



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida de Refrigerantes Sintéticos e
Naturais em Aplicações Industriais de Refrigeração**

Autor:

NHACUTOVE, José António

Supervisor:

Prof. Dr. Eng^o. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Agosto de 2025



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida de Refrigerantes Sintéticos e
Naturais em Aplicações Industriais de Refrigeração**

Autor:

NHACUTOVE, José António

Supervisor:

Prof. Dr. Eng°. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Agosto de 2025



Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida de Refrigerantes Sintéticos
e Naturais em Aplicações Industriais de Refrigeração.

Nhacutove, José António



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

Termo de Entrega de Relatório do Trabalho de Licenciatura

Declaro que o estudante, **Nhacutove, José António** entregou no dia ____ de Agosto de 2025 as ____ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____ intitulado: **Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida de Refrigerantes Sintéticos e Naturais em Aplicações Industriais de Refrigeração.**

Maputo, ____ de Agosto de 2025

O/A chefe de Secretaria

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus Pais, António José Nhacutove e Marta Ezequiel Zibia pela confiança e o apoio desde o início da jornada estudantil, e em especial a Professora Angelina, por me encaminhar na direcção certa.

Agradecimentos

Ao meu pai, António José Nhacutove, que de todas formas apostou na minha educação, e pelos esforços que não poderei retribuir.

A minha Mãe, Marta Ezequiel Zibia, pela paciência e o empenho em mostrar a beleza do estudar, juntamente com a Professora Angelina, a segunda Mãe.

Aos meus irmãos, Telma, Tony, Hélio, Ezequiel, Mano João, Mana Dinha e Mana Amelia, e amigos, Carnélio Sitoé e Clésio Mucavel, pelo seu companheirismo e confiança. A Dra. Ana Mangana, pela força nos momentos de aflição.

Aos meus colegas e amigos que a Faculdade me deu José Gui, Edilson Marvin, Talvar Vinho, Regano Gonçalves, Xavier Matosse estes que foram os companheiros nesta jornada. Os amigos de jornada no desenvolvimento do trabalho, Candito Chaves, Tiago Cossa, Shaad Muteto, Ednaldo Tembe, Jorge Durão, Priscila Polaze, meu muito obrigado

Ao Professor Dr. Jorge Nhambiu (Professor Associado), que sempre se mostrou pronto para apoiar os estudantes, como sendo sua paixão ensinar e não fez diferente, auxiliou o desenvolvimento deste trabalho, acompanhando desde o primeiro dia, e prestando apoio em momentos de dificuldades.

Aos meus irmãos que de uma ou de outra forma ajudaram a descontraír nos momentos de tensão.

Declaração de honra

Eu, **Nhacutove, José António**, declaro por minha honra que a presente tese é exclusivamente de minha autoria, não constituindo cópia de nenhum trabalho realizado anteriormente e as fontes usadas para a realização do trabalho encontram-se referidas na bibliografia.

Nhacutove, José António

Resumo

O aumento das preocupações ambientais e a exigência por soluções industriais mais sustentáveis têm incentivado a busca por alternativas tecnológicas que reduzam os impactos ecológicos. No domínio da refrigeração industrial, responsável por uma parte considerável do consumo energético e da emissão de gases com efeito de estufa (GEE), a selecção do fluido refrigerante constitui um factor determinante para a mitigação dos impactos ambientais. Neste contexto, o presente estudo tem por objectivo realizar uma avaliação comparativa do ciclo de vida (ACV) entre dois tipos de refrigerantes largamente utilizados em aplicações industriais: o sintético Hidrofluorolefina (HFO) R1233zd(E) e o natural R717 (Amónia). A metodologia adoptada baseia-se nas normas ISO 14040 e 14044, que orientam a análise desde a extracção das matérias-primas até à fase de utilização e deposição final.

A avaliação foi realizada com recurso ao *Software* SimaPro, que permitiu modelar os inventários e calcular os impactos ambientais em categorias como potencial de aquecimento global (GWP), destruição da camada de ozono (ODP), toxicidade humana, acidificação, eutrofização e consumo energético cumulativo. Os resultados indicam que o R717, apesar de apresentar elevada eficiência energética e baixo GWP, revela impactos significativos na fase de produção, especialmente em termos de toxicidade e energia necessária. Por sua vez, o R1233zd(E) demonstra menor toxicidade e maior segurança operacional, mas associa-se a impactos mais significativos nas emissões de GEE ao longo do ciclo de vida.

Com base nos resultados, conclui-se que uma escolha ambientalmente consciente de refrigerantes deve considerar o desempenho global em todas as fases do ciclo de vida, indo além da análise puramente operacional. Este trabalho visa, assim, fornecer fundamentos técnicos e ambientais que apoiem decisões mais sustentáveis no sector da refrigeração industrial, promovendo uma maior integração dos princípios da sustentabilidade e da eficiência energética.

Palavras-chaves: **Refrigerantes, Sustentabilidade, Eficiência, Ciclo de Vida.**

Abstract

The growing environmental concerns and the increasing demand for sustainable industrial practices have driven the development of technological alternatives aimed at reducing ecological impacts. In the industrial refrigeration sector, which accounts for a considerable portion of global energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions, the selection of the refrigerant is a key factor in minimizing environmental burdens. This study presents a comparative Life Cycle Assessment (LCA) of two commonly used refrigerants in industrial applications the Synthetic Hydrofluoroolefin (HFO) R1233zd(E) and the natural refrigerant R717 (Ammonia). The assessment follows the ISO 14040 and ISO 14044 standards, encompassing all stages from raw material extraction to use and final disposal.

The LCA was conducted using SimaPro Software, which enabled detailed inventory modelling and the quantification of environmental impacts across various categories, including Global Warming Potential (GWP), Ozone Depletion Potential (ODP), human toxicity, acidification, eutrophication, and cumulative energy demand. The results show that R717, despite its high energy efficiency and low GWP, presents notable impacts during the production phase, particularly in terms of toxicity and energy use. Conversely R1233zd(E) demonstrates lower toxicity and greater operational safety, but is associated with higher GHG emissions over its life cycle.

The findings underscore the importance of evaluating refrigerants based on their overall life cycle performance, rather than solely on operational efficiency. This study aims to provide technical and environmental insights to support more sustainable decision-making in the industrial refrigeration sector, fostering the integration of energy efficiency and sustainability principles.

Keywords: Refrigerants, Sustainability, Efficiency, Life Cycle.

Índice Geral

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Declaração de honra	iii
Resumo	iv
Abstract	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objectivo Geral.....	2
1.3 Objectivos Específicos;	2
1.4 Estrutura do trabalho	2
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1 Evolução da Refrigeração (Fluídos Refrigerantes).....	5
2.1.1 Primeira Geração: Qualquer Fluido (1830-1930)	5
2.1.2 Segunda Geração: Segurança e Durabilidade (1931-1990)	6
2.1.3 Terceira Geração: Camada de Ozónio (1990-2010)	7
2.1.4 Quarta Geração: Efeito Estufa (2010 -...)	8
2.2 Principais Gases de Efeito estufa.....	10
2.3 Conferências Internacionais	10
2.4 Refrigerantes e suas Propriedades	11
2.5 Análise do Ciclo de Vida	13
2.5.1 Definição e Normas (ISO 14040/44)	13
2.6 Impactos ambientais	13
2.7 Critérios tradicionais de selecção de Fluídos Refrigerantes.....	14
2.7.1 Critérios Técnicos	15
2.7.2 Critérios de Segurança	15
2.7.3 Critérios Económicos	15
i) Custo e disponibilidade do fluido; ii) Manutenção e infra-estrutura existente.....	15

2.8	Limitações dos Critérios Convencionais.....	15
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	Seleccção de fluídos refrigerantes com base em métodos convencionais (Ambientais, Normativos e Energéticos).....	17
3.1.1	Refrigerante R1233zd(E)	17
3.1.2	Refrigerante R717	18
3.1.3	Ciclo de vida dos refrigerantes.....	19
3.1.4	Análise da Eficiência dos Refrigerantes R1233zd(E) e R717	19
3.2	Procedimento de análise	20
3.2.1	Modelagem Computacional para geração de Dados em VisualStudioCode (VSCode).....	21
3.2.2	Ambiente de Desenvolvimento: VisualStudioCode	21
3.2.3	Integração com o SimaPro.....	22
3.3	Modelagem do Ciclo de Vida no SimaPro	23
3.3.1	Conceitos Fundamentais da ACV no SimaPro	23
3.3.2	Etapas da Modelagem no SimaPro.....	26
3.3.2.1	Extracção de Matérias-primas	26
3.3.2.2	Processamento e Produção dos Refrigerantes.....	26
3.3.2.3	Uso: Operacional	27
3.3.2.4	Fim de Vida	27
3.3.3	Avaliação de Impacto Ambiental	27
3.3.4	Categorias de impacto para a ACV	27
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
4.1	Análise do Desempenho Termodinâmico	33
4.2	Análise de Impacto Ambiental (ACV)	34
4.3	Extracção de Matérias-primas.....	34
4.4	Processamento e Produção	36
4.5	Uso Operacional dos Refrigerantes	41

4.6	Fim de Vida (Descarte)	45
4.7	Comparação das etapas	49
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	52
5.1	Conclusões	52
5.2	Recomendações	52
6.	REFERÊNCIAS.....	55
	Apêndices.....	Ap
	Anexos.....	a

Lista de abreviaturas

ACV: Avaliação do Ciclo de Vida;

CH4: Metano;

CO2: Dióxido de Carbono;

COP: Coeficiente de Performance;

GEE: Gases de Efeito Estufa;

GWP: (Do Inglês: Global Warming Potencial = Potencial de Aquecimento Global);

HC: Hidrocarbonetos;

HFC: Hidrofluorocarbonetos;

HFO: Hidrofluorolefinas;

ISO: (Do Inglês: International Standardization Organization = Organização Internacional de Normalização);

LBP: (Do Inglês: Low Back Pressure = Pressão Baixa de Retorno);

MBP: (Do Inglês: Medium Back Pressure = Pressão Média de Retorno);

NH3: Amônia;

NOx: Óxidos Nitrosos;

ODP: (Do Inglês: Ozone Depletion Potencial = Potencial de Depleção de Ozônio);

ODSs: Objectivos de Desenvolvimento Sustentável;

VSCoDe: VisualStudioCode;

Índice de Figuras

Figura 1-Vaso grego para resfriamento de vinho. [Adaptado de (Gosney, 1982)]	5
Figura 2- Efeito estufa. A direita o Efeito estufa agravado pela acção do ser humano e à esquerda a representação do Efeito estufa natural, importante para o equilíbrio térmico da Terra [https://www.todamateria.com.br/efeito-estufa/ , 25/05/2025, 10h41PM].....	9
Figura 3-Contribuição dos principais gases de efeito estufa. Fonte: Adaptado de (World Meteorological Organization, 2022)	10
Figura 4-Vista geral do SimaPro.....	24
Figura 5-Gráfico do COP em função da T _{ev} ;	33
Figura 6 - Gráfico comparativo de impactos ambientais na extracção de matérias-primas.....	35
Figura 7- Gráfico comparativo dos impactos ambientais na fase de Processamento e Produção de refrigerantes	38
Figura 8-Gráfico comparativo dos impactos ambientais na utilização de refrigerantes R717 e R1233zd(E)	42
Figura 9-Gráfico comparativo dos impactos ambientais no Descarte dos refrigerantes R717 e R1233zd(E).....	46
Figura 10-Gráfico comparativo do ciclo de vida do refrigerante	49

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O desenvolvimento sustentável e a mitigação dos impactos ambientais têm impulsionado a busca por soluções técnicas mais eficientes e ambientalmente responsáveis em diversas áreas da engenharia. Dentre os sistemas com significativa contribuição para o consumo energético global e emissão de gases de efeito estufa (GEE), os sistemas de refrigeração ocupam lugar de destaque, devido à crescente demanda por climatização e conservação térmica em ambientes industriais, comerciais e residenciais.

A selecção criteriosa de fluídos refrigerantes passou a ser uma prioridade técnica e regulatória após a implementação de acordos internacionais, como o Protocolo de Montreal (1987) e sua Emenda de Kigali (2016), que estabeleceram directrizes para a eliminação progressiva de substâncias com alto potencial de destruição da camada de ozónio (ODP) e elevado potencial de aquecimento global (GWP). Neste contexto, surgem os refrigerantes de quarta geração, como o R1233zd(E), R1234yf, classificados como Hidrofluorolefinas (HFOs), desenvolvidos com foco na redução de emissões. Por

outro lado, os refrigerantes naturais, como a Amónia (NH₃), Propano e Dióxido de Carbono (CO₂), destacam-se por sua eficiência energética elevada e impacto ambiental reduzido.

Dada a diversidade de opções e seus respectivos compromissos técnicos e ambientais, torna-se necessário adoptar abordagens sistemáticas para avaliar o ciclo de vida completo de cada substância. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme normatizada pela ISO 14040 e 14044, oferece uma metodologia robusta para quantificar os impactos ambientais ao longo de todas as fases da existência de um produto, desde a extracção de matérias-primas até sua destinação final. O uso de ferramentas como o software SimaPro, aliado à modelagem computacional via Python, permite maior precisão na análise dos impactos, bem como simulações realistas das condições operacionais dos sistemas de refrigeração.

Este trabalho propõe a análise comparativa dos refrigerantes usados em instalações industriais de refrigeração, sendo um Sintético (HFO) e um Natural, integrando simulações computacionais com modelagem de ciclo de vida, com o objectivo de fornecer subsídios técnicos e ambientais para a escolha mais adequada em sistemas industriais de refrigeração.

1.2 Objectivo Geral

- Avaliar comparativamente do ciclo de vida de refrigerantes sintéticos e naturais, usados em aplicações industriais de refrigeração;

1.3 Objectivos Específicos;

- Seleccionar refrigerantes com potencial de uso industrial com base em critérios normativos, energéticos e ambientais
- Modelar o ciclo de vida completo dos refrigerantes seleccionados por meio do software SimaPro, integrando dados de inventário;
- Comparar quantitativamente os impactos ambientais por categoria de impacto do ciclo de vida
- Interpretar de forma crítica e comparativa os impactos ambientais nas principais etapas do ciclo de vida.

1.4 Estrutura do trabalho

- Esta Tese de Licenciatura é constituída por 5 capítulos incluindo o capítulo introdutório.
- **Capítulo 2-Estado da Arte:** Este capítulo apresenta os fundamentos do ciclo de compressão de vapor, abordando a evolução dos fluidos refrigerantes desde o uso de substâncias naturais, como a Amónia, até os compostos sintéticos, como os CFCs, HCFCs e HFCs. Destaca-se a preocupação ambiental crescente com os efeitos negativos desses fluidos, como a destruição da camada de ozónio e o aquecimento global, o que levou à criação de regulamentações internacionais, como o Protocolo de Montreal e as emendas de Kigali. Em resposta, surgiram novas alternativas como os HFOs, com menor impacto ambiental. O capítulo também introduz a Análise do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas ISO 14040 e 14044, como ferramenta para avaliar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos refrigerantes. Por fim, apresenta-se o software SimaPro, utilizado para modelar e quantificar esses impactos, fornecendo a base metodológica para a comparação entre o R717 e o R1233zd(E).
- **Capítulo 3: Materiais e Métodos:** Neste capítulo, são descritos detalhadamente os procedimentos metodológicos adoptados para a condução da pesquisa. Inicia com a selecção dos refrigerantes a serem comparados, baseada em critérios normativos, ambientais e energéticos. Define-se a unidade funcional, elemento central da ACV, que neste estudo corresponde ao desempenho equivalente de 1 kg de refrigerante em um sistema de refrigeração. Também são estabelecidas as fronteiras do sistema, que delimitam as etapas do ciclo de vida incluídas na análise (extracção de matérias-primas, produção, uso e descarte). Segue-se com a colecta de dados do inventário, abrangendo informações técnicas, energéticas e ambientais obtidas de bases confiáveis, literatura especializada e bancos de dados do SimaPro. O capítulo detalha ainda o método de avaliação de impacto ambiental, adoptando metodologias reconhecidas como ReCiPe ou CML. Por fim, descreve-se o processo de modelagem computacional, que integra duas ferramentas: o VisualStudioCode com linguagem *Python*, utilizado para simular parâmetros termodinâmicos e de eficiência energética, e o SimaPro, aplicado à modelagem dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos refrigerantes;
- **Capítulo 4: Resultados e Discussão:** Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos a partir das simulações computacionais, tanto em Python (via VisualStudioCode) quanto no SimaPro. Os resultados são organizados conforme

categorias de impacto ambiental (como emissões de gases de efeito estufa, ecotoxicidade, uso de recursos, etc.) e etapas do ciclo de vida (produção, transporte, uso e descarte). A análise permite comparar de forma clara e objectiva os refrigerantes R717 e R1233zd(E) em termos de eficiência energética e desempenho ambiental, possibilitando a identificação de quais fases do ciclo de vida representam maior contribuição negativa. A discussão é conduzida de forma crítica, integrando os dados obtidos com reflexões baseadas na literatura técnica e científica. Além disso, são consideradas variáveis operacionais e contextuais que podem influenciar na escolha do refrigerante mais adequado sob os critérios da sustentabilidade.

- **Capítulo 5: Conclusões e Recomendações:** resume os principais achados do estudo, apresentando uma síntese das comparações entre os refrigerantes analisados. Retoma os objectivos propostos e mostra como foram atingidos, especialmente em relação à identificação do refrigerante com menor impacto ambiental, considerando todo o ciclo de vida. Também são discutidas as implicações práticas dos resultados para a indústria de refrigeração e para a tomada de decisões mais sustentáveis no sector. Com base nas análises desenvolvidas, o capítulo oferece recomendações fundamentadas sobre a escolha e o uso de refrigerantes, bem como sugestões de melhorias tecnológicas e operacionais. Por fim, são apontadas limitações da pesquisa, como restrições de dados e simplificações na modelagem, e indicados caminhos para estudos futuros, incluindo o aprofundamento em análises económicas e sociais complementares à ACV ambiental.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Evolução da Refrigeração (Fluídos Refrigerantes)

Antes de analisar o futuro da área de refrigeração, convém voltar um pouco ao passado.

