



ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA PROJETO MADOQUAPOWER2X

RELATÓRIO TÉCNICO

dezembro 2024

Elaborado por:

3drivers
QUADRANTE

Para:


MADOQUA

FICHA TÉCNICA

Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida do projeto MadoquaPower2X – Relatório Técnico

Promotor Madoqua Power 2X



Autoria 3Drivers – Engenharia, Inovação e Ambiente S.A.

Equipa de trabalho António Lorena
Mariana Canhoto
Sofia Carvalho

23 de dezembro de 2024

Imagem de capa: unsplash.com

© 3drivers 2024

Disclaimer

As informações contidas neste documento são confidenciais e de propriedade da 3drivers, sendo que as conclusões expressas podem não coincidir necessariamente com a posição oficial da Madoqua Power 2X. A reprodução total ou parcial deste documento está limitada à sua utilização para sua avaliação pela Madoqua Power 2X. Não poderão ser fornecidas cópias totais ou parciais a outras entidades, para além da Madoqua Power 2X, sem autorização prévia da 3drivers.

ÍNDICE

Nomenclatura.....	v
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do Estudo	1
1.3 Abordagem metodológica	1
1.4 Revisão de Literatura	2
2 Introdução metodológica	7
2.1 Análise de Ciclo de Vida	7
2.2 Definição dos objetivos e âmbito.....	8
2.3 Análise de inventário	9
2.4 Avaliação do impacto	11
2.5 Interpretação	13
2.6 Ferramentas de apoio à ACV.....	14
3 Definição da abordagem de ACV	15
3.1 Objetivos da ACV.....	15
3.1.1 Aplicações pretendidas.....	15
3.1.2 Motivação e Público-Alvo	15
3.1.3 Equipa Responsável pelo Estudo	15
3.2 Definição de Âmbito	15
3.2.1 Descrição do sistema e dos cenários de análise	15
3.2.2 Unidade Funcional	16
3.2.3 Fronteiras do Sistema	16
3.2.4 Representatividade tecnológica, geográfica e temporal	18
3.2.5 Critérios de <i>cut-off</i>	18
3.2.6 Metodologia e critérios para os Inventários de Ciclo de Vida	18
3.2.7 Critérios para a Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida	19
4 Análise de Inventário de Ciclo de Vida	21
4.1 Dados e pressupostos do inventário do ciclo de vida	21
4.1.1 Consumo de matérias-primas e materiais.....	21
4.1.2 Consumo de energia	22
4.1.3 Consumo de água	23

4.1.4	Produção e tratamento de resíduos.....	23
4.1.5	Emissões atmosféricas.....	24
4.2	Inventários de Ciclo de Vida dos Cenários	24
5	Avaliação de impactes da produção de amoníaco	26
6	Considerações Finais.....	29
	Referências	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Processos de produção de amoníaco com base nas origens do hidrogénio **Error! Bookmark not defined.**

Figura 2. Fases e objetivos da ACV e interação entre estas	8
Figura 3. Exemplo de modelo de avaliação de impacte ambiental – ReCiPe	13
Figura 4. Definição das fronteiras do sistema do cenário SMR	17
Figura 5. Definição das fronteiras do sistema dos cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50	17
Figura 6. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria ‘Aquecimento Global’	26
Figura 7. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria ‘Escassez de Recursos Fósseis’	26
Figura 8. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria ‘Escassez de Recursos Minerais’	27
Figura 9. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria ‘Consumo de Água’	27
Figura 10. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco nas categorias de impacte ‘Aquecimento Global’, ‘Escassez de recursos fósseis’ e ‘Consumo de Água’ (normalização)	28
Figura 11. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria de impacte ‘Escassez de recursos minerais’ (normalização)	28

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Resumo das atividades e ações realizadas no Projeto.....	2
Tabela 2. Critérios de representatividade tecnológica e geográfica para o ICV	18
Tabela 3. Categorias de impacte do método ReCiPe.....	19
Tabela 4. Identificação das matérias-primas e materiais que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50)	21
Tabela 5. Perfil de produção de eletricidade em Portugal em 2023 (Fonte: REN)	22
Tabela 6. Pressupostos de adaptação dos processos de produção de energia para a realidade nacional	22
Tabela 7. Identificação dos combustíveis que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50)	23

Tabela 8. Identificação dos fluxos de resíduos e respetivo tratamento que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50).....	23
Tabela 9. Identificação dos fluxos de resíduos e respetivo tratamento que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50).....	24
Tabela 10. Dados de inventário dos cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50 (unidade funcional=1 t NH ₃ produzida)	25

NOMENCLATURA

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AIA	Avaliação de Impacte Ambiental
AICV	Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida
APA, I.P.	Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (Captura e Armazenamento de Carbono)
EIA	Estudo de Impacte Ambiental
GWP	Potencial de Aquecimento Global
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A produção de amoníaco (NH_3) desempenha um papel central em diversas cadeias de valor, desde a agricultura até à indústria química, mas está tradicionalmente associada a processos intensivos em emissões de carbono devido à utilização de hidrogénio (H_2) proveniente de fontes fósseis. Neste contexto, a transição para a produção de NH_3 a partir de H_2 renovável surge como uma solução estratégica para redução das emissões associadas aos setores que lhe estão relacionados.

