipo 3					
1B.2.3.1	RAD 3.1	Unidade	36	kW	1.5	54
1B.2.4	Apartamento - Tipo 4					
1B.2.4.1	RAD 4.1	Unidade	10	kW	1.5	15
1B.2.4.2	RAD 4.2	Unidade	20	kW	0.75	15
1B.2.5	Apartamento - Tipo 5					
1B.2.5.1	RAD 5.1	Unidade	8	kW	1.2	9.6
1B.2.5.2	RAD 5.2	Unidade	8	kW	0.75	6
1B.2.6	Apartamento - Tipo 6					
1B.2.6.1	RAD 6.1	Unidade	4	kW	1.8	7.2
1B.2.6.2	RAD 6.2	Unidade	10	kW	1.2	12
1B.2.7	Apartamento - Tipo 7					
1B.2.7.1	RAD 7.1	Unidade	4	kW	1.8	7.2
1B.2.7.2	RAD 7.2	Unidade	8	kW	1.2	9.6
1B.2.7.3	RAD 7.3	Unidade	2	kW	0.9	1.8
1B.2.7.4	RAD 7.4	Unidade	2	kW	0.75	1.5

Apêndice B - Tabela de dados de entrada na ferramenta ONE CLICK LCA

Tabela B.1 - Folha de excel utilizada para a importação para a ferramenta dos dados dos sistemas em estudo.

CÓDIGO	CLASS	IFCMATERIAL	QUANTITY	QTY_TYPE	THICKNESS_MM	TRANSPORT_KM	COMMENT
1	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	3876	kg			1 1A.1.1.1 UE 1.1
2	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	680	KG			2 1A.1.1.2 UI 1.1
3	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	1360	KG			3 1A.1.1.3 UI 1.2
4	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	384	KG			4 1A.1.2.1 UE 2.1
5	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	120	KG			5 1A.1.2.2 UI 2.1
6	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	1152	KG			6 1A.1.3.1 UE 3.1
7	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	360	KG			7 1A.1.3.2 UI 3.1
8	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	570	KG			8 1A.1.4.1 UE 4.1
9	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	100	KG			9 1A.1.4.2 UI 4.1
10	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	200	KG			10 1A.1.4.3 UI 4.2
11	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	228	KG			11 1A.1.5.1 UE 5.1
12	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	40	KG			12 1A.1.5.2 UI 5.1
13	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	80	KG			13 1A.1.5.3 UI 5.2
14	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	114	KG			14 1A.1.6.1 UE 6.1
15	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	72	KG			15 1A.1.6.2 UE 6.2
16	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	20	KG			16 1A.1.6.3 UI 6.1
17	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	40	KG			17 1A.1.6.4 UI 6.2
18	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	20	KG			18 1A.1.6.5 UI 6.3
19	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	20	KG			19 1A.1.6.6 UI 6.4
20	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	114	KG			20 1A.1.7.1 UE 7.1
21	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, external unit, heating (26.9 kW) and cooling (25.1 kW)	114	KG			21 1A.1.7.2 UE 7.2
22	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	100	KG			22 1A.1.7.3 UI 7.1
23	BUILDINGTECH	Air-to-air heat pump, internal unit, heating (4.66 kW) and cooling (4.32 kW)	20	KG			23 1A.1.7.4 UI 7.2
24	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland) Copper piping (Wieland)	203.1092	KG			24 1A.2.1.1 Ø 6,4 mm
25	BUILDINGTECH		337.9464	KG			25 1A.2.1.2 Ø 9,5 mm