Antigamente o frio era produzido principalmente a partir da utilização de gelo ou neve, transportado de regiões mais frias. Outra possibilidade consistia no armazenamento de gelo obtido no Inverno para uso no Verão. Em alguns locais, era também possível obter gelo durante noites frias para uso durante o dia (Gosney, 1982). A Figura 1, por exemplo, mostra um vaso grego do século VI a.c. utilizado para resfriamento de vinho, encontrado na cidade de Vulci - Itália. Pode-se perceber que existem dois compartimentos, o interior onde era colocado o vinho e o exterior onde era colocado gelo ou neve.

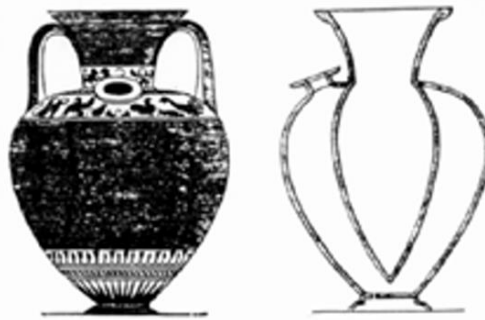


Figura 1-Vaso grego para resfriamento de vinho. [Adaptado de (Gosney, 1982)]

A comercialização de gelo em escala comercial deve-se a Frederic Tudor que, em 1806, iniciou a venda de gelo extraído do rio Hudson, nos Estados Unidos. Um dos principais problemas daquela época era a inexistência de isolantes térmicos de qualidade o que gerava perdas consideráveis e exigia que os depósitos fossem construídos com paredes de espessura da ordem de um metro.

2.1.1 Primeira Geração: Qualquer Fluido (1830-1930)

Durante os séculos XVIII e XIX, muitas pesquisas na área de refrigeração foram realizadas na Europa, especialmente na França e na Inglaterra. Em 1755, Willian Cullen (1710-1790), professor da Universidade de Edimburgo, obteve gelo a partir da evaporação do éter. O processo de produção de frio era, entretanto, descontínuo e não foi usado para qualquer propósito prático.

A primeira descrição completa de um equipamento de refrigeração, operando de maneira cíclica e utilizando éter como fluido refrigerante, foi feita por Jacob Perkins (1766-1849), em 1834. O trabalho de Perkins despertou pouco interesse e permaneceu esquecido por aproximadamente 50 anos, até que Bramwell o descreveu num artigo publicado no *Journal of the Royal Society of Arts*. O principal responsável por tornar o princípio de refrigeração por compressão mecânica em um equipamento real foi James Harrison (1816-1893). Não se sabe se Harrison conhecia ou não o trabalho de Perkins, mas em 1856 e em 1857 ele obteve, respectivamente, as patentes britânicas 747 e 2362. Em 1862, durante uma exibição internacional em Londres, o equipamento de Harrison, fabricado por Daniel Siebe e utilizando éter como fluido refrigerante, foi apresentado à sociedade da época.

No início do século XX, os refrigeradores domésticos consistiam essencialmente de uma caixa, construída de madeira e isolada termicamente, onde eram colocados blocos de gelo. Tal sistema apresentava as seguintes desvantagens: i) necessidade de reposição do gelo, ii) necessidade de drenagem e iii) taxa de resfriamento variável. A disponibilidade de unidades seladas de refrigeração logo se tornou uma realidade. Entretanto, todos os refrigerantes conhecidos, por volta de 1928, eram tóxicos, inflamáveis ou ambos. Devido ao elevado número de acidentes, alguns até fatais, jornais, como o *The New York Times*, faziam campanha para eliminar os refrigeradores domésticos que até então utilizavam o dióxido de enxofre (SO₂) como fluido refrigerante.

2.1.2 Segunda Geração: Segurança e Durabilidade (1931-1990)

Em 1928, a Frigidaire encarregou um grupo de cientistas, liderados por Thomas Midgley, a identificar um refrigerante que não fosse tóxico nem inflamável. Em menos de duas semanas, a família dos hidrocarbonetos halogenados, ou Cloro Flúor Carbonos (CFCs), forneceu a solução para o problema. Após dois anos de testes, os CFCs foram apresentados ao público num encontro da Sociedade Americana de Química (Midgley and Henne, 1930). A produção comercial de CFC-12 (CCl₂F₂) iniciou em 1931 e a do CFC-11 (CCl₃F) em 1932.

Durante aproximadamente 70 anos, o CFC-12, como refrigerante, e o CFC-11, como agente expensor de espuma, reinaram absolutos nos segmentos de refrigeração doméstica e comercial leve. O reinado desses fluídos começou a declinar em 1974,

quando o Prof. Sherwood Rowland e o Dr. Mário Molina, associaram os CFCs à redução da camada de ozônio da estratosfera (Molina and Rowland, 1974). A teoria de Rowland e Molina foi comprovada em 1985, com a descoberta de um buraco na camada de ozônio sobre a Antártida e contemplada com o prêmio Nobel de química em 1995.

2.1.3 Terceira Geração: Camada de Ozônio (1990-2010)

Como consequência do Protocolo de Montreal (1987), a maioria das aplicações domésticas e comerciais leves (MBP - *Medium Back Pressure*) passou a adoptar o HFC-134a como refrigerante e o HCFC-141b como agente expensor de espuma. As aplicações comerciais leves (LBP - *Low Back Pressure*), que até então utilizavam o HCFC22 ou o R502, passaram a fazer uso do R404a, uma mistura zeotrópica dos seguintes refrigerantes: (44% HCFC-125 + 52% HCFC-143a + 4% HFC-134a). Além de boas propriedades químicas e termodinâmicas, os HFCs não são tóxicos ou inflamáveis.

O reinado absoluto do HFC-134a/HFC-141b foi relativamente curto, pois logo se percebeu que tais substâncias, apesar de terem um efeito mínimo sobre a camada de ozônio, possuem um efeito marcante sobre o efeito estufa. A pressão pela utilização de fluídos refrigerantes naturais foi imediata. O HFC-134a passou a ser substituído pelo isobutano (HC-600a) no sector de refrigeração doméstica e pelo propano (HC-290) e dióxido de carbono (CO₂ /R744) no sector de refrigeração comercial leve. O HFC-141b foi rapidamente substituído pelo ciclo pentano, na maioria das aplicações domésticas e comerciais leves.

O desempenho obtido é também bastante similar ao obtido com CFCs, HCFCs ou HFCs. A baixa pressão de vapor do HC 600a origina menores níveis de ruído, o que o torna atraente para refrigeradores domésticos. Além disso, devido ao seu baixo efeito refrigerante volumico (capacidade volumétrica), o HC-600a exige compressores de maior deslocamento volumétrico para uma mesma capacidade de refrigeração, os quais são geralmente mais eficientes. A desvantagem do uso de HCs é hoje a mesma de 80 anos atrás pois, embora sejam pouco tóxicos, tais fluídos são inflamáveis e explosivos. É essencial, portanto, que a carga de refrigerante seja reduzida para minimizar os riscos envolvidos (Palm, 2008).

2.1.4 Quarta Geração: Efeito Estufa (2010 -...)

Os países desenvolvidos eliminaram os CFCs em 1996, enquanto os países em desenvolvimento (consumo < 300g/ano/pessoa) deviam eliminá-los até 2010. A eliminação dos HCFCs está em andamento, com um *phase-out* gradual até 2020 e 2040, respectivamente para os países desenvolvidos e em desenvolvimento. Alguns países criaram legislações próprias para acelerar o *phase-out* dos HCFCs. Na união europeia, por exemplo, os HCFCs estão proibidos em todos os novos sistemas desde o início de 2004, e os compostos químicos à base de flúor (F-Gases), entre os quais os HFCs, com Potencial de Aquecimento Global (GWP = *Global Warming Pontencial*) GWPs100 superiores a 150, estão proibidos para uso em sistemas de ar-condicionado automotivos a partir de 2011 (Calm, 2008).

Como os HFC's fazem parte das substâncias controladas pelo Protocolo de Quioto (1997) é de se esperar que tais refrigerantes desapareçam gradualmente do mercado, abrindo oportunidades para outros fluídos.

O **efeito estufa** é um processo natural essencial à manutenção da temperatura média da Terra, pois ocorre devido à concentração de certos gases na atmosfera que formam uma camada semipermeável: ela permite a entrada da radiação solar e retém parte da radiação infravermelha reflectida pela superfície terrestre. Essa retenção de calor garante condições adequadas para a existência da vida. Contudo, as actividades antrópicas têm intensificado esse fenómeno, principalmente pela emissão de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrogénio (NO_x), ozónio troposférico (O₃) e os gases fluorados, como os Hidrofluorocarbonetos (HFCs) utilizados em sistemas de refrigeração. O aumento da concentração desses compostos na atmosfera tem agravado o aquecimento global e contribuído significativamente para as alterações climáticas.

A emissão de grandes quantidades de gases para a atmosfera, nomeadamente o dióxido de carbono, pode ter consequências desastrosas. Nos últimos anos, têm-se registado algumas mudanças do clima e isto tem sido objecto de muitos debates científicos e políticos, em particular, o Efeito estufa. O Dióxido de Carbono acumulado na atmosfera funciona como o telhado de uma estufa, isto é, deixa passar os raios solares para a Terra, onde estes se transformam em energia térmica e impedem que ela volte novamente para o espaço.

Este "telhado" reflecte a energia para a Terra, provocando aquecimento. A este processo natural é que se atribui a designação de Efeito estufa. Por outro lado, o Efeito estufa é um conceito para designar a taxa da temperatura global que é provocada pelo aumento de poluentes gasosos, principalmente o Dióxido de Carbono. Os gases poluentes absorvem as quentes radiações infravermelhas, impedindo a sua libertação para o espaço durante a noite.

O Efeito estufa é idêntico ao que acontece num carro estacionado ao sol com os vidros fechados. A energia radiante do sol aquece o interior do carro e os vidros impedem a sua saída para o exterior. O carro aquece cada vez mais e diz-se que ocorreu o Efeito estufa. O Efeito estufa tem-se agravado, isto é, deixou de ser um processo natural devido aos níveis de Dióxido de Carbono e de outros gases (metano é um exemplo) que têm vindo a aumentar na atmosfera, captando cada vez mais calor e fazendo com que as temperaturas aumentem. Este fenómeno é conhecido por aquecimento global.

A superfície e a atmosfera da Terra são mantidas aquecidas quase exclusivamente pela energia do sol, que é irradiada na forma de luz de vários tipos. (Baird & Cann, 2011)



Figura 2- Efeito estufa. A direita o Efeito estufa agravado pela acção do ser humano e à esquerda a representação do Efeito estufa natural, importante para o equilíbrio térmico da Terra [<https://www.todamateria.com.br/efeito-estufa/>, 25/05/2025, 10h41PM]

2.2 Principais Gases de Efeito estufa

Os gases internacionalmente reconhecidos como gases de efeito estufa, regulados pelo Protocolo de Quioto, são: Dióxido de Carbono (CO₂); Metano (CH₄); Óxido Nitroso (NO₂); Hexafluoreto de Enxofre (SF₆); e duas famílias de gases, Hidrofluorcarbonetos (HFC) e Perfluorocarbonetos (PFC). Dentre eles, o Dióxido de Carbono é o mais importante, devido a sua influência no aquecimento global, pelo facto de não “degradar-se” quimicamente como os outros gases, é removido por processos naturais (oceanos, florestas), o que leva muitos anos (~20% do dióxido de carbono emitido hoje permanecerá na atmosfera por mais de 1000 anos), e apesar de seu Potencial de Aquecimento Global (GWP=1) ser inferior ao de gases como CH₄ e N₂O, o CO₂ representa cerca de 66% das emissões globais equivalentes de CO₂, sendo assim o maior contribuinte isolado ao aquecimento, seguido do metano e depois pelo azoto (Cambridge University Press, 2023).

O diagrama abaixo mostra a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, que tem causados graves problemas;

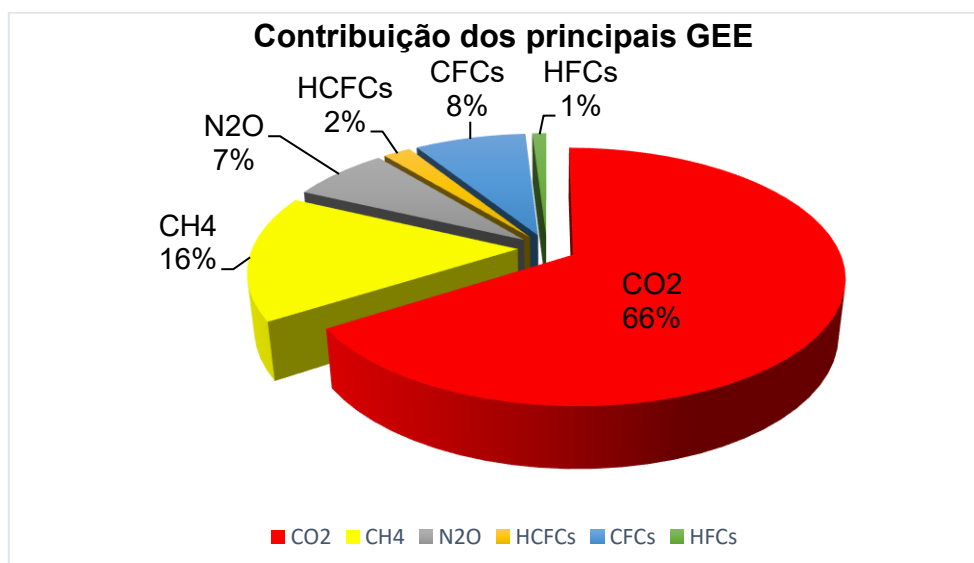


Figura 3-Contribuição dos principais gases de efeito estufa. Fonte: Adaptado de (*World Meteorological Organization, 2022*)

2.3 Conferências Internacionais

A preocupação com respeito ao uso de fluídos refrigerantes nocivos ao meio ambiente, assim como a vida na terra resultaram em diversas conferencias, a saber:

- **Convenção de Viena para a Protecção da Camada de Ozono (1985):**

Estabelecer o quadro geral de cooperação científica e técnica para proteger a camada de ozônio, sem obrigações de redução imediata de matéria, e servir de base legal e institucional para o Protocolo de Montreal.

- **Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozono (1987):** *Fase-out* obrigatório de refrigerantes e solventes clorados (CFCs, *halons*). Marco que impôs cronogramas de eliminação de 96 substâncias ozono-depletoras;

Principais Emendas ao Protocolo de Montreal:

- **Emenda de Londres (1990):** Inclusão de carboneto de metila (meti clorofórmio) e aceleração da eliminação progressiva de vários CFCs e *halons*
- **Emenda de Copenhague (1992):** Primeira inclusão de HCFCs, adição adicional de CFCs e controle de brometo de metila.
- **Emenda de Montreal (1997):** Ajustes finos em cronogramas e inclusão de novas substâncias;
- **Emenda de Kioto (Pequim) (1999):** Expansão de controle para mais Halo carbonetos específicos
- **Emenda de Kigali (2016):** *Fase-down* de HFCs (gases usados como substitutos, mas com alto GWP). Entrou em vigor em 1 de Janeiro de 2019.

2.4 Refrigerantes e suas Propriedades

Os fluídos refrigerantes desempenham um papel essencial em sistemas de refrigeração e climatização, sendo responsáveis pela transferência de calor entre diferentes meios. Nas últimas décadas, devido às crescentes preocupações ambientais com o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio, a escolha e o desenvolvimento de refrigerantes têm sido orientados por critérios de sustentabilidade, segurança e eficiência. Nesse contexto, destacam-se dois grupos principais de interesse: os refrigerantes naturais e os Hidrofluorolefinas (HFOs) (Gosney, 1982; Baird & Cann, 2011).

Os refrigerantes naturais são substâncias que existem naturalmente no meio ambiente e incluem compostos como Amônia (NH₃ ou R717), dióxido de carbono (CO₂ ou R744),

hidrocarbonetos como propano (R290) e isobutano (R600a), além da água (R718) e do ar. Tais substâncias possuem Potencial de Aquecimento Global (GWP) praticamente nulo e Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) igual a zero. Além disso, apresentam elevada eficiência energética, o que os torna altamente atractivos do ponto de vista ambiental e económico. No entanto, possuem certas limitações técnicas e de segurança: a Amónia é tóxica, os hidrocarbonetos são inflamáveis, e o CO₂ opera sob altas pressões. A utilização desses fluídos não é recente; Amónia e CO₂, por exemplo, já eram empregados em sistemas de refrigeração desde meados do século XIX e início do século XX (Gosney, 1982; Stoecker & Jones, 1985).

Em termos de aplicação, os refrigerantes naturais são amplamente utilizados em sectores como a indústria alimentícia, armazéns frigoríficos, supermercados, bombas de calor, transporte refrigerado e sistemas domésticos. A Amónia, por exemplo, é amplamente empregada em grandes sistemas industriais; o CO₂ é cada vez mais utilizado em supermercados e transporte refrigerado; enquanto os hidrocarbonetos são comuns em refrigeradores domésticos e comerciais de pequeno porte (Dossat & Horan, 2002)

Já os HFOs (Hidrofluorolefinas) são refrigerantes sintéticos da quarta geração, desenvolvidos para substituir os HFCs (Hidrofluorocarbonetos), que possuem alto GWP. Os HFOs são caracterizados por conterem ligações duplas carbono-carbono (olefinas), o que os torna mais reactivos na atmosfera e, conseqüentemente, com menor tempo de vida atmosférica e GWP significativamente reduzido. Exemplos incluem o R1234yf, utilizado principalmente em sistemas de ar-condicionado automotivo; o R1234ze(E), aplicado em Chillers e espumas isolantes; e o R1233zd(E), com uso crescente em refrigeração e climatização industrial. Esses refrigerantes começaram a ser introduzidos no mercado a partir de 2008, como parte de uma resposta tecnológica às exigências ambientais globais (Stoecker & Jones, 1985; McQuiston, Parker, & D. Spitler, 2005).