Uma das ferramentas mais utilizadas para analisar o desempenho ambiental de produtos e processos industriais é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta metodologia científica, amplamente reconhecida a nível internacional, permite quantificar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida, desde a obtenção das matérias-primas, passando pelo processamento, até à utilização e ao fim de vida.

A Madoqua Power 2X, comprometida com o desenvolvimento de soluções de H_2 verde, promoveu o presente estudo de ACV da sua unidade de produção de NH_3 a partir de H_2 renovável, que fornece uma análise detalhada dos impactos ambientais associados à operação da unidade, permitindo destacar as mais-valias do Projeto face a cenários alternativos de produção de amoníaco.

1.2 Objetivos do Estudo

O presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma ACV focada em identificar, quantificar e analisar os impactos mais significativos da unidade de produção de NH_3 da Madoqua Power2X a partir de H_2 renovável, enquadrando o desempenho ambiental do Projeto comparativamente a outros cenários de produção de NH_3 . No contexto do Estudo de Impacte Ambiental (EIA) do Projeto, o estudo de ACV pode contribuir para estender o âmbito da análise para uma perspetiva de ciclo de vida e a valorar aspetos como os impactos evitados. O estudo tem como objetivos específicos:

- Estimar e analisar comparativamente os impactos ambientais dos diferentes cenários de produção de NH_3 ;
- Identificar os *hotspots* no processo produtivo do Projeto e analisar os parâmetros críticos que influenciam a viabilidade ambiental da sua fase de exploração, em alinhamento com os resultados do EIA.

1.3 Abordagem metodológica

De forma a cumprir com os objetivos estabelecidos no estudo descritos, foi seguida a abordagem metodológica apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo das atividades e ações realizadas no Projeto

Atividade	Descrição
1. Definição metodológica inicial	Teve como objetivo a definição inicial da metodologia de ACV a utilizar na avaliação. Foram rigorosamente estabelecidos e caracterizados os objetivos e âmbito da avaliação, bem como os critérios a observar nas várias fases da ACV realizada, nomeadamente, Inventário de Ciclo de Vida (ICV), Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida (AICV) e interpretação de resultados.
2. Compilação de Dados de Inventário	Teve como objetivo a compilação das entradas e saídas dos processos unitários associados ao sistema em análise, abrangendo fases do ciclo de vida dos produtos e processos não controladas diretamente pela Madoqua Power 2X (por exemplo, produção de matérias-primas e materiais e tratamento de resíduos). Estes dados foram depois sistematizados no chamado ICV.
3. Modelação e Avaliação dos Impactes	Teve como objetivo a avaliação dos impactes dos sistemas em avaliação (fase de AICV), com base nos dados compilados no inventário e com base em metodologias tipificadas e desenvolvidas por entidades reconhecidas que permitem traduzir inventários em impactes em várias categorias (e.g., alterações climáticas, depleção de recursos abióticos).
4. Interpretação de Resultados	Para validação da interpretação de resultados foi realizado um controlo de integralidade e de coerência ao modelo de ACV desenvolvido e foram identificadas e caracterizadas as questões significativas associadas ao sistema em análise.

O presente documento constitui o relatório técnico do Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida da Unidade de Produção de NH_3 a partir de H_2 renovável da Madoqua Power 2X, que complementa o EIA do Projeto.

1.4 Revisão de Literatura

O amoníaco desempenha um papel crucial na economia global, pois é amplamente utilizado na produção de fertilizantes agrícolas, sendo estimado que mais de 80% do NH_3 produzido mundialmente é destinado a esse fim. Além da agricultura, o NH_3 é um componente essencial na produção de outros produtos, como o ácido nítrico (para o fabrico de explosivos), poliamidas (para o fabrico de têxteis) e produtos farmacêuticos e de limpeza (Jabarivelisdeh et al., 2022). Além disso, o NH_3 apresenta perspectivas promissoras como vetor energético, devido ao seu elevado teor em H_2 na sua composição, permitindo o seu uso no armazenamento e transporte de energia. Também a ausência de átomos de carbono na sua composição, faz deste composto um combustível atrativo para a produção de energia, uma vez que a sua combustão resulta principalmente em água e azoto (Bicer et al., 2017; Ghavam et al., 2021; IAR, 2008).