26	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	8.8536	KG	26 1A.2.2.1 Ø 6,4 mm
27	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	14.7312	KG	27 1A.2.2.2 Ø 9,5 mm
28	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	28.7028	KG	28 1A.2.3.1 Ø 6,4 mm
29	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	47.7576	KG	29 1A.2.3.2 Ø 9,5 mm
30	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	32.844	KG	30 1A.2.4.1 Ø 6,4 mm
31	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	54.648	KG	31 1A.2.4.2 Ø 9,5 mm
32	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	10.9956	KG	32 1A.2.5.1 Ø 6,4 mm
33	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	18.2952	KG	33 1A.2.5.2 Ø 9,5 mm
34	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	11.9	KG	34 1A.2.6.1 Ø 6,4 mm
35	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	19.8	KG	35 1A.2.6.2 Ø 9,5 mm
36	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	14.28	KG	36 1A.2.7.1 Ø 6,4 mm
37	BUILDINGTECH	Copper piping (Wieland)	23.76	KG	37 1A.2.7.2 Ø 9,5 mm
38	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	122.4	KW	38 1B.2.1.1 RAD 1.1
39	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	102	KW	39 1B.2.1.2 RAD 1.2
40	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	14.4	KW	40 1B.2.2.1 RAD 2.1
41	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	54	KW	41 1B.2.3.1 RAD 3.1
42	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	15	KW	42 1B.2.4.1 RAD 4.1
43	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	15	KW	43 1B.2.4.2 RAD 4.2
44	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	9.6	KW	44 1B.2.5.1 RAD 5.1
45	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	6	KW	45 1B.2.5.2 RAD 5.2
46	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	7.2	KW	46 1B.2.6.1 RAD 6.1
47	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	12	KW	47 1B.2.6.2 RAD 6.2
48	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	7.2	KW	48 1B.2.7.1 RAD 7.1
49	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	9.6	KW	49 1B.2.7.2 RAD 7.2
50	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	1.8	KW	50 1B.2.7.3 RAD 7.3
51	BUILDINGTECH	Electric radiator, per 1kW / unit	1.5	KW	51 1B.2.7.4 RAD 7.4

Apêndice C - Resultados obtidos para as emissões de GEE através da ferramenta ONE CLICK LCA

Tabela C.1 - Dados das quantidades de emissões de gases de efeito de estufa para cada sistema e para os diferentes períodos de cálculo.

		Emissões de GEE			Peso de cada componente de emissões	
		Operacionais	Incorporadas	Totais	% (Operacional)	% (Incorporado)
		tCO ₂ e	tCO ₂ e	tCO ₂ e		
1 ano	Sistema 1	23.9	96.2	120.2	20%	80%
	Sistema 2	31.0	16.7	47.7	65%	35%
5 anos	Sistema 1	119.7	96.2	215.9	55%	45%
	Sistema 2	154.9	16.7	171.6	90%	10%
10 anos	Sistema 1	239.4	96.2	335.6	71%	29%
	Sistema 2	309.7	16.7	326.4	95%	5%
11 anos	Sistema 1	263.3	96.2	359.5	73%	27%
	Sistema 2	340.7	16.7	357.4	95%	5%
12 anos	Sistema 1	287.2	96.2	383.5	75%	25%
	Sistema 2	371.7	16.7	388.4	96%	4%
13 anos	Sistema 1	311.2	96.2	407.4	76%	24%
	Sistema 2	402.6	16.7	419.3	96%	4%
14 anos	Sistema 1	335.1	96.2	431.3	78%	22%
	Sistema2	433.6	16.7	450.3	96%	4%
15 anos	Sistema 1	359.0	96.2	455.3	79%	21%
	Sistema2	464.6	16.7	481.3	97%	3%
20 anos	Sistema 1	478.7	96.2	574.9	83%	17%
	Sistema 2	619.4	16.7	636.1	97%	3%
23 anos	Sistema 1	550.5	190.5	741.0	74%	26%
	Sistema2	712.3	33.1	745.5	96%	4%
24 anos	Sistema 1	574.5	190.5	765.0	75%	25%
	Sistema 2	743.3	33.1	776.5	96%	4%
25 anos	Sistema 1	598.4	190.5	788.9	76%	24%
	Sistema 2	774.3	33.1	807.4	96%	4%
30 anos	Sistema 1	718.1	190.5	908.6	79%	21%
	Sistema 2	929.1	33.1	962.3	97%	3%
36 anos	Sistema 1	861.7	192.1	1053.8	82%	18%
	Sistema 2	1115.0	33.1	1148.1	97%	3%
44 anos	Sistema 1	1053.2	192.1	1245.3	85%	15%
	Sistema 2	1362.8	49.6	1412.3	96%	4%
45 anos	Sistema 1	1077.1	286.4	1363.5	79%	21%
	Sistema2	1393.7	49.6	1443.3	97%	3%
46 anos	Sistema 1	1101.0	286.4	1387.5	79%	21%
	Sistema 2	1424.7	49.6	1474.3	97%	3%
47 anos	Sistema 1	1125.0	286.4	1411.4	80%	20%
	Sistema2	1455.7	49.6	1505.2	97%	3%
100 anos	Sistema 1	2393.6	476.6	2870.2	83%	17%
	Sistema 2	3097.2	82.4	3179.6	97%	3%