As principais vantagens dos HFOs incluem a baixa inflamabilidade (classe A2L em alguns casos), a semelhança nas propriedades termodinâmicas com os HFCs, e a compatibilidade com equipamentos existentes, o que facilita a transição tecnológica. No entanto, seu custo elevado e a disponibilidade ainda limitada em muitos mercados representam obstáculos para uma adopção em larga escala (Dossat & Horan, 2002).

As tendências actuais no sector indicam uma clara movimentação rumo a soluções de baixo impacto ambiental. A Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal, adoptada em 2016, estabeleceu metas globais para a redução progressiva do uso de HFCs, promovendo alternativas como os refrigerantes naturais e os HFOs. Países europeus, asiáticos e africanos têm adoptado (Gosney, 1982) regulamentações mais rígidas e incentivado o uso de substâncias com baixo GWP. Paralelamente, observa-se um avanço tecnológico significativo no desenvolvimento de sistemas compatíveis com refrigerantes mais seguros, eficientes e ambientalmente responsáveis (Baird & Cann, 2011) (L, 2022)

2.5 Análise do Ciclo de Vida

2.5.1 Definição e Normas (ISO 14040/44)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica desenvolvida para mensuração dos possíveis impactos ambientais causados como resultado da fabricação e utilização de determinado produto ou serviço. A abordagem sistémica da ACV é conhecida como do “berço ao túmulo”, na qual são levantados os dados em todas as fases do ciclo de vida do produto. O ciclo de vida se refere a todas as etapas de produção e uso do produto, relativas à extracção das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso quando for o caso (ISO14040, 2006).

A série de normas ISO 14040 determinam a estrutura, os princípios, os requisitos e as directrizes que devem constar em um estudo ACV. Este se caracteriza pelo alto grau de interacção entre suas quatro grandes fases: definição de objectivo e escopo, a análise de inventários, avaliação de impactos e interpretação (ISO14040, 2006).

Série de Normas ISO para ACV

ISO 14040 – Princípios gerais (2006)

ISO 14044 – Requerimentos e directrizes (2006)

2.6 Impactos ambientais

Embora os fluídos refrigerantes desempenhem um papel essencial em sistemas de climatização e refrigeração ao longo do último século, sua contribuição para a degradação ambiental, sobretudo no que se refere à destruição da camada de ozónio e

ao aquecimento global, tem sido alvo de crescente preocupação internacional. Substâncias como os Clorofluorcarbonetos (CFCs) e os Hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), amplamente utilizados no século XX, demonstraram elevado potencial de destruição da camada de ozónio (ODP), levando à adopção do Protocolo de Montreal em 1987 (UNEP, 2021). Apesar da substituição progressiva desses compostos por Hidrofluorcarbonetos (HFCs), estes últimos apresentaram altos valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP), agravando as emissões de gases de efeito estufa. Com o objectivo de mitigar tais impactos, a Emenda de Kigali, aprovada em 2016, estabeleceu metas de redução gradual dos HFCs, promovendo alternativas ambientalmente mais seguras (Calm, 2008; UNEP, 2021)

Nesse contexto, destaca-se a adopção de refrigerantes de baixo GWP, como os naturais (R717, R744, R290, entre outros) e os Hidrofluorolefinas (HFOs), desenvolvidas recentemente para manter a eficiência energética com reduzido impacto ambiental (McLinden, Brown, Brignoli, & Kazakov, 2017). Os refrigerantes naturais, utilizados desde o século XIX, têm GWP praticamente nulo e vêm ganhando espaço em sistemas industriais e comerciais de grande escala (Palm, 2008). Por outro lado, os HFOs, como o R1234yf e o R1234ze(E), surgiram a partir de 2008 como substitutos directos dos HFCs, apresentando tempos de vida atmosférica reduzidos e propriedades termodinâmicas semelhantes às de seus antecessores (Calm, 2008).

A substituição progressiva de refrigerantes de alto GWP por alternativas mais sustentáveis está directamente relacionada aos compromissos globais com os Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs), em especial o ODS 13, que trata da acção climática.

Essa transição requer não apenas inovações tecnológicas e redesenho de sistemas, mas também políticas públicas, regulamentações técnicas e conscientização dos sectores produtivos. Assim, o controlo e a substituição de fluídos refrigerantes danosos ao meio ambiente representam uma frente estratégica na luta contra a crise climática global.

2.7 Critérios tradicionais de selecção de Fluídos Refrigerantes

Os métodos convencionais de selecção se concentram em características técnicas, económicas e de segurança, conforme detalhado a seguir:

2.7.1 Critérios Técnicos

- **Temperatura e pressão de operação:** O refrigerante deve operar dentro da faixa de temperatura e pressão do ciclo desejado.
- **Capacidade de refrigeração:** A entalpia de vaporização influencia directamente o rendimento do sistema.
- **Eficiência energética (COP):** Impacta o consumo energético e os custos operacionais.
- **Compatibilidade com materiais:** O fluido não deve degradar componentes internos do sistema.
- **Estabilidade térmica e química:** Resistência à decomposição ao longo do tempo.

2.7.2 Critérios de Segurança

- **Toxicidade:** Classificação segundo a ASHRAE (2019) (classe A: baixa toxicidade; B: alta toxicidade). (ASHARE, 2019)
- **Inflamabilidade:** Classificação de risco (1: não inflamável; 2: inflamabilidade baixa; 3: alta).

2.7.3 Critérios Económicos

i) Custo e disponibilidade do fluido; ii) Manutenção e infra-estrutura existente.

2.8 Limitações dos Critérios Convencionais

Embora os métodos tradicionais de selecção de fluídos refrigerantes sejam amplamente utilizados, eles apresentam diversas limitações quando considerados em um contexto de sustentabilidade e de avaliação integrada dos impactos ambientais. A seguir, são detalhadas as principais deficiências desses métodos convencionais:

- **Foco no desempenho operacional imediato:** Os métodos tradicionais priorizam a eficiência energética e o desempenho térmico do fluido em condições de operação ideais, desconsiderando aspectos associados à produção, transporte, descarte e possíveis vazamentos do fluido durante o ciclo de vida do equipamento.

- **Ausência de análise do ciclo de vida:** Não há consideração explícita sobre os impactos ambientais relacionados à extracção de matérias-primas, manufactura, emissões fugitivas e destino final dos fluídos refrigerantes. Isso pode resultar em decisões que aparentemente são eficientes, mas que contribuem para impactos ambientais severos ao longo do tempo.
- **Desconsideração dos impactos indirectos:** Métodos convencionais negligenciam o impacto ambiental do consumo energético durante a vida útil do equipamento. Como a maior parte das emissões ocorre pela geração de electricidade, essa omissão pode comprometer a sustentabilidade do sistema.
- **Inadequação frente a regulamentações ambientais:** Com a implementação de políticas como o Protocolo de Montreal, Emenda de Kigali e os regulamentos europeus F-Gás, fluídos com alto GWP ou ODP estão sendo gradualmente proibidos. Os métodos tradicionais podem levar à escolha de substâncias que não atendem às normas actuais ou futuras.
- **Limitação quanto à inovação tecnológica:** Ao se basear fortemente em parâmetros históricos ou bem conhecidos, esses métodos tendem a desconsiderar opções emergentes, como os Hidrofluorolefinas (HFOs) e refrigerantes naturais, que podem oferecer desempenho comparável com menor impacto ambiental. (Calm, 2008)
- **Ausência de avaliação multicritério:** A selecção tradicional raramente incorpora uma ponderação entre critérios técnicos, económicos, ambientais e sociais, levando a escolhas sub-óptimas em contextos que exigem equilíbrio entre múltiplas exigências de projecto.

Portanto, para uma avaliação mais profunda e alinhada aos princípios de sustentabilidade, torna-se necessário incorporar métodos como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite a identificação e quantificação dos impactos ambientais ao longo de todas as fases da existência do fluido refrigerante (McLinden, Brown, Brignoli, & Kazakov, 2017). Pois, embora eficazes para otimizar desempenho e segurança imediata, os métodos tradicionais negligenciam impactos ambientais de longo prazo, como emissões durante produção, uso e descarte, bem como o consumo de recursos naturais

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Selecção de fluídos refrigerantes com base em métodos convencionais (Ambientais, Normativos e Energéticos)

Os métodos convencionais de selecção de fluídos refrigerantes baseiam-se principalmente em critérios técnicos como pressão e temperatura de operação, eficiência energética (COP), estabilidade química, compatibilidade com materiais, segurança (toxicidade e inflamabilidade) e disponibilidade comercial. Embora esses critérios sejam úteis para uma análise inicial e permitam identificar opções viáveis do ponto de vista técnico, eles apresentam limitações significativas por não considerarem os impactos ambientais associados ao ciclo de vida completo dos refrigerantes, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos e efeitos sobre a saúde humana e os ecossistemas. Dessa forma, tais métodos são insuficientes para uma avaliação holística e sustentável, funcionando apenas como uma etapa preliminar que deve ser complementada por abordagens mais abrangentes, como a Análise do Ciclo de Vida (ACV). A partir dessa abordagem preliminar, dois refrigerantes foram seleccionados por apresentarem características distintas e representarem diferentes abordagens tecnológicas (Apêndices-A).

3.1.1 Refrigerante R1233zd(E)

O refrigerante R1233zd(E) é uma alternativa de baixo potencial de aquecimento global que tem ganhado destaque na indústria de refrigeração, especialmente em aplicações industriais. Com a fórmula química que inclui o elemento Flúor, este refrigerante pertence a família dos Hidrofluorolefinas (HFOs) e foi desenvolvido como uma substituição para refrigerantes com maior impacto ambiental, como o R134a, que está sendo progressivamente banido em várias regiões do mundo devido às suas características negativas sobre o aquecimento global.

O R1233zd(E) apresenta uma combinação atraente de propriedades termodinâmicas e operacionais que o tornam adequado para sistemas de refrigeração e ar-condicionado, com temperaturas de evaporação que podem variar conforme a aplicação. Além disso, sua estabilidade térmica é um factor crítico, visto que permite a utilização desse refrigerante em sistemas de alta temperatura sem comprometer a eficiência do ciclo térmico.

Entre os principais benefícios do R1233zd(E), destaca-se o seu baixo índice de GWP, ou seja, absorve pouca radiação infravermelha e/ou permanece pouco tempo na atmosfera, resultando em menor contribuição para o efeito estufa e o aquecimento global, ($GWP < 1$), além de sua classificação como não tóxico e não inflamável, aumentando a segurança em operações industriais. Os dados disponíveis indicam que, sob condições normais de operação, o R1233zd(E) se bio degrada rapidamente no meio ambiente, o que implica um menor risco de persistência em caso de vazamentos. No entanto, é importante considerar que a aceitação do R1233zd(E) no mercado também depende da adequação às regulamentações locais e da viabilidade económica em comparação com refrigerantes convencionais. Por conseguinte, embora o R1233zd(E) apresente características promissoras, a sua implementação em larga escala requer olhar atento para as barreiras tecnológicas, custos de adaptação e o desenvolvimento de infraestrutura de suporte para garantir um uso eficaz e seguro em ambientes industriais, culminando na necessidade de pesquisa contínua para otimizar suas aplicações e avaliar seu desempenho em sistemas reais.

3.1.2 Refrigerante R717

O refrigerante R717, também conhecido como Amónia, é um refrigerante natural amplamente utilizado em aplicações industriais, especialmente em sistemas de refrigeração de grande escala. Apresenta propriedades favoráveis, como alta eficiência termodinâmica e baixo custo, o que o torna uma opção atractiva para diversas aplicações. A Amónia é classificada como uma substância ambientalmente amigável, uma vez que não possui potencial de destruição da camada de ozónio e possui um baixo potencial de aquecimento global. Entretanto, o R717 é altamente tóxico e corrosivo, exigindo cuidados especiais em sua manipulação e em projectos de segurança na instalação. A Amónia possui um alto ponto de ebulição em comparação com os outros refrigerantes, o que proporciona uma melhor eficiência do ciclo em sistemas de alta temperatura, porém pode tornar-se um desafio em sistemas que operam em condições extremas. Os impactos ambientais positivos associados ao uso do R717, são os aspectos cruciais que tem atraído o interesse em sua utilização, especialmente em um contexto global que valoriza a sustentabilidade. O manejo deste refrigerante deve ser feito com rigoroso cumprimento das normas regulatórias e de segurança.

3.1.3 Ciclo de vida dos refrigerantes

A análise do ciclo de vida (ACV) dos refrigerantes R1233zd(E) e R717, em suas aplicações industriais de refrigeração, envolve uma avaliação abrangente das etapas que compõem o ciclo total de vida desses fluídos, isto é, desde a extracção de matérias-primas até o descarte final “do berço ao tumulto”. Para o R1233zd(E), que pertence a classe dos Hidrofluorados, a ACV inclui a produção do composto, que requer energia significativa e gera emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Durante a utilização deste refrigerante os impactos ambientais são reduzidos em comparação com os refrigerantes tradicionais, pois é considerado um refrigerante com baixo GWP. Em contrapartida, o R717, é amplamente reconhecido por suas propriedades refrigerantes eficientes e por ser um refrigerante mais natural com um impacto ambiental geralmente baixo, entretanto sua toxicidade e o potencial risco para a saúde humana devem ser rigorosamente considerados ao longo de sua ACV. A fase de operação para ambos os refrigerantes, envolve a avaliação da eficiência energética e das emissões directas que podem variar significativamente dependendo do sistema de refrigeração em que são utilizados. Adicionalmente, a análise do fim de vida, incluindo o impacto no descarte ou recuperação, é vital, sendo que a Amónia pode ser tratada através de processos de recuperação e reciclagem, enquanto o R1233zd(E) pode apresentar desafios relacionados a possível libertação de GEE durante o descarte. A realização de uma ACV comparativa, focada nos factores económicos, ambientais e de saúde para ambos os refrigerantes, oferece um panorama estratégico para a selecção do refrigerante mais adequado em aplicações industriais, em consonância com as normas vigentes e as melhores praticas sustentáveis.

3.1.4 Análise da Eficiência dos Refrigerantes R1233zd(E) e R717

A eficiência energética em sistemas de refrigeração é um dos factores mais relevantes para o desempenho térmico e económico de sistemas de refrigeração e climatização, industriais e comerciais. O presente estudo propõe-se a comparar o desempenho dos dois refrigerantes: o R717 (Amónia), conhecido por sua alta eficiência energética, e o R1233zd(E), um fluido sintético de baixa inflamabilidade e potencial de aquecimento global reduzido.

Com base em um modelo computacional desenvolvido em linguagem *Python*, foram simuladas as condições operacionais semelhantes para ambos os refrigerantes, permitindo uma análise justa dos parâmetros de desempenho.

3.2 Procedimento de análise

O programa (Apêndices-B) foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python e bibliotecas científicas como *CoolProp*, *Pandas* e *Matplotlib*. As condições operacionais foram definidas para simular um ciclo de compressão de vapor ideal para ambos os refrigerantes. A massa do fluido foi fixada em 1 kg (Unidade funcional de estudo), a temperatura de condensação foi fixada em 30 °C e a temperatura de evaporação foi variada entre -25 °C e -10 °C, com incrementos de 2,5 °C.

Foram calculados os seguintes parâmetros: COP (Coeficiente de Performance), energia útil, trabalho de compressão, rendimento do compressor e custos totais. Os resultados obtidos foram organizados em forma de tabela (Apêndices-C);

O coeficiente de performance, é o parâmetro crucial para a escolha de qualquer fluido refrigerante, determina-se da seguinte formula:

$$COP = \frac{Q_L}{W_{Comp}} \quad (1)$$

Onde:

COP – Coeficiente de performance;

Q_L – calor extraído da fonte fria (energia útil), em [kW ou kJ];

W_{Comp} – trabalho do compressor, em [kW ou kJ]

Os dados simulados indicam que o refrigerante R717 apresenta um maior COP em todas as condições de operação analisadas, reflectindo sua maior eficiência termodinâmica. Por outro lado, o R1233zd(E), mesmo apresentando custos mais elevados, influenciados mais significativamente pelo maior consumo energético comparativamente ao R717, e também pelo facto de ser um refrigerante emergente que cumpre melhor com o Protocolo de Montreal (Emenda de Kigali), como um melhor substituto dos HFCs, não mostra um desempenho melhor que o R717

A viscosidade dos fluidos também se mostrou uma variável importante, impactando o rendimento dos refrigerantes. O R717 apresentou menor viscosidade, resultando em um rendimento mais alto no modelo implementado.

A análise realizada demonstra que o R717 possui superioridade em termos de eficiência energética, representada por COPs mais elevados em todas as faixas de operação simuladas. Ainda que o R1233zd(E) apresente vantagens em segurança e menor impacto ambiental, o seu desempenho termodinâmico e os custos operacionais resultantes são inferiores em comparação à Amónia.

3.2.1 Modelagem Computacional para geração de Dados em VisualStudioCode (VSCode)

Para além de consultas em bibliografias, a modelagem computacional desempenhou um papel central na obtenção de dados técnicos utilizados na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos fluídos refrigerantes. Para garantir precisão nos cálculos energéticos e termodinâmicos, bem como coerência com condições industriais, foi desenvolvido um conjunto de códigos no ambiente *VisualStudioCode*, utilizando a linguagem de programação *Python*. Os dados gerados foram posteriormente organizados e analisados no *Microsoft Excel*, permitindo visualização clara e exportação estruturada para posterior uso.

3.2.2 Ambiente de Desenvolvimento: VisualStudioCode

O *VSCode* é um editor de código-fonte altamente personalizável, amplamente utilizado em aplicações científicas devido à sua leveza, suporte a várias linguagens e extensões integradas. Neste estudo, foi utilizado para o desenvolvimento de códigos em *Python*, estruturados para simular o desempenho de refrigerantes sob diferentes condições de operação.

Bibliotecas e Recursos Utilizados

- **CoolProp:** biblioteca termodinâmica responsável pelo cálculo de propriedades como entalpia, entropia, pressão, temperatura e densidade dos refrigerantes.
- **NumPy e Pandas:** utilizadas para criação e manipulação de vectores e matrizes de dados.

- **Matplotlib:** para geração de gráficos de desempenho e validação visual dos dados.
- **OpenPyXL e XlsxWriter:** para exportação automatizada dos dados para planilhas Excel (.xlsx), com estrutura de colunas, títulos e folhas múltiplas.

Cálculos Realizados

Os códigos foram desenvolvidos para:

- Simular ciclos de refrigeração com R717 e R1233zd(E) sob condições industriais (temperaturas de evaporação e condensação variáveis);
- Calcular o Coeficiente de Performance (COP) para diferentes cenários termodinâmicos;
- Estimar o consumo energético (kWh) por kg de refrigerante ao longo da vida útil;
- Determinar os fluxos de entradas e saídas para os fluídos refrigerantes que serão posteriormente integrados na ACV.
- Avaliar emissões resultantes durante as fases do ciclo de vida.

Esses dados são essenciais para alimentar o modelo de ACV no *SimaPro*, pois representam os fluxos reais de energia durante as diferentes fases do ciclo de vida dos refrigerantes.

3.2.3 Integração com o SimaPro

Os dados exportados do Excel foram utilizados como entradas (*Inputs*) e saídas (*Outputs*) quantitativas no SimaPro, alimentando os processos nas diferentes etapas da ACV dos refrigerantes com informações detalhadas de consumo de energia, materiais, emissões e perdas (Vazamentos).

Essa abordagem integrada, envolvendo simulação computacional e manipulação estruturada de dados, garantiu confiabilidade e rastreabilidade dos resultados, além de permitir uma representação fiel das condições industriais no modelo ambiental.

3.3 Modelagem do Ciclo de Vida no SimaPro

A quantificação dos impactos ambientais associados ao uso de fluídos refrigerantes requer uma abordagem sistemática e baseada em dados. Para isso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada como metodologia central, seguindo os princípios estabelecidos nas normas ISO 14040 e 14044. A ferramenta computacional utilizada para operacionalizar a ACV foi o *Software* SimaPro 9.6, amplamente reconhecido por sua robustez metodológica e ampla base de dados. Esta etapa apresenta, de forma detalhada, como o ciclo de vida foi modelado no SimaPro, desde a extracção das matérias-primas até a disposição final do produto.

3.3.1 Conceitos Fundamentais da ACV no SimaPro

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia que visa identificar e quantificar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de seu ciclo de vida. O ciclo de vida, por sua vez, compreende todas as etapas, desde a extracção de recursos naturais (berço) até a destinação final dos rejeitos (túmulo).

No SimaPro, essa abordagem é operacionalizada por meio da construção de modelos de processos interligados, com entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) definidos quantitativamente. Cada processo pode representar uma etapa específica da cadeia produtiva ou do ciclo de vida. A ferramenta permite a conexão desses processos em redes (sistemas de produto), fornecendo uma representação holística das interacções ambientais. Abaixo é apresentado a interface do SimaPro:

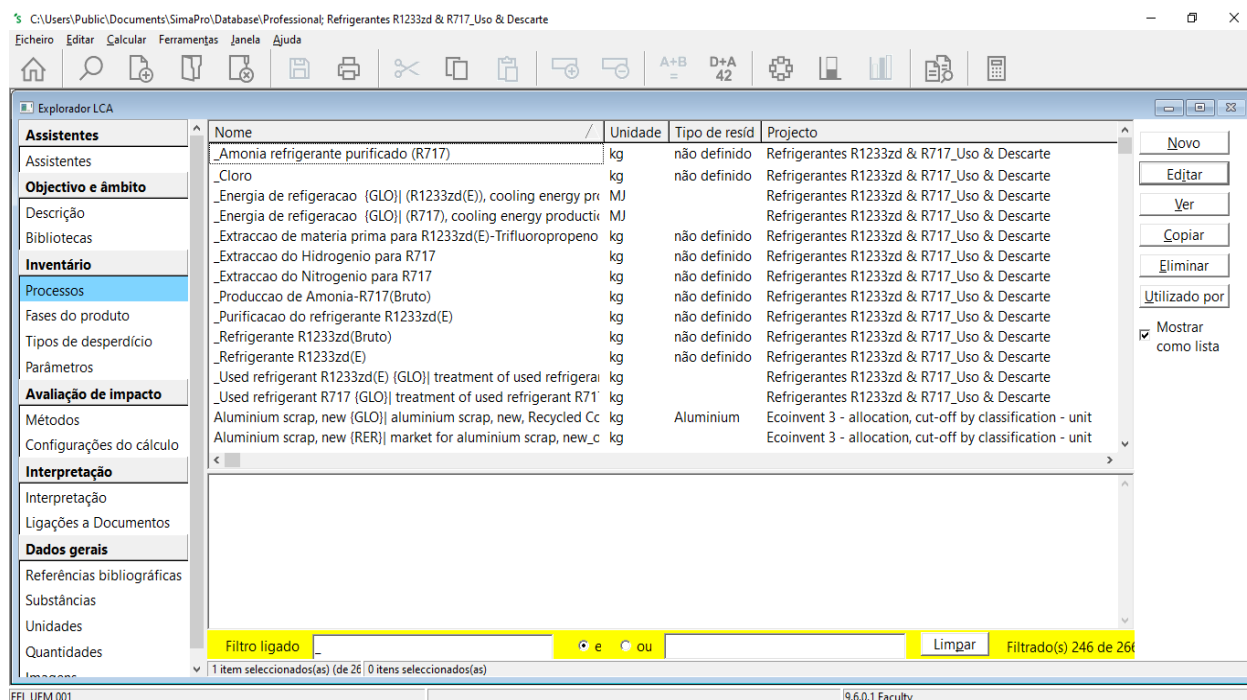


Figura 4-Vista geral do SimaPro [Adaptado pelo autor]

A modelagem no SimaPro segue a seguinte sequência:

- **Descrição: Objectivo e Escopo**

Na secção de descrição, encontraram-se diversos campos de texto. Estes campos fornecem a estrutura necessária para a descrição do objectivo e do escopo do estudo. As bibliotecas do SimaPro são utilizadas como repositórios de recursos onde se armazenam dados padronizados e metodologias padrão de avaliação de impactos. É possível seleccionar quais bibliotecas são consideradas compatíveis com os requisitos do estudo que está sendo realizado.

- **Inventário**

Esta seção dá acesso aos processos e às etapas do produto, que são os dois principais tipos de dados no SimaPro. Descrições do sistema podem ser utilizadas como documentação complementar em alguns processos.

- **Processos (Processes)**

Os processos são usados para representar actividades individuais ou operações unitárias (ex.: produção de 1 kg de um produto, transporte por 1 km, geração de 1 kWh de electricidade). São a base do modelo e podem ser combinados para formar sistemas

complexos. Usa-se quando se quer modelar ou analisar detalhadamente fluxos específicos, com controle sobre entradas e saídas.

- **Etapas do Produto**

As etapas do produto representam cadeias completas ou sistemas de produto (ex.: fabricação completa de um carro, ciclo de vida de um refrigerante). São compostas por vários processos interligados. Usa-se quando se deseja analisar o ciclo de vida completo de um produto ou sistema funcional, com agregação de processos e visualização de impactos totais.

- **Avaliação de Impacto**

Esta secção dá acesso aos métodos de avaliação de impacto ambiental. Na área de configuração de cálculo, é possível definir que ciclos de vida, processos ou sistemas devem ser analisados e comparados repetidamente.

A vantagem de usar a configuração de cálculo é que todos os ciclos de vida ou sistemas aparecem sempre na mesma ordem, com as mesmas cores e na mesma escala, facilitando a comparação dos resultados.

- **Interpretação**

Na fase final do projecto, é necessário tirar conclusões e realizar diversas verificações. Os campos de texto da secção de interpretação funcionam como guias para identificar os pontos que devem ser analisados.

- **Dados Gerais**

Alguns tipos de dados, como *códigos* e dados gerais, não são frequentemente editados durante o estudo de ACV, mas oferecem informações de apoio importantes, como:

- Referências bibliográficas, que podem ser vinculadas aos registos dos processos;
- Nomes de substâncias, armazenados em uma tabela central do SimaPro;
- Conversões de unidades utilizadas nos assistentes (*wizards*);
- Unidades e grandezas, empregadas em diversas partes do software.

3.3.2 Etapas da Modelagem no SimaPro

A modelagem do ciclo de vida dos refrigerantes R717 e R1233zd(E) foi realizada considerando cinco grandes etapas: (1) extracção de matérias-primas, (2) processamento e produção, (3) transporte, esta fase foi incluída na etapa de extracção e como o último elemento na etapa de produção de refrigerantes, (4) uso operacional e (5) fim de vida. Cada uma dessas etapas foi detalhadamente representada no SimaPro conforme descrito a seguir.

3.3.2.1 Extracção de Matérias-primas

A extracção de matérias-primas é o ponto de partida do ciclo de vida. Para o R717 (Amónia), considerou-se a captação de Nitrogénio(N₂) atmosférico e a produção de Hidrogénio via reforma de Metano. Para o R1233zd(E), modelou-se a extracção de fluoretos e compostos orgânicos precursores, derivados do petróleo. Esses processos foram representados no SimaPro por meio da selecção de métodos específicos da base *Ecoinvent 3.9.1*, e com os dados obtidos do *VSCoDe*, tais como quantidade de energia, água consumida, emissões atmosféricas e contaminação do solo (Apêndices-D).

3.3.2.2 Processamento e Produção dos Refrigerantes

Essa etapa corresponde à conversão das matérias-primas em refrigerantes acabados. A produção de Amónia foi modelada com base no processo *Haber-Bosch*, embora sendo um processo que consome grandes quantidades de energia térmica e eléctrica, assim como emite NO_x e CO₂, é o processo usado para a produção industrial do R717. Para o R1233zd(E), modelou-se a fluoração de hidrocarbonetos em reactores pressurizados, com posterior purificação e separação.

O transporte intermodal entre as etapas foi modelado considerando distâncias médias (em km) e modos de transporte padrão. Foram considerados camiões pesados, navios porta-contentores, principalmente para o caso do R1233zd(E), cuja produção ainda está sendo realizada por poucos países do mundo, pelo facto de precisar de novas tecnologias e matérias-primas. O R717 em contrapartida, possui uma tecnologia mais robusta e desenvolvida, com isso a sua aquisição é mais simples. Com isso, a unidade funcional aplicada foi "tonelada-quilómetro" (tkm), e as emissões foram associadas automaticamente a partir dos factores da base *Ecoinvent*.

3.3.2.3 Uso: Operacional

Esta etapa representa o uso dos refrigerantes em sistemas industriais para a produção de energia térmica. A energia consumida foi inserida como fluxo eléctrico (kWh) com origem, as perdas de refrigerante foram modeladas como emissões directas ao ar: O impacto potencial foi calculado para o período de uso estimado em aplicações industriais, com base em dados do fabricante, literatura e dados da modelagem no VSCode.

3.3.2.4 Fim de Vida

A disposição final foi dividida em três cenários principais:

Recuperação e Reciclagem: com eficiência de 90% para R1233zd(E), mais de 95% para o R717;

Incineração controlada: com emissões residuais e consumo energético;

Perdas para o meio ambiente: modeladas como emissões para o solo, água e ar;

Esses cenários foram ponderados segundo as práticas mais comuns em instalações industriais e legislações ambientais vigentes.

3.3.3 Avaliação de Impacto Ambiental

A etapa de Avaliação de Impacto (LCIA) foi realizada com base em três métodos principais:

- **ReCiPe 2016 Midpoint (H):** alteração climática, acidificação, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre e aquática.
- **IPCC 2021 GWP100:** Potencial de aquecimento global ao longo de 100 anos.
- **CML-IA baseline: ODP, POCP** (ozónio troposférico), uso de recursos abióticos.

3.3.4 Categorias de impacto para a ACV

O SimaPro apresenta os resultados de impacto ambiental em uma ampla variedade de categorias, abrangendo desde o aquecimento global (GWP) até a ecotoxicidade, uso da terra, formação de ozônio, acidificação e outras. No entanto, nem todas essas categorias precisam de ser analisadas em profundidade em cada estudo. A selecção das categorias

mais relevantes depende directamente dos objectivos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), do escopo definido e da natureza dos produtos ou processos avaliados. Assim, é prática comum priorizar-se categorias de impacto com maior pertinência ambiental ou regulatória para o contexto em estudo, assegurando uma análise mais focada, robusta e alinhada às questões mais críticas do sistema analisado. Essa abordagem selectiva também contribui para uma interpretação mais clara e eficaz dos resultados, evitando sobrecarga de informações que possam dificultar a tomada de decisões sustentáveis. Neste estudo foram analisadas as seguintes categorias de impacto:

- **Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP):** Avalia o impacto causado pelos gases de efeito estufa (como CO₂, CH₄, N₂O) que contribuem para o aumento da temperatura média global, devido à retenção de radiação infravermelha na atmosfera. O que causa mudanças no Clima Global, instabilidade atmosférica, derretimento de calotas polares, aumento do nível do mar, entre outros. Este pode ser calculado com a seguinte formula;

$$GWP_t = \sum_{i=1}^n \left(m_i \cdot \int_0^t a_i(t) \cdot RE_i(t) dt \right) \text{ [kg CO}_2\text{ - eq]} \quad (2)$$

Onde:

m_i – massa do gás i emitido (kg);

$a_i(t)$ – Fração da substância ainda presente na atmosfera no tempo t ;

$RE_i(t)$ – eficiência radiactiva do gás i (W/m² por kg)

n – número total de substâncias

- **Depleção do Ozónio Estratosférico (Ozone Depletion Potential - ODP):**

Refere-se à destruição da camada de ozónio na estratosfera, causada por compostos halogenados como CFCs e HCFCs, que aumentam a exposição à radiação UV. Tem maior efeito na camada de ozónio, protecção contra radiação UV, saúde humana e agricultura. Determina-se da seguinte formula:

$$ODP = \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{DOD_i}{DOD_{CFC-11}} \right) \text{ [kg CFC - 11 eq]} \quad (3)$$

Onde:

m_i – massa da substância i emitida (kg);

n – número total de substâncias;

DOD_i – depleção total de ozônio causada por i ;

DOD_{CFC-11} – valor de referência para o CFC – 11.

- **Radiação ionizante (Ionizing Radiation – IR):**

Quantifica os efeitos da libertação de isótopos radioactivos sobre os seres humanos e o ambiente, principalmente de origem nuclear. Afecta a saúde humana, contaminação ambiental por radiação e a segurança energética. Determina-se da seguinte formula:

$$IR = \sum_{i=1}^n A_i \cdot D_i \cdot CF_i \quad [\text{kBq Co} - 60 - \text{eq}] \quad (4)$$

Onde:

A_i – atividade do radionuclídeo i liberado (em kBq);

n – número total de substâncias;

CF_i – factor de caracterização relativa ao Cobalto – 60;

D_i – factor de dose (Sv/Bq).

- **Formação de ozónio Saúde Humana (Photochemical Ozone Formation - Human Health):**

Estima a formação de ozónio troposférico (nível do solo), resultante da reacção entre compostos orgânicos voláteis (NMVOCs) e óxidos de nitrogénio (NOx) na presença de luz solar, afectando a saúde respiratória, a qualidade do ar, a saúde humana, e os ambientes urbanos, obtém-se de:

$$POCP_{HH} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot POCP_i \quad [\text{kg NMVOC} - \text{eq}] \quad (5)$$

Onde:

m_i – massa emitida do poluente i (kg);

n – número total de substâncias;

$POCP_i$ – potencial de criação de ozônio fotoquímico de i, em relação ao eteno;

- **Formação de partículas finas (Fine Particulate Matter Formation):**

Refere-se à formação de partículas inaláveis ($PM_{2.5}$), derivadas de emissões de precursores como SO_2 , NO_x e NH_3), que causam doenças respiratórias e cardiovasculares. Calcula-se de:

$$PM_{2.5} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot CF_i^{PM} \quad [kg PM_{2.5} eq./kg] \quad (6)$$

Onde:

m_i – massa do precursor (NO_x, SO₂, NH₃,);

n – número total de substâncias;

CF_i^{PM} – fator de conversão para PM_{2.5}.

- **Formação de ozônio-Ecossistemas Terrestres**

Avalia o impacto do ozônio troposférico na vegetação, levando à redução da produtividade agrícola e danos à flora que se determina de:

$$POCP_{eco} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot POCP_i^{eco} \quad [\text{kg NMVOC} - \text{eq}] \quad (7)$$

Onde:

m_i – massa emitida do poluente i (kg);

n – número total de substâncias;

$POCP_i$ – potencial de criação de ozônio fotoquímico de i , em relação ao eteno.

- **Acidificação terrestre (Acidification Potential)**

Mensura o impacto de substâncias ácidas como SO₂, NO_x e NH₃ na acidificação de solos e corpos hídricos e determina-se como:

$$AP = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \left(\frac{H_{pot}^+(i)}{\text{mol } H^+} \right) \quad [\text{mol } H^+ \text{ eq.}] \quad (8)$$

Onde:

$H_{pot}^+(i)$ – numero de ioes H^+ gerados pela substancia i ;

n – número total de substâncias;

m_i – massa emitida da susbtancia i .

- **Eutrofização da água (Freshwater Eutrophication Potential)**

Quantifica o enriquecimento de fósforo em sistemas de água doce, levando à proliferação de algas, perda de oxigênio e morte de espécies aquáticas a sua determinação é feita como:

$$EP_{FW} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot FP_i \quad [\text{kg P eq.}] \quad (9)$$

Onde:

FP_i – fator de potencial de eutrofização para fósforo e equivalentes;

n – número total de substâncias;

m_i – massa emitida da substância i .

- **Toxicidade Humana não cancerígena (USEtox – Human Toxicity, non-cancer)**

Avalia os efeitos tóxicos de substâncias que não induzem câncer, considerando factores como persistência no ambiente, bioacumulação e vias de exposição (ingestão, inalação, contacto dérmico), e pode determinar-se como:

$$HT_{nc} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot EF_i \cdot FF_i \cdot XF_i \quad [CTUh] \quad (10)$$

Onde:

m_i – massa do elemento i ou substância;

n – número total de substâncias;

EF_i – fator de efeito (impacto na saúde por unidade de exposição);

FF_i – fator de destino (fração que permanece no meio);

XF_i – fator de exposição (vias de entrada no organismo).

- **Escassez de recursos minerais (Mineral Resource Scarcity – ReCiPe)**

Mede o uso de minerais não renováveis, considerando sua raridade e dificuldade de extração, seu impacto sobre a disponibilidade para gerações futuras, e a sua expressão matemática é a seguinte:

$$MRS = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \left(\frac{1}{C_i \cdot RR_i} \right) \quad [kg \text{ Cu eq.}] \quad (11)$$

Onde:

C_i – concentração média do recurso na crosta terrestre;

RR_i – taxa de reserva/restante (raridade);

n – número total de substâncias;

n – número total de substâncias;

m_i – massa da substância i .

- **Escassez de recursos fósseis (Fossil Resource Scarcity)**

Refere-se ao consumo de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão), considerando sua energia incorporada e impacto na exaustão dos recursos e determina-se como:

$$FRS = \sum_{i=1}^n m_i \cdot HHV_i. \quad [MJ] \quad (12)$$

Onde:

m_i – massa do combustível fossil i ;

HHV_i – poder calorífico superior do combustível i ;

n – número total de substâncias;

- **Consumo de água (Water Use)**

Quantifica o volume de água doce retirado de fontes naturais, podendo ser ponderado pelo nível de estresse hídrico regional, que se calcula de:

$$WU = \sum_{i=1} V_i \cdot WSI_i. \quad [m^3] \quad (13)$$

Onde:

V_i – Volume de água usada;

WSI_i – índice de escassez hídrica regional;

Com essas categorias é possível estudar-se o ciclo de vida dos dois fluídos de forma a compreender qual dos dois apresenta-se menos nocivo em relação ao outro e também em que etapa se verifica maior agravamento do impacto.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Terminada a selecção de fluidos refrigerantes com base nos métodos convencionais, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e da modelagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos refrigerantes R717 (Amónia) e R1233zd(E), realizados conforme os métodos descritos no Capítulo 3. Os dados foram analisados em duas frentes: desempenho energético (via simulações em Python) e impacto ambiental (via modelagem no software SimaPro). Os resultados serão apresentados de forma comparativa, considerando as particularidades técnicas, ambientais e operacionais de cada fluido refrigerante.

4.1 Análise do Desempenho Termodinâmico

As simulações em *Python* foram realizadas para um ciclo de compressão de vapor ideal, com temperatura de condensação fixada em 30 °C e temperatura de evaporação variando entre -25 °C e -10 °C, com um incremento de 2,5 °C. A massa de fluido foi fixada em 1 kg, correspondendo à unidade funcional da análise.

Os parâmetros de desempenho calculados incluíram o Coeficiente de Performance (COP), energia útil (QL), trabalho de compressão (Wcomp) e rendimento do compressor. De acordo com os valores (Apêndices-C), pode-se construir o gráfico do coeficiente de performance (COP) dos dois refrigerantes em função da temperatura de evaporação.

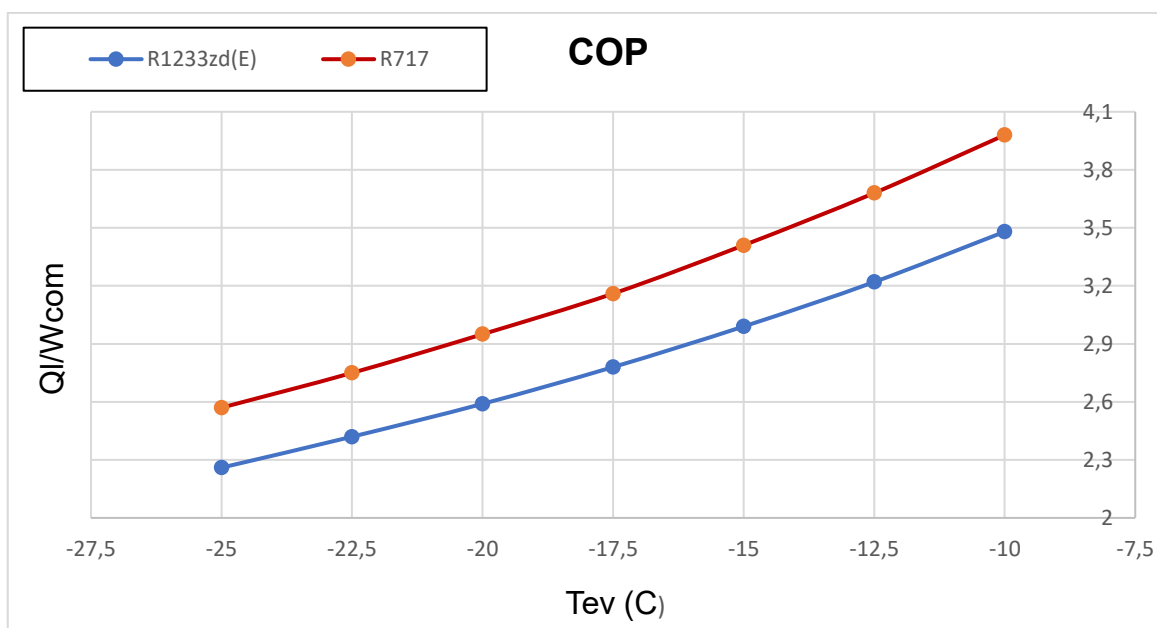


Figura 5-Gráfico do COP em função da Tev; [Autor]

Com base no gráfico acima o R717 apresentou desempenho superior em todas as condições simuladas, o que se deve à sua menor viscosidade e maior condutividade térmica, favorecendo menor trabalho de compressão e maior aproveitamento da energia térmica.

Além disso, o consumo energético total (kWh/kg) estimado ao longo da vida útil reforça a eficiência do R717 em comparação com o R1233zd(E), que demanda mais energia para atingir os mesmos resultados operacionais.

4.2 Análise de Impacto Ambiental (ACV)

Os resultados obtidos por meio das simulações computacionais e da modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos refrigerantes R717 (Amónia) e R1233zd(E). A avaliação foi dividida em quatro etapas principais do ciclo de vida: extracção de matérias-primas, processamento e produção, uso operacional e descarte (fim de vida). Os impactos ambientais foram calculados no software SimaPro 9.6, com base nos dados energéticos obtidos por simulação computacional em Python. Cada fase foi analisada individualmente e comparativamente, com base nas categorias de impacto seleccionadas conforme as metodologias ReCiPe 2016 Midpoint (H), IPCC GWP100 (2021) e CML-IA baseline. A seguir são apresentados os resultados comparativos das diferentes etapas:

4.3 Extracção de Matérias-primas

Nesta fase, foram considerados os insumos (entradas e saídas) necessários à produção inicial de ambos os refrigerantes. Para o R717, a extracção envolveu a captação de Nitrogénio atmosférico e a obtenção de Hidrogénio por reforma de metano (CH₄), nas quantidades suficientes para a produção de 1kg de Amónia, enquanto para o R1233zd(E), modelou-se a extracção de fluoretos e hidrocarbonetos derivados do petróleo. O gráfico abaixo, compara os impactos nas diferentes categorias associados a extracção das matérias-primas, com os respectivos dados apresentados na tabela (Apêndices-E)

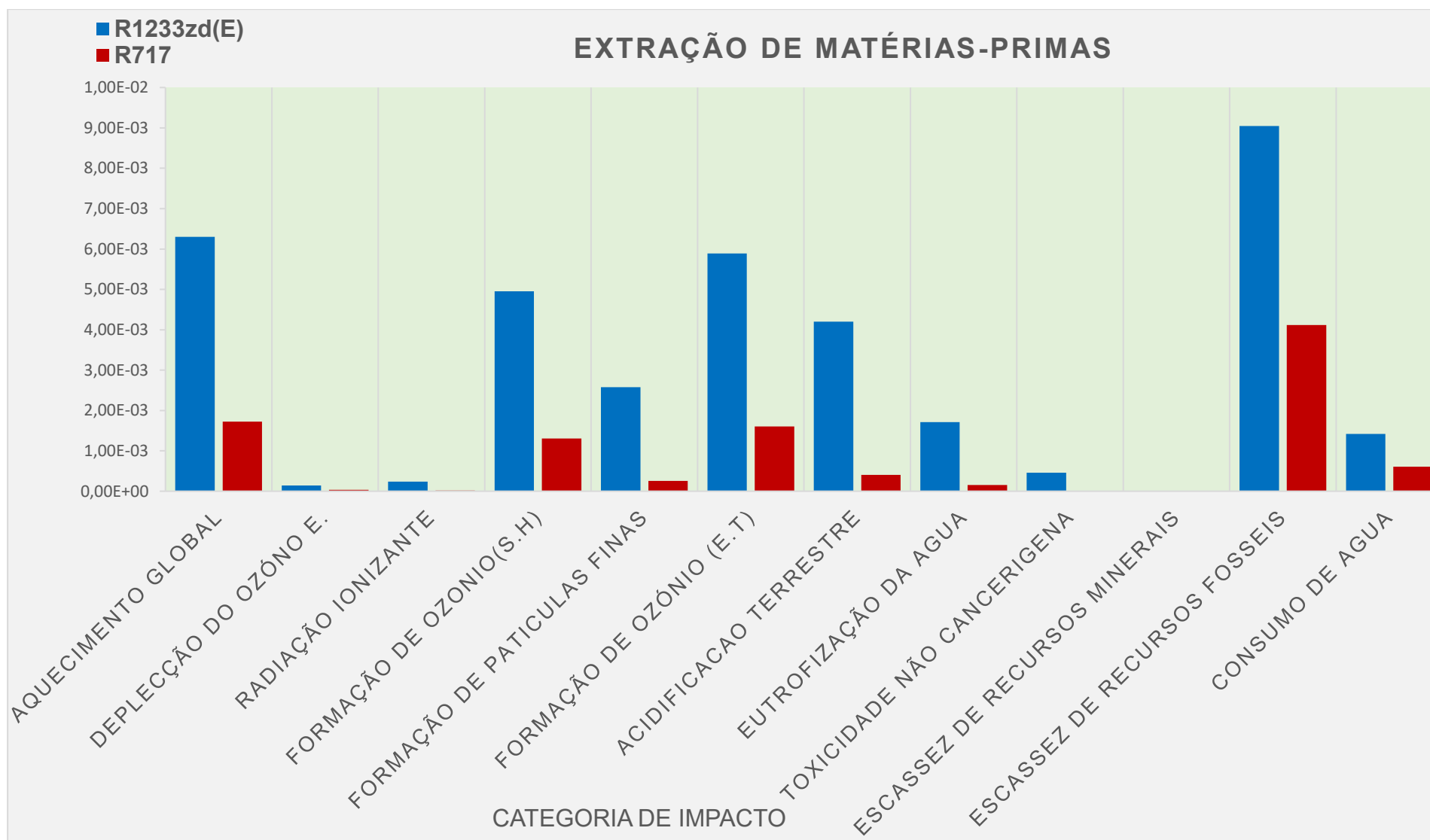


Figura 6 - Gráfico comparativo de impactos ambientais na extracção de matérias-primas [Autor].

Na etapa de extracção de matérias-primas, os dados do gráfico demonstram que o R1233zd(E) apresenta maiores impactos ambientais em todas as categorias analisadas em comparação ao R717. Essa diferença significativa decorre, principalmente, da natureza sintética e halogenada do R1233zd(E), que exige a obtenção de matérias-primas derivadas de compostos orgânicos complexos, além de elementos como flúor e cloro. Esses elementos não são encontrados de forma abundante e exigem processos de mineração e transformação intensivos, gerando emissões atmosféricas (como CO₂, NO_x e VOCs), contribuindo para categorias como aquecimento global, formação de ozónio troposférico, acidificação terrestre e formação de partículas finas.

Além disso, a complexidade química do R1233zd(E) impõe uma cadeia de suprimentos mais longa e diversificada, envolvendo extracção de múltiplos insumos provenientes de fontes fósseis e minerais estratégicos. Isso acarreta impactos elevados em categorias como escassez de recursos fósseis, escassez de recursos minerais e consumo de água, uma vez que cada etapa da cadeia consome recursos naturais e energia em grandes quantidades. A toxicidade não cancerígena também é superior, reflexo da manipulação e transformação de compostos potencialmente perigosos já desde a extracção dos insumos base, que deixam resíduos e efluentes que exigem tratamento.

Em contraste, o R717 é produzido a partir de insumos básicos amplamente disponíveis, como o nitrogénio (extraído do ar) e o hidrogénio (geralmente obtido por reforma de gás natural). Esses insumos requerem processos menos intensivos de extracção e refinamento, o que reduz os impactos nas categorias ambientais analisadas. Embora sua produção exija energia, a etapa de extracção de matérias-primas é mais simples e menos agressiva ao meio ambiente, posicionando o R717 como uma alternativa ambientalmente mais favorável nesta fase do ciclo de vida. Isso reforça a importância de considerar os impactos desde a origem dos materiais ao avaliar a sustentabilidade dos refrigerantes (SimaPro, 2025).

4.4 Processamento e Produção

Terminada a extracção das matérias-primas necessárias para a modelagem ou produção dos refrigerantes, segue a segunda etapa. Esta etapa abrange a conversão das matérias-primas em refrigerante utilizável. O R717 é produzido pelo processo Haber-Bosch, intensivo em energia térmica e eléctrica. O R1233zd(E) envolve etapas de fluoração em reactores pressurizados. Nesta etapa estão incluídos processos como

purificação, embalagem e transporte dos refrigerantes para os campos de aplicação, como forma de compactar as etapas. Os dados obtidos e tabelados (Apêndices-F), são também apresentados no gráfico a seguir, que mostra os impactos nas categorias seleccionadas na fase de produção dos dois fluidos.

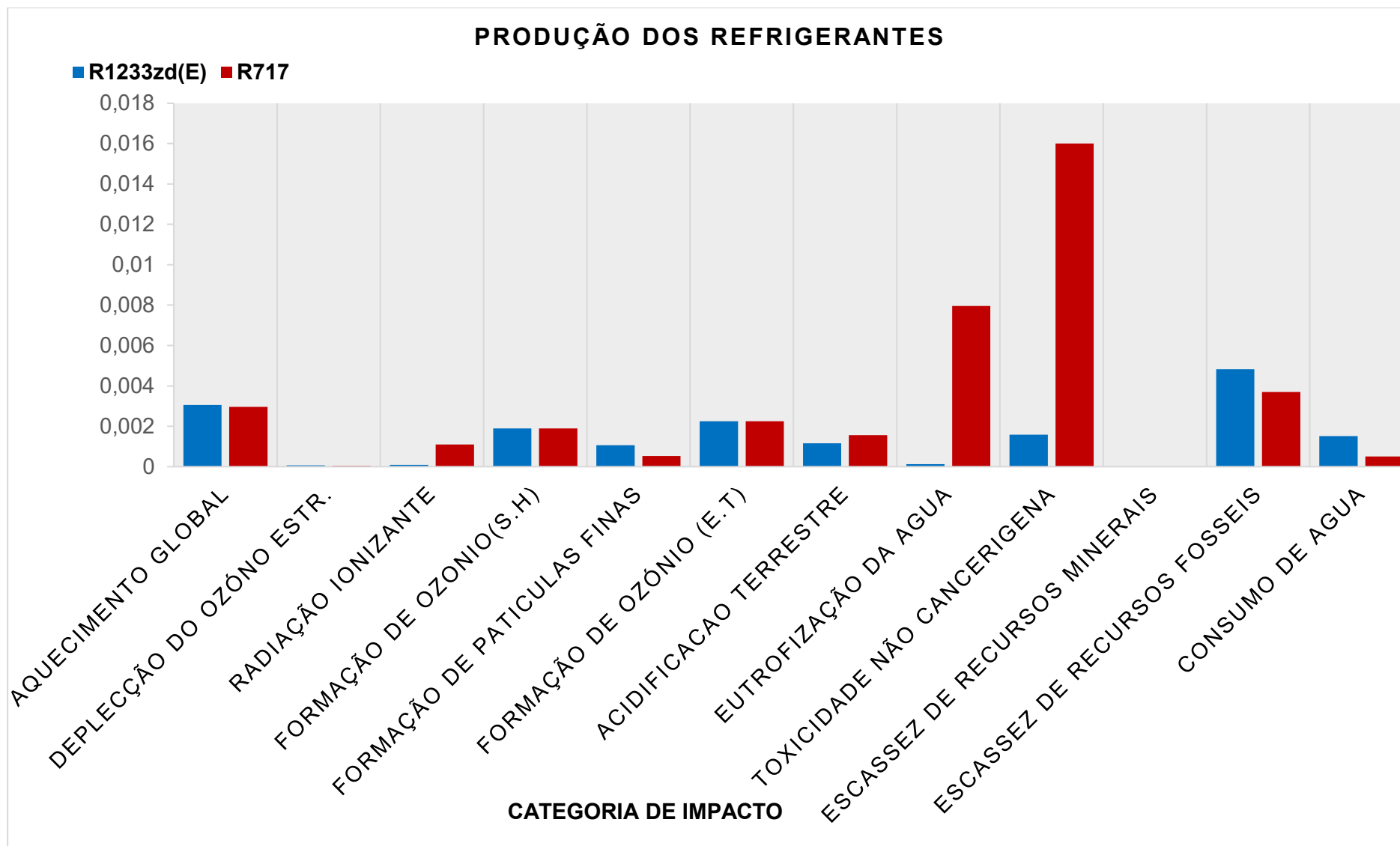


Figura 7- Gráfico comparativo dos impactos ambientais na fase de Processamento e Produção de refrigerantes [Autor]

Com base no gráfico que compara os impactos ambientais na etapa de produção dos refrigerantes R717 e R1233zd(E), observa-se uma distribuição contrastante dos impactos entre os dois fluidos, com o R717 apresentando maior impacto em categorias associadas a emissões operacionais industriais convencionais e o R1233zd(E) destacando-se negativamente em categorias ligadas à complexidade química de sua síntese.

O R717 apresenta maiores impactos nas categorias de Radiação Ionizante, Acidificação Terrestre, Eutrofização da Água, Toxicidade Não Cancerígena e Escassez de Recursos Minerais. Esses impactos estão relacionados ao processo de síntese industrial da Amónia, geralmente realizado pelo processo Haber-Bosch, que é altamente intensivo em energia, utilizando gás natural como matéria-prima e fonte de calor. A alta demanda energética, principalmente quando suprida por fontes fósseis, leva à emissão de óxidos de nitrogénio e enxofre, responsáveis pela acidificação e eutrofização. Além disso, os sistemas de purificação e catalisadores utilizados durante a produção contribuem para o aumento da toxicidade e da pressão sobre minerais específicos.

Por outro lado, o R1233zd(E) apresenta maiores impactos em Aquecimento Global, Depleção do Ozónio Estratosférico, Formação de Partículas Finas, Escassez de Recursos Fósseis e Consumo de Água. Isso se deve ao facto de sua produção envolver processos mais complexos de síntese orgânica fluorada, com uso de halogenados (fluor, cloro) derivados de hidrocarbonetos especiais. A síntese do R1233zd(E) envolve etapas múltiplas com utilização de reagentes orgânicos, solventes e temperaturas controladas, o que resulta em emissões significativas de GEE, subprodutos halogenados com potencial de destruição do ozónio e geração de resíduos aquosos e gasosos que exigem tratamento.

Algumas categorias apresentam valores semelhantes ou empates técnicos, como a Formação de Ozónio no Ecossistema Terrestre (E.T.) e a Formação Ozónio com vista a saúde humana, onde os dois fluidos apresentam desempenhos comparáveis. Isso se explica pelo facto de ambas as cadeias de produção envolverem processos industriais que utilizam combustíveis fósseis e contribuem com precursores atmosféricos similares.

Portanto, a análise demonstra que a produção do R717 envolve impactos mais relacionados à energia e emissões convencionais da indústria química básica, enquanto o R1233zd(E) está associado a impactos mais ligados à química fina, com efeitos sobre

o clima e o ozônio. A escolha do refrigerante deve considerar esse contraste, especialmente quando o foco da análise ambiental recai sobre as etapas iniciais do ciclo de vida. [SimaPro 2025]

Quadro 1- Síntese de categorias de impacto na fase de Processamento e produção de refrigerantes

Categoria de Impacto	Maior Impacto	Justificativa
Aquecimento Global (GWP)	R1233zd(E)	Maior demanda de energia térmica e eléctrica em processos de síntese orgânica halogenada.
Depleção de Ozônio (ODP),	R1233zd(E)	Uso de precursores halogenados com potencial residual de emissão de substâncias reactivas.
Radiação Ionizante	R717	Produção energética intensiva (Haber-Bosch) com fontes fósseis e radioactivas.
Formação de ozônio troposférico (S-H)	R717 e R1233zd(E)	Ambas as produções emitem precursores com potencial oxidante atmosférico.
Formação de partículas finas (PM _{2.5}),	R1233zd(E)	Processos térmicos e combustíveis fósseis utilizados em ambas as cadeias industriais.
Formação de ozônio troposférico (E-T)	R717 e R1233ZD(E)	Ambas as produções emitem precursores com potencial oxidante atmosférico.
Acidificação terrestre	R717	Emissão de NOx e S2O no processo Haber-Bosch e energia associada.
Eutrofização da água doce	R717	Liberação de resíduos nitrogenados e águas residuais com nutrientes.
Toxicidade humana não cancerígena	R717	Uso de catalisadores e liberação de subprodutos tóxicos no processo de síntese da Amónia.
Escassez de recursos minerais	R717	Dependência de metais críticos (como ferro, molibdénio) para operações e infraestrutura pesada.

Escassez de recursos fósseis	R1233zd(E)	Cadeia produtiva longa com uso de derivados de petróleo e compostos orgânicos especializados.
Consumo de água	R1233zd(E)	Necessidade de múltiplos ciclos de resfriamento e purificação em síntese química.

4.5 Uso Operacional dos Refrigerantes

Durante a fase de uso operacional, os refrigerantes são empregados em sistemas de refrigeração industrial com ciclos contínuos de evaporação e condensação. Essa etapa é caracterizada pelo consumo energético, emissões directas por vazamentos, e, em menor grau, pelo desgaste de componentes e perdas não planeadas. As diferenças entre o R717 e o R1233zd(E) nesta fase estão directamente relacionadas à sua eficiência energética, estabilidade química e taxa de emissão directa. Os dados referentes à utilização dos refrigerantes são apresentados na tabela (Apêndices-G), e pode-se visualizar o impacto por categoria no gráfico a seguir.

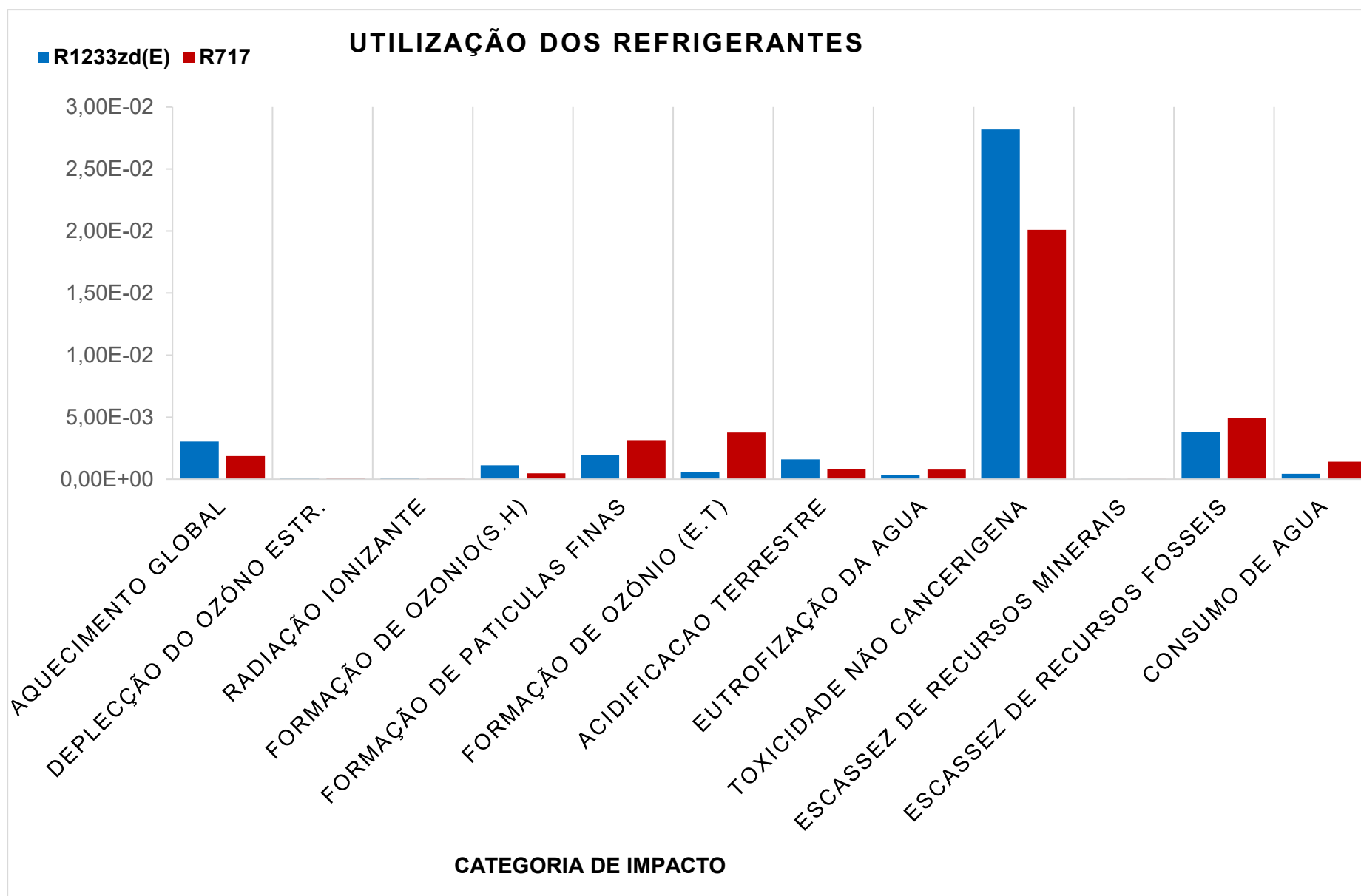


Figura 8-Gráfico comparativo dos impactos ambientais na utilização de refrigerantes R717 e R1233zd(E) [Autor].

Durante a etapa de uso dos refrigerantes em sistemas industriais, observa-se que o R717 apresenta maiores impactos ambientais em categorias ligadas a efeitos locais e operacionais. A depleção do ozônio estratosférico está associada à possibilidade de pequenas fugas do sistema durante a manutenção ou operação, onde compostos nitrogenados como o NH₃ podem, em contacto com o ar, gerar reacções secundárias em altitudes mais elevadas. A formação de partículas finas e a formação de ozônio no ecossistema terrestre (E.T.) ocorrem principalmente devido ao uso indirecto de energia em sistemas de compressão por Amónia, que em geral são electricamente intensivos e, quando alimentados por fontes fósseis, resultam na libertação de precursores atmosféricos (NO_x, SO_x).

A eutrofização da água também é mais expressiva no R717, reflectindo a possibilidade de rejeição de compostos nitrogenados nos sistemas de drenagem ou torres de resfriamento com perdas operacionais. Além disso, sistemas que utilizam R717 costumam demandar infra-estrutura de maior porte e controle térmico mais exigente, o que contribui para um maior consumo de recursos fósseis (indirectamente, via electricidade) e uso de água em circuitos de resfriamento, especialmente em ambientes industriais tropicais ou com cargas térmicas elevadas.

Em contrapartida, o R1233zd(E) apresenta impactos superiores em Aquecimento Global, Toxicidade Não Cancerígena, Radiação Ionizante, Acidificação Terrestre e Escassez de Recursos Minerais. Esses impactos, durante a etapa de uso, decorrem principalmente de fugas difusas do fluido que, apesar de sua baixa inflamabilidade e eficiência, contém halogénios com alto potencial de aquecimento global e toxicidade residual. Mesmo pequenas quantidades libertadas em atmosferas industriais contribuem significativamente para essas categorias. Além disso, o funcionamento de sistemas com R1233zd(E), embora menos exigente em pressão e temperatura que o R717, envolve circuitos com componentes especiais que contêm ligas metálicas e materiais específicos que aumentam a pressão sobre recursos minerais estratégicos.

Outro ponto importante é que sistemas com R1233zd(E) podem apresentar menores exigências de manutenção e operação em relação ao R717, o que reduz os riscos de liberação de Amónia, mas não elimina os impactos potenciais causados por emissões contínuas em pequenas quantidades ao longo do tempo. A combinação entre a composição química do fluido e a sensibilidade ambiental a esses compostos explica sua

maior contribuição para categorias globais e de toxicidade ambiental, mesmo quando usado em sistemas herméticos e bem projectados.

Portanto, a análise ambiental da etapa de uso demonstra que o R717 representa maior risco para o meio ambiente local e os recursos operacionais, enquanto o R1233zd(E) concentra seus impactos em categorias globais e de longo prazo. Essa diferenciação é crucial para o processo de selecção do refrigerante mais adequado a cada aplicação, uma vez que ela depende não apenas da eficiência energética, mas também da infra-estrutura disponível, das condições operacionais, dos requisitos de segurança e da prioridade ambiental da indústria. (SimaPro, 2025). O quadro a seguir mostra o resumo das categorias de impacto com relação a utilização dos refrigerantes:

Quadro 2- Síntese das categorias de impacto com relação a utilização dos refrigerantes

Categoria de Impacto	Maior Impacto	Justificativa
Aquecimento Global (GWP)	R1233zd(E)	Pequenas fugas durante o uso libertam compostos halogenados com alto GWP.
Depleção de Ozónio (ODP),	R717	Emissão indirecta de NH ₃ em manutenção ou fugas que participam de reacções com o ozónio.
Radiação Ionizante	R1233zd(E)	Uso de energia eléctrica em regiões com matriz energética nuclear ou radioactiva.
Formação de ozónio troposférico (S-H)	R1233zd(E)	Fugas libertam compostos que reagem com a luz solar formando ozónio troposférico.
Formação de partículas finas (PM _{2.5}),	R717	Geração de partículas finas devido à demanda eléctrica e combustíveis em sistemas auxiliares.
Formação de ozónio troposférico (E-T)	R717	Emissões indirectas de NOx devido ao alto consumo eléctrico em sistemas de compressão.

Acidificação terrestre	R1233zd(E)	Pequenas emissões de compostos halogenados contribuem para acidificação atmosférica.
Eutrofização da água doce	R717	Possível descarte de soluções ou resíduos nitrogenados em sistemas com torres de resfriamento.
Toxicidade humana não cancerígena	R1233zd(E)	Libertação difusa de substâncias halogenadas com efeito tóxico crônico no ambiente.
Escassez de recursos minerais	R1233zd(E)	Necessidade de componentes técnicos especiais e ligas metálicas nos equipamentos.
Escassez de recursos fósseis	R717	Elevado consumo energético indirecto por sistemas de alta capacidade e carga térmica.
Consumo de água	R717	Uso comum de torres de resfriamento com condensação por água, resultando em elevado consumo hídrico na operação.

4.6 Fim de Vida (Descarte)

O descarte é a última etapa do ciclo de vida dos refrigerantes, a análise comparativa entre os refrigerantes R717 e R1233zd(E) evidencia diferenças marcantes em função da natureza química de cada composto e das tecnologias disponíveis para sua gestão pós-uso, nesta fase, os impactos ambientais estão relacionados principalmente às emissões residuais durante o uso por vazamentos, eficiência de recuperação, reciclagem, e ao método adoptado para o descarte. O tratamento técnico adequado nesta etapa pode mitigar consideravelmente os impactos. Os resultados por categoria de impacto estão dispostos na tabela (Apêndices-H) e abaixo tem-se o gráfico ilustrativo de como cada refrigerante se comporta nesta fase.

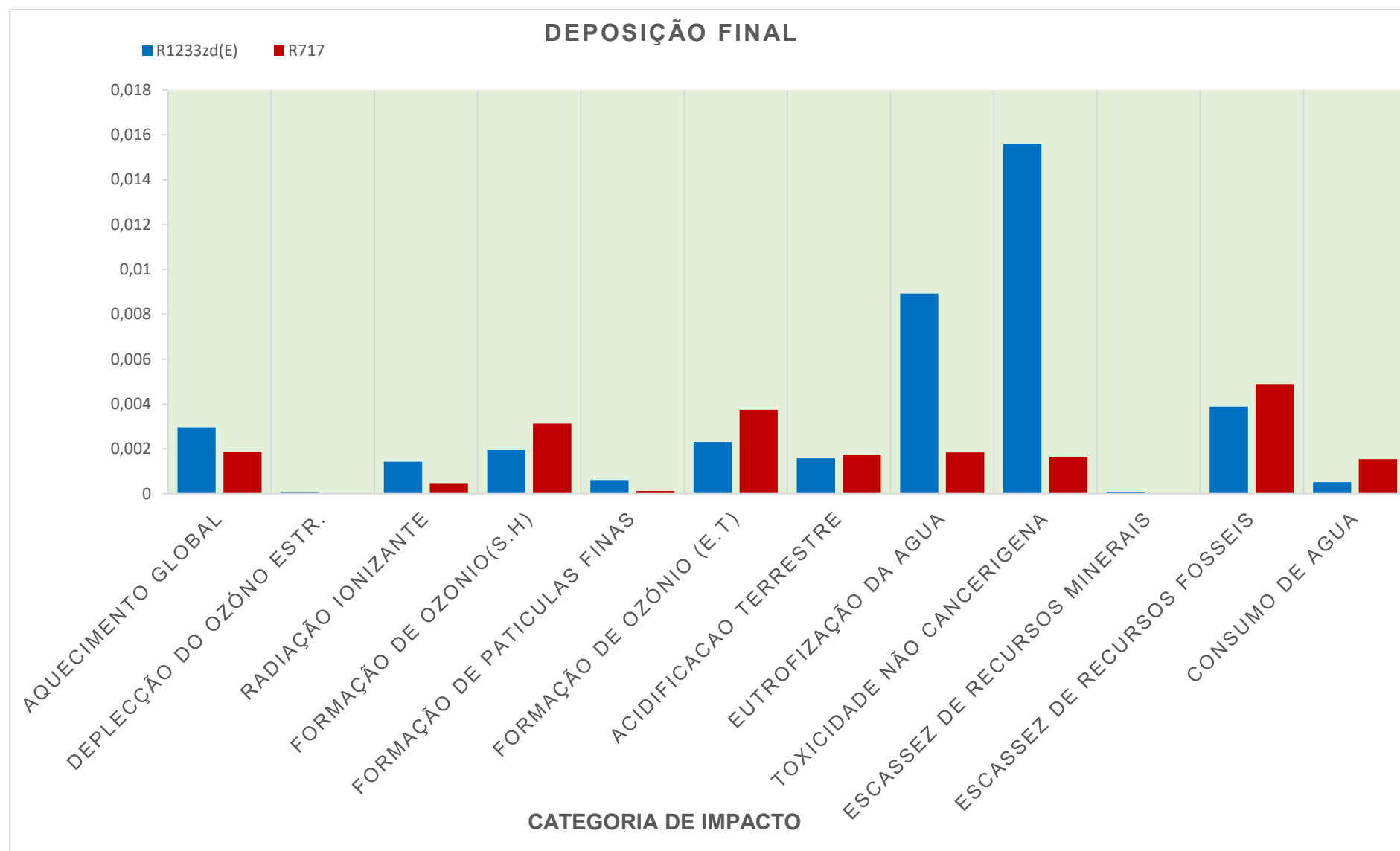


Figura 9-Gráfico comparativo dos impactos ambientais no Descarte dos refrigerantes R717 e R1233zd(E). [Autor]

Com base no gráfico e nas propriedades de cada refrigerante é possível tirar as seguintes conclusões, na etapa de deposição final, os impactos ambientais variam significativamente entre os refrigerantes R1233zd(E) e R717, reflectindo as diferenças em sua composição química, estabilidade ambiental e tecnologia exigida para descarte seguro. O R1233zd(E), por ser um composto halogenado sintético, apresenta baixa degradabilidade e exige incineração controlada a altas temperaturas para evitar a liberação de subprodutos tóxicos como HF, COF₂ e HCl. Esse processo é energeticamente intensivo e demanda infra-estrutura especializada, contribuindo para maiores impactos em categorias como aquecimento global, toxicidade não cancerígena, radiação ionizante, escassez de recursos minerais e eutrofização da água. Além disso, a recuperação limitada de seus materiais reforça sua contribuição para a escassez de recursos.

O R717, por sua vez, apresenta maior compatibilidade ambiental, já que sua biodegradabilidade permite alternativas de descarte menos agressivas, como neutralização química com ácidos e tratamentos convencionais. Entretanto, por ser altamente reactivo e volátil, mesmo pequenas emissões residuais durante a desmontagem de sistemas ou falhas operacionais podem reagir com compostos atmosféricos, formando poluentes secundários como ozónio troposférico (O₃) e Amónio (NH₄⁺). Isso explica seus maiores impactos em formação de ozónio (associada à saúde humana e ao ecossistema terrestre), acidificação do solo, consumo de água e uso indirecto de recursos fósseis. O uso de água em processos de lavagem e contenção de emissões também amplia esses impactos.

Essa comparação evidencia que o R1233zd(E) tem maior impacto ambiental geral na deposição final, principalmente por causa da complexidade química e do tratamento térmico necessário, enquanto o R717, embora menos danoso em várias categorias, ainda exige atenção especial para reacções secundárias atmosféricas e uso de insumos hídricos e energéticos no processo de neutralização. A seguir é apresentada uma síntese dos impactos por categoria de impacto;

Quadro 3- Síntese tabelada dos maiores impactos por categoria na Deposição final dos refrigerantes;

Categoria de Impacto	Maior Impacto	Justificativa
Aquecimento Global (GWP)	R1233zd(E)	Incineração a altas temperaturas consome mais energia, gerando emissões indirectas de CO ₂ .
Depleção de Ozónio (ODP),	R1233zd(E)	Resíduos halogenados persistentes podem interferir no equilíbrio estratosférico.
Radiação Ionizante	R1233zd(E)	Maior energia usada na destruição térmica eleva uso indirecto de fontes com maiores emissões.
Formação de ozónio troposférico (S-H)	R717	Emissões de Amónia reagem com NO _x e VOCs, formando oxónio nocivo à saúde respiratória.
Formação de partículas finas (PM _{2.5}),	R717	Incineração gera partículas secundárias e resíduos atmosféricos persistentes.
Formação de ozónio troposférico (E-T)	R717	Reacções atmosféricas secundárias com NH ₃ afectam a vegetação e a biodiversidade terrestre.
Acidificação terrestre	R717	NH ₃ reage com humidade e SO ₂ formando ácidos, contribuindo para a acidificação do solo.
Eutrofização da água doce	R1233zd(E)	Compostos halogenados residuais afectam ecossistemas aquáticos em caso de descarte inadequado.
Toxicidade humana não cancerígena	R1233zd(E)	Subprodutos da incineração são altamente tóxicos e persistentes.
Escassez de recursos minerais	R1233zd(E)	Fluido contém elementos sintéticos e metais raros com baixa reciclabilidade.
Escassez de recursos fósseis	R717	Energia usada no desmonte de sistemas pressurizados e reciclagem de componentes metálicos.

Consumo de água	R717	Utiliza grandes volumes de água em processos de lavagem, neutralização e descontaminação de sistemas.
-----------------	------	---

4.7 Comparação das etapas

Abaixo é apresentado o gráfico resumo do ciclo de vida dos dois refrigerantes.

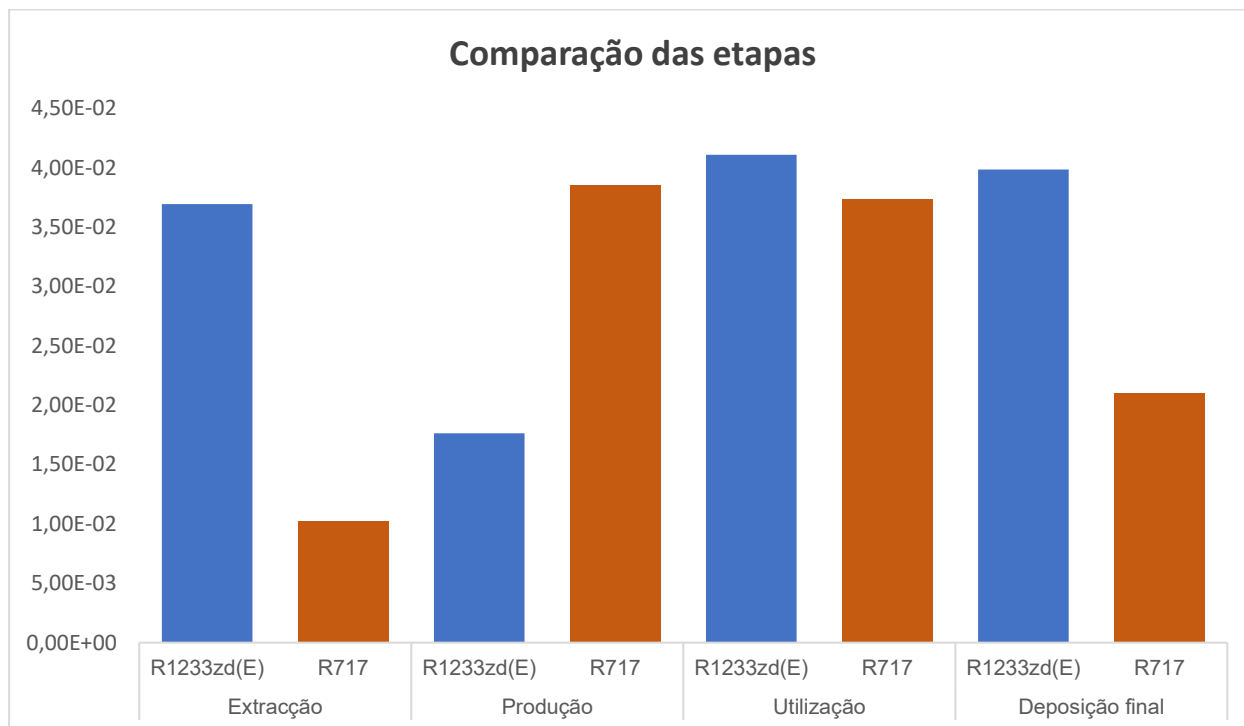


Figura 10-Gráfico comparativo do ciclo de vida do refrigerante. [Autor]

A análise comparativa entre as etapas do ciclo de vida dos refrigerantes R1233zd(E) e R717 demonstra que os impactos ambientais se distribuem de maneira distinta entre os dois fluidos, reflectindo suas diferenças de origem, composição e comportamento operacional. Na etapa de extração, o R1233zd(E) apresenta impacto significativamente maior em relação ao R717. Isso se deve à necessidade de insumos halogenados, muitas vezes derivados de fontes petroquímicas e minerais raros, enquanto a Amónia possui uma cadeia de extração mais simples, baseada em recursos amplamente disponíveis como o gás natural.

Na etapa de produção, observa-se o cenário inverso: o R717 apresenta os impactos mais agravados, enquanto o R1233zd(E) se mostra menos impactante. Essa diferença decorre do facto de que, apesar de sua estrutura química mais simples, a produção industrial da Amónia envolve processos com elevadas pressões, purificação contínua e

rigorosos controlos de segurança, o que demanda energia e gera resíduos específicos. Por outro lado, a síntese do R1233zd(E), embora complexa, é realizada de forma mais controlada e otimizada em processos contínuos na indústria química.

A etapa de utilização representa o ponto mais crítico para ambos os refrigerantes, com o R1233zd(E) apresentando um impacto ligeiramente maior em comparação ao R717. No caso do R1233zd(E), o maior impacto está associado ao seu desempenho energético inferior, o que leva a maior consumo de electricidade e consequentes emissões indirectas de gases de efeito estufa. Já o R717, embora mais eficiente termodinamicamente, apresenta desafios operacionais relacionados à sua toxicidade, corrosividade e necessidade de sistemas de segurança mais elaborados, que também consomem energia e recursos auxiliares.

Por fim, na etapa de deposição final, o R1233zd(E) novamente apresenta maior impacto quando comparado ao R717. Isso ocorre porque sua destinação requer em parte incineração a altas temperaturas, com elevado gasto energético e risco de geração de subprodutos tóxicos, como HF e HCl. Além disso, seus componentes não são facilmente recicláveis. Em contrapartida, a Amónia pode ser neutralizada ou diluída com relativa facilidade, e sua decomposição ocorre de forma mais natural e com menor persistência ambiental, resultando em impactos finais mais baixos.

Quadro 4-Comparação dos impactos por etapas do ciclo de vida;

Etapa do ciclo de vida	Maior impacto	Justificativa
Extracção	R1233zd(E)	Exige matérias-primas halogenadas, metais raros e insumos petroquímicos com maior impacto ambiental.
Produção	R717	Produção industrial da Amónia demanda energia elevada e processos sob alta pressão e purificação rigorosa.
Utilização	R1233zd(E)	Maior consumo de energia eléctrica devido ao menor desempenho termodinâmico do fluido.

Descarte	R1233zd(E)	Necessita incineração em altas temperaturas, gerando resíduos tóxicos e elevado consumo energético.
----------	------------	---

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

- Este estudo permitiu seleccionar, com base em critérios normativos, energéticos e ambientais, os refrigerantes R717 e R1233zd(E) como alternativas viáveis para aplicações industriais. A análise evidenciou que o R717 apresenta melhor desempenho energético (maior COP), enquanto o R1233zd(E) se destaca por menores impactos em categorias como toxicidade humana e acidificação, demonstrando que a escolha do refrigerante deve considerar não apenas a eficiência, mas também os impactos ao longo de todo o seu ciclo de vida;
- A modelagem no software SimaPro foi essencial para representar com fidelidade todas as etapas do ciclo de vida de ambos os refrigerantes, desde a extracção das matérias-primas até a disposição final. Essa abordagem possibilitou a avaliação detalhada de impactos por categoria e por etapa, proporcionando uma visão completa dos efeitos ambientais associados a cada fluido;
- A comparação dos impactos revelou que a etapa de utilização concentra a maior parte das emissões devido ao consumo energético contínuo, sendo determinante no desempenho ambiental final. No entanto, as fases de produção e descarte também se mostraram relevantes, especialmente para o R717, cujos processos envolvem maior carga ambiental em termos de toxicidade e ecotoxicidade. Assim, a avaliação completa por etapas reforça a importância de considerar todo o ciclo de vida na selecção de refrigerantes.

5.2 Recomendações

- Escolher refrigerantes com menor GWP e boa eficiência energética na fase de uso: a utilização é a etapa de maior duração e consumo energético. Optar por refrigerantes com menor impacto climático, como o R717, contribui para reduzir as emissões indirectas associadas à operação;
- Adoptar sistemas com controlo rigoroso de fugas: a libertação de refrigerantes na atmosfera durante o uso é uma das principais fontes de impacto. Recomenda-se a instalação de sensores de fugas, manutenção preventiva e formação dos operadores;
- Garantir recolha e tratamento adequado no fim de vida: na fase de descarte, o impacto depende da gestão final dos fluidos. Recomenda-se o encaminhamento

para unidades autorizadas de recuperação, regeneração ou destruição térmica, evitando emissões directas;

- Desincentivar o descarte informal de equipamentos e fluidos: a deposição inadequada de equipamentos com refrigerantes ainda presentes agrava os impactos ambientais. É essencial aplicar normas de logística reversa e responsabilização do produtor ou instalador;
- Considerar o ciclo de vida completo na decisão técnica: a selecção de refrigerantes deve ir além da análise operacional. A avaliação do ciclo de vida permite comparar o desempenho ambiental total, orientando escolhas mais sustentáveis a longo prazo;
- Explorar novas gerações de refrigerantes alternativos: dada a constante evolução tecnológica e regulatória no sector da refrigeração, seria pertinente alargar os estudos a outros fluídos de baixo impacto ambiental, incluindo substâncias ainda em fase de validação comercial. Esta ampliação permitiria antecipar tendências e apoiar decisões mais robustas em contextos industriais diversificados;
- Integrar critérios económicos e ambientais numa perspectiva combinada: considerando que a sustentabilidade envolve múltiplas dimensões, futuros trabalhos poderão beneficiar da associação entre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (LCC). Esta abordagem conjunta permite compreender melhor os compromissos entre impacto ambiental e viabilidade económica, proporcionando uma base mais sólida para decisões estratégicas;
- Avaliar os efeitos de transições energéticas nos impactos dos refrigerantes: com a crescente transição para fontes energéticas mais limpas, torna-se relevante simular cenários futuros em que a matriz energética esteja progressivamente descarbonizada. A análise do comportamento ambiental dos refrigerantes sob diferentes contextos energéticos permitirá compreender a sua performance em realidades mais sustentáveis, influenciando projectos de longo prazo.
- Modelagem híbrida: desenvolver ferramentas de optimização multicritério que combinem eficiência energética, impacto ambiental e custos ao longo do ciclo de vida;
- Investigar a viabilidade da implementação da refrigeração magnética como alternativa ao uso de refrigerantes, com foco na comparação do desempenho

energético, análise preliminar de custos e avaliação dos potenciais benefícios ambientais em relação aos sistemas convencionais de compressão de vapor.

6. REFERÊNCIAS

- I. ASHARE. (2019). Designation and Safety Classification of Refrigerants. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ANSI/ASHRAE Standard 34-2019*.
- II. Baird, C., & Cann, M. (2011). *Environmental Chemistry* (5th Edition ed.). W. H. Freeman & Company.
- III. Calm, J. M. (Novembro de 2008). The Next Generation of Refrigerants. *The Next Generation of Refrigerants – Historical Review, Considerations, and Outlook*.
- IV. Cambridge University Press. (2023). *Climate Change 2021*.
- V. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development* (2.^a edição ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.
- VI. Dossat, R. J., & Horan, T. J. (2002). *Principles of Refrigeration* (5^a edição ed.). Upper Saddle River, New Jersey, EUA: Prentice Hall.
- VII. Gosney, W. B. (1982). *Principles of Refrigeration*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- VIII. ibict. (2025). *Avaliação do Ciclo de Vida*. Brasil: BRACV.
- IX. ISO14040. (2006). Environmental management: International Organization for Standardization. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- X. Klein, S. A., & Alvarado, F. L. (2022). *Engineering Equation Solver – EES: Academic Professional Version User Manual*. Madison, Wisconsin, USA: F-Chart Software.
- XI. L, B. M. (07 de Junho de 2022). HFCs alternative. *Thermophysical properties of HFO refrigerants*.
- XII. McLinden, M. O., Brown, J. S., Brignoli, R., & Kazakov, A. F. (17 de Fevereiro de 2017). *Limited options for low-global-warming-potential refrigerants*.
- XIII. McQuiston, F. C., Parker, J. D., & D. Spitler, J. (2005). *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design* (6^a edição ed.). Hoboken, New Jersey, EUA, EUA: John Wiley & Sons.

- XIV. Palm, B. (2008). *Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems*. ELSEVIER.
- XV. Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1985). *Refrigeração e Ar Condicionado* (2ª edição (tradução da edição americana) ed.). São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- XVI. UNEP. (2021). *Kigali Amendment to the Montreal Protocol – Status of Ratification*. *United Nations Environment Programme*.
- XVII. World Meteorological Organization. (18 de 10 de 2022). WMO GREENHOUSE GAS. *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on*.

Outras referencias;

- <https://www.todamateria.com.br/efeito-estufa/>, 25/05/2025, 10h41PM
- <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/> 25/07/2025, 12h41PM

APÊNDICES

Apêndice-A: Propriedades gerais dos refrigerantes

Refrigerante	Amónia	Dióxido de Carbono	Propano	HFO 1234ze(E)	HFO 1233zd(E)	HFO 1336mzz(Z)
Caract.						
Código	R717	R744	R290	R1234ze(E)	R1233zd(E)	R1336mzz(Z)
Formula	NH3	CO2	C4H10	C3H2F4	C3HCIF4	C4H2F6
Tipo	Natural	Natural	Natural	HFO	HFO*	HFO
Estado (25C)	Gás	Gás	Gás	Gás	Líquido	Líquido
T(eb)[C]	-33,3	-78,5(subl.)	-42,1	-19	19	33,4
T.Crit.(C)	132,4	31,1	96,7	109,4	165,6	171,4
Pv[kg/m3] 1atm	1,225	1,842	1,867	4,3	6,1	5,7
PI[kg/m3] 1atm	682	--	509	1170	1325	1340
GWP	0	1	~3	<1	~1	~2
ODP	0	0	0	0	~0,00034	0
Inflamabil.	Alta	Não	Alta	Leve (A2L)	Não (A1)	Não (A1)
COP	Alto	Médio	Alto	Médio	Alto	Alto
Aplicação	-Indústria alimentícia, Frigoríficos;	Supermercados , transporte, bombas de calor	Residencial, splits, geladeiras, freezers	Chillers, refrigeração comercial e leve	Chillers centrífugos, processos industriais	Chillers de alta eficiência, edifícios comerciais
Limitações	Tóxica; corrosiva ao cobre; exige ventilação e EPIs	Alta pressão; exige projecto robusto	Altamente inflamável; exige ventilação e segurança	Baixa densidade refrigerante; pode exigir compressores maiores	Opera em baixa pressão; excelente segurança operacional	Requer alta T; não compatível com todos os sistemas

Apêndice-B

Código da análise energética dos Refrigerantes (R1233zd(E) & R717)

```
import CoolProp.CoolProp as CP
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import numpy as np

# Dados dos refrigerantes
refrigerantes = {
    "R717": {"nome": "Amônia", "preco_kg": 4.00,
"eficiencia_isentropica": 0.82},
    "R1233zd(E)": {"nome": "R1233zd(E)", "preco_kg": 40.00,
"eficiencia_isentropica": 0.72}
}

# Parâmetros fixos
massa = 1.0 # kg
T_cond_C = 30
T_cond = T_cond_C + 273.15
T_evaps_C = [round(t, 1) for t in np.arange(-25, -9.9, 2.5)]
preco_energia = 0.14 # USD/kWh

# Rendimento por viscosidade
def rendimento_por_viscosidade(viscosidade_vapor):
    rendimento_base = 1.0
    fator_visc = 1.5e4
    rendimento = rendimento_base - fator_visc *
viscosidade_vapor
    return max(0.5, min(rendimento, 1.0))

# Resultados
dados_resultados = []

for T_evap_C in T_evaps_C:
```

```

T_evap = T_evap_C + 273.15

for fluido, props in refrigerantes.items():
    try:
        P_evap = CP.PropsSI("P", "T", T_evap, "Q", 1,
fluido)
        P_cond = CP.PropsSI("P", "T", T_cond, "Q", 0,
fluido)
        h1 = CP.PropsSI("H", "T", T_evap, "Q", 1, fluido)
        s1 = CP.PropsSI("S", "T", T_evap, "Q", 1, fluido)
        viscosidade = CP.PropsSI("VISCOSITY", "T", T_evap,
"Q", 1, fluido)

        eff_isentropica = props["eficiencia_isentropica"]
        rendimento_visc =
rendimento_por_viscosidade(viscosidade)
        eficiencia_total = eff_isentropica * rendimento_visc

        h2s = CP.PropsSI("H", "P", P_cond, "S", s1, fluido)
        h2 = h1 + (h2s - h1) / eficiencia_total
        w_in = h2 - h1

        h3 = CP.PropsSI("H", "P", P_cond, "Q", 0, fluido)
        h4 = h3
        q_in = h1 - h4
        COP = q_in / w_in

        energia_kWh = (w_in * massa) / 3600000
        custo_energia = energia_kWh * preco_energia
        custo_fluido = props["preco_kg"] * massa
        custo_total = custo_energia + custo_fluido

        ciclos = (massa * 1000) / (q_in / 1_000) # ciclos =
1000 g / energia útil por ciclo

```

```

        dados_resultados.append({
            "Refrigerante": props["nome"],
            "Fluido": fluido,
            "T_evap_°C": T_evap_C,
            "COP": round(COP, 3),
            "Energia_kW": round(w_in / 3600, 4),
            "Trabalho_kJ": round(w_in / 1000, 2),
            "Calor_util_kJ": round(q_in / 1000, 2),
            "Viscosidade_Pa.s": round(viscosidade, 7),
            "Rendimento_visc": round(rendimento_visc, 3),
            "Eficiência_total": round(eficiencia_total, 3),
            "Custo_energia_USD": round(custo_energia, 4),
            "Custo_fluido_USD": round(custo_fluido, 2),
            "Custo_total_USD": round(custo_total, 4),
            "Ciclos_por_1kg": round(ciclos, 1)
        })

    except Exception as e:
        print(f"Erro com {fluido} em {T_evap_C}°C: {e}")

# Salvar em Excel
df = pd.DataFrame(dados_resultados)
df.to_excel("resultados_refrigerantes.xlsx", index=False)
print("Arquivo 'resultados_refrigerantes.xlsx' criado.")

# Gráficos
plt.style.use('ggplot')
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(14, 10))

for fluido, grupo in df.groupby("Fluido"):
    axs[0,0].plot(grupo["T_evap_°C"], grupo["COP"], marker='o',
label=fluido)

```

```

    axs[0,1].plot(grupo["T_evap_°C"], grupo["Custo_total_USD"],
marker='o', label=fluido)

    axs[1,0].plot(grupo["T_evap_°C"], grupo["Ciclos_por_1kg"],
marker='o', label=fluido)

    axs[1,1].plot(grupo["T_evap_°C"], grupo["Energia_kW"],
marker='o', label=fluido)

# Títulos e ajustes
axs[0,0].set_title("COP vs T_evap (°C)")
axs[0,1].set_title("Custo Total (USD) vs T_evap (°C)")
axs[1,0].set_title("Ciclos por 1 kg vs T_evap (°C)")
axs[1,1].set_title("Energia consumida (kW) vs T_evap (°C)")

for ax in axs.flat:
    ax.set_xlabel("Temperatura de Evaporação (°C)")
    ax.legend()
    ax.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

```

Apêndice-C

Análise energética dos Refrigerantes (R1233zd(E) & R717)

Refrigerante	Tev(C)	COP	Wcomp[kJ]	Q_útil[kJ]	n	Custo do fluido [USD]	Custo E_kW [USD]	Ciclos
R717	-25	2,571	423,47	1088,93	0,718	4	0,0165	0,9
R1233zd(E)	-25	2,264	444,48	1006,34	0,621	40	0,117	6,7
R717	-22,5	2,750	397,24	1092,42	0,717	4	0,0154	0,9
R1233zd(E)	-22,5	2,418	414,61	1002,672	0,620	40	0,1043	6,6
R717	-20	2,947	371,90	1095,83	0,716	4	0,0145	0,9
R1233zd(E)	-20	2,588	385,84	998,66	0,619	40	0,0975	6,5
R717	-17,5	3,164	347,40	1099,17	0,717	4	0,0135	0,9
R1233zd(E)	-17,5	2,776	358,14	994,368	0,618	40	0,09024	6,4
R717	-15	3,406	323,70	1102,43	0,714	4	0,0126	0,9
R1233zd(E)	-15	2,986	336,77	1005,44	0,617	40	0,0819	6,4
R717	-12,5	3,676	300,76	1105,61	0,713	4	0,0117	0,9
R1233zd(E)	-12,5	3,219	310,84	1000,692	0,616	40	0,0756	6,3
R717	-10	3,98	278,55	1108,7	0,712	4	0,0108	0,9
R1233zd(E)	-10	3,483	285,84	999,596	0,615	40	0,0694	6,2

Da tabela;

R717: Amônia;

Tev: Temperatura de evaporação em (C);

Wcomp: Trabalho do compressor em [kJ];

Q_útil: Calor removido [kJ];

n: eficiência;

COP: Coeficiente de performance/desempenho.

Apêndices-D

Fluxos de Produção - 1 kg de R-1233zd

- 01) 1. Extracção de matérias-primas | Entrada | Sal marinho: 2.0 kg | Tipo: matéria-prima
- 02) 1. Extracção de matérias-primas | Entrada | Fluor etanos: 3.5 kg | Tipo: matéria-prima
- 03) 1. Extracção de matérias-primas | Entrada | Electricidade para electrólise: 5.2 MJ |
Tipo: energia |
- 04) 1. Extracção de matérias-primas | Saída | Cloro: 1.0 kg | Tipo: intermediário |
- 05) 1. Extracção de matérias-primas | Saída | Trifluoropropeno: 1.2 kg | Tipo: intermediário
- 06) 1. Extracção de matérias-primas | Saída | CO2: 1.1 kg | Tipo: emissão | Destino: ar
- 07) 1. Transporte de matérias-primas | Entrada | Diesel: 23.16 MJ | Tipo: energia |
- 08) 1. Transporte de matérias-primas | Entrada | Distância de transporte: 500.0 km | Tipo:
transporte |
- 09) 1. Transporte de matérias-primas | Saída | CO2 transporte: 0.7 kg | Tipo: emissão |
Destino: ar
- 10)
- 11) 2. Síntese química | Entrada | Cloro: 1.0 kg | Tipo: intermediário |
- 12) 2. Síntese química | Entrada | Trifluoropropeno: 1.2 kg | Tipo: intermediário |
- 13) 2. Síntese química | Entrada | Catalisador: 0.05 kg | Tipo: matéria-prima |
- 14) 2. Síntese química | Entrada | Electricidade: 9.5 MJ | Tipo: energia |
- 15) 2. Síntese química | Saída | R-1233zd bruto: 1.05 kg | Tipo: intermediário |
- 15) 2. Síntese química | Saída | Resíduos orgânicos: 0.1 kg | Tipo: resíduo para
tratamento |
- 16) 2. Síntese química | Saída | CO2 processo: 3.8 kg | Tipo: emissão | Destino: ar
- 17) 2. Síntese química | Saída | Resíduos líquidos: 0.05 kg | Tipo: emissão | Destino: água

18)

19) 3. Purificação e separação | Entrada | R-1233zd bruto: 1.05 kg | Tipo: intermediário |

20) 3. Purificação e separação | Entrada | Energia térmica: 4.2 MJ | Tipo: energia |

21) 3. Purificação e separação | Saída | R-1233zd puro: 1.0 kg | Tipo: intermediário |

22) 3. Purificação e separação | Saída | Subprodutos leves: 0.05 kg | Tipo: resíduo para tratamento |

23) 3. Purificação e separação | Saída | CO2 purificação: 1.5 kg | Tipo: emissão | Destino: ar

24) 3. Envase e armazenamento | Entrada | R-1233zd puro: 1.0 kg | Tipo: intermediário |

25) 3. Envase e armazenamento | Entrada | Aço (cilindro): 1.0 kg | Tipo: matéria-prima |

26) 3. Envase e armazenamento | Entrada | Electricidade envase: 1.2 MJ | Tipo: energia

27) 3. Envase e armazenamento | Saída | R-1233zd envasado: 1.0 kg | Tipo: produto final

28) 3. Envase e armazenamento | Saída | CO2 envase: 0.3 kg | Tipo: emissão | Destino: ar

29)

30) 4. Transporte do produto | Entrada | Diesel: 90,5L | Tipo: Combustível | Destino: -

31) 4. Transporte do produto | Entrada | Distância de transporte: 5250.0 km | Tipo: transporte |

32) 4. Transporte do produto | Saída | CH4 transporte: 0,0019 g | Tipo: emissão | Destino: ar

33) 4. Transporte do produto | Saída | N2O transporte: 0,0047 g | Tipo: emissão | Destino: ar

34) 4. Transporte do produto | Saída | NOx transporte: 1,289 g | Tipo: emissão | Destino: ar

35) 4. Transporte do produto | Saída | SO2 purificação: 0,2075 g | Tipo: emissão | Destino: ar

36) 4. Transporte do produto | Saída | Particulada purificação: 0,1723 g | Tipo: emissão | Destino: ar

37) 4. Transporte do produto | Saída | Resíduos purificação: 2,1375 g | Tipo: emissão |
Destino: água

Apêndices-E

Tabela de valores de impacto ambiental na extração de Matérias-primas para R717 e R1233zd(E)

Categoria de Impacto	Unidades	R1233zd(E)	R717
Aquecimento Global	<i>kg CO₂-eq</i>	6,30E-03	1,73E-03
Depleção do ozônio estratosfera	<i>kg CFC-11-eq</i>	1,43E-04	3,65E-05
Radiação ionizante	<i>kBq Co-60-eq</i>	2,40E-04	1,45E-05
Formação de ozônio (S.H)	<i>kg NO_x-eq</i>	4,95E-03	1,31E-03
Formação de partículas finas	<i>kg PM_{2.5}-eq</i>	2,58E-03	2,55E-04
Formação de ozônio (E.T)	<i>kg NO_x-eq</i>	5,89E-03	1,60E-03
Acidificação terrestre	<i>mol H⁺-eq</i>	4,20E-03	4,05E-04
Eutrofização da água	<i>kg P-eq</i>	1,71E-03	1,53E-04
Toxicidade não cancerígena	<i>CTUh</i>	4,59E-04	6,69E-06
Escassez de recursos minerais	<i>kg Cu-eq</i>	1,69E-06	5,13E-08
Escassez de recursos fósseis	<i>kg oil-eq</i>	9,05E-03	4,12E-03
Consumo de água	<i>m3</i>	1,42E-03	6,05E-04

Apêndices-F

Tabela de valores de impacto ambiental no Processamento e Produção de R717 e R1233zd(E)

Categoria de Impacto	Unidades	R1233zd(E)	R717
Aquecimento Global	<i>kg CO₂-eq</i>	0,00306	0,00209
Depleção do ozônio estratosfera	<i>kg CFC-11-eq</i>	6,31E-05	4,69E-05
Radiação ionizante	<i>kBq Co-60-eq</i>	9,29E-05	5,41E-05
Formação de ozônio (S.H)	<i>kg NO_x-eq</i>	0,00189	0,0031
Formação de partículas finas	<i>kg PM_{2.5}-eq</i>	0,00106	0,00433
Formação de ozônio (E.T)	<i>kg NO_x-eq</i>	0,00225	0,00369
Acidificação terrestre	<i>mol H⁺-eq</i>	0,00116	0,00173

Eutrofização da água	<i>kg P-eq</i>	0,000127	0,000569
Toxicidade não cancerígena	<i>CTUh</i>	0,000179	8,69E-06
Escassez de recursos minerais	<i>kg Cu-eq</i>	1,15E-06	6,80E-08
Escassez de recursos fósseis	<i>kg oil-eq</i>	0,0037	0,00282
Consumo de água	<i>m3</i>	0,00511	0,00252

Apêndices-G

Tabela de valores de impacto ambiental no Uso Operacional de R717 e R1233zd(E)

Categoria de Impacto	Unidades	R1233zd(E)	R717
Aquecimento Global	<i>kg CO₂-eq</i>	3,14E-03	2,13E-03
Depleção do ozônio estratosfera	<i>kg CFC-11-eq</i>	6,40E-05	4,80E-05
Radiação ionizante	<i>kBq Co-60-eq</i>	9,46E-05	5,57E-05
Formação de ozônio (S.H)	<i>kg NO_x-eq</i>	1,93E-03	3,15E-03
Formação de partículas finas	<i>kg PM_{2.5}-eq</i>	1,08E-03	4,63E-04
Formação de ozônio (E.T)	<i>kg NO_x-eq</i>	2,29E-03	3,76E-03
Acidificação terrestre	<i>mol H⁺-eq</i>	1,59E-03	8,00E-04
Eutrofização da água	<i>kg P-eq</i>	3,36E-04	7,81E-04
Toxicidade não cancerígena	<i>CTUh</i>	1,86E-04	5,29E-04
Escassez de recursos minerais	<i>kg Cu-eq</i>	1,16E-06	7,24E-08
Escassez de recursos fósseis	<i>kg oil-eq</i>	3,77E-05	1,91E-05
Consumo de água	<i>m3</i>	8,40E-04	3,64E-04

Apêndices-H

Tabela de valores de impacto ambiental na Deposição final de R717 e R1233zd(E)

Categoria de Impacto	Unidades	R1233zd(E)	R717
Aquecimento Global	<i>kg CO₂-eq</i>	0,00314	0,00207
Depleção do ozônio estratosfera	<i>kg CFC-11-eq</i>	6,97E-05	4,68E-05
Radiação ionizante	<i>kBq Co-60-eq</i>	0,000123	5,51E-05
Formação de ozônio (S.H)	<i>kg NO_x-eq</i>	0,002	0,00306

Formação de partículas finas	<i>kg PM_{2.5}-eq</i>	0,00115	0,000434
Formação de ozônio (E.T)	<i>kg NO_x-eq</i>	0,00237	0,00365
Acidificação terrestre	<i>mol H⁺-eq</i>	0,00162	0,000746
Eutrofização da água	<i>kg P-eq</i>	0,000921	0,000175
Toxicidade não cancerígena	<i>CTUh</i>	0,000174	9,02E-06
Escassez de recursos minerais	<i>kg Cu-eq</i>	1,11E-06	6,78E-08
Escassez de recursos fósseis	<i>kg oil-eq</i>	0,00398	0,00278
Consumo de água	<i>m³</i>	0,000526	0,0015

Apêndice-H

Tabela de valores de impacto ambiental nas diferentes etapas do ciclo de vida de R717 e R1233zd(E)

Categoria de Impacto	Extracção		Processamento e Produção		Uso Operacional		Deposição final	
	R1233zd(E)	R717	R1233zd(E)	R717	R1233zd(E)	R717	R1233zd(E)	R717
Aquecimento Global	6,30E-03	1,73E-03	0,00306	0,00209	3,14E-03	2,13E-03	0,00314	0,00207
Depleção do ozónio estratosfera	1,43E-04	3,65E-05	6,31E-05	4,69E-05	6,40E-05	4,80E-05	6,97E-05	4,68E-05
Radiação ionizante	2,40E-04	1,45E-05	9,29E-05	5,41E-05	9,46E-05	5,57E-05	0,000123	5,51E-05
Formação de ozónio (S.H)	4,95E-03	1,31E-03	0,00189	0,0031	1,93E-03	3,15E-03	0,002	0,00306
Formação de partículas finas	2,58E-03	2,55E-04	0,00106	0,00433	1,08E-03	4,63E-04	0,00115	0,000434
Formação de ozónio (E.T)	5,89E-03	1,60E-03	0,00225	0,00369	2,29E-03	3,76E-03	0,00237	0,00365
Acidificação terrestre	4,20E-03	4,05E-04	0,00116	0,00173	1,59E-03	8,00E-04	0,00162	0,000746
Eutrofização da água	1,71E-03	1,53E-04	0,000127	0,000569	3,36E-04	7,81E-04	0,000921	0,000175
Toxicidade não cancerígena	4,59E-04	6,69E-06	0,000179	8,69E-06	1,86E-04	5,29E-04	0,000174	9,02E-06
Escassez de recursos minerais	1,69E-06	5,13E-08	1,15E-06	6,80E-08	1,16E-06	7,24E-08	1,11E-06	6,78E-08
Escassez de recursos fósseis	9,05E-03	4,12E-03	0,0037	0,00282	3,77E-05	1,91E-05	0,00398	0,00278
Consumo de água	1,42E-03	6,05E-04	0,00511	0,00252	8,40E-04	3,64E-04	0,000526	0,0015

ANEXOS