Sendo um dos químicos mais produzido no mundo, a sua síntese está frequentemente associada a elevados consumos de energia fóssil e a emissões significativas de CO_2 . Em 2020, a produção global de NH_3 foi responsável por um consumo energético de 8,6 EJ, o que representa cerca de 2% do consumo de energia global. Deste total, aproximadamente 40% foi consumido como matéria-prima e o restante como energia de processo. O gás natural representou cerca de 70% da energia consumida para o fabrico de NH_3 , seguido do carvão com 26%, da eletricidade com 3%, e do petróleo com 1%. Estes dados evidenciam a necessidade de descarbonizar esta cadeia produtiva, dada a sua atual dependência de combustíveis fósseis, os quais contribuem significativamente para elevadas emissões de CO_2 (IEA, 2021).

A produção de NH_3 pode ser esquematizada de acordo com a pegada de carbono de cada processo produtivo, refletindo-se num espectro de cores de NH_3 , conforme ilustrado na Figura 1. O NH_3 cinzento e o NH_3 castanho referem-se às formas convencionais de produção: a primeira utiliza gás natural como matéria-prima no *Steam Methane Reforming* (SMR), enquanto a segunda é produzida a partir do carvão gaseificado, estando ambos os processos associados a emissões de CO_2 consideráveis. Alternativas mais sustentáveis incluem o NH_3 azul, turquesa e verde. O NH_3 azul, embora também derive de H_2 cinzento ou castanho, integra tecnologias de captura e armazenamento de carbono (*Carbon Capture and Storage* - CCS). O NH_3 turquesa, cuja produção se baseia na pirólise do gás natural, decompõe o metano em H_2 e carbono sólido, permitindo que o carbono seja armazenado ou utilizado para outras aplicações, e evitando a emissão como CO_2 para a atmosfera. Por outro lado, o NH_3 verde utiliza H_2 obtido por eletrólise da água, resultando em emissões nulas de CO_2 no caso de a eletrólise ser alimentada 100% a energia renovável (Mohamed et al., 2024).

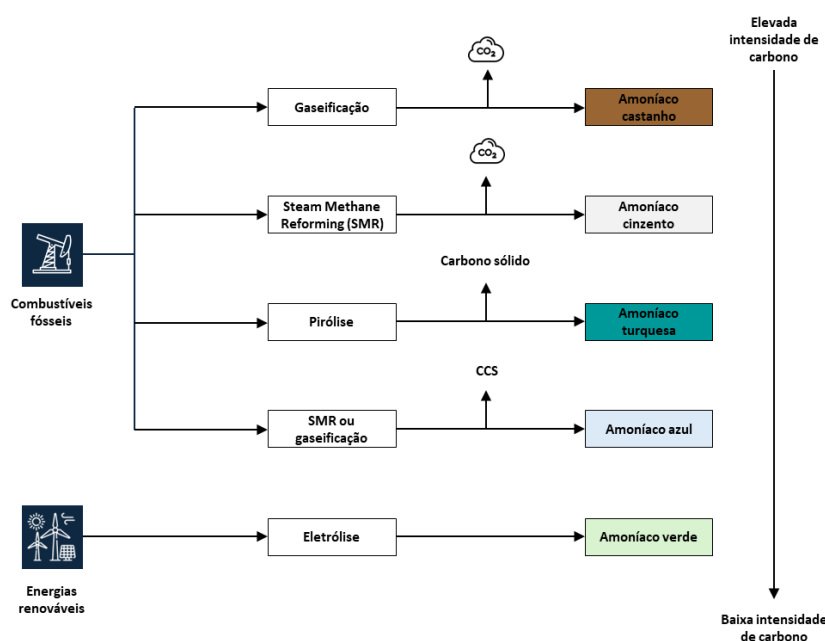


Figura 1. Processos de produção de amoníaco com base nas origens do hidrogênio
Fonte: Adaptado de Mohamed et al. (2024)

O método mais utilizado para a síntese de NH_3 é a partir de gás natural (70% da produção global), através do processo de SMR para a produção de H_2 , seguido do processo de *Haber-Bosch*, que utiliza azoto e hidrogênio como matérias-primas principais (Boyce et al., 2024; IEA, 2021). Estima-se que, por via de SMR, o processo emita cerca de 2,1 toneladas de CO_2 eq por tonelada de NH_3 produzida. Além disso, o processo requer uma elevada quantidade de energia, cerca de 28-35 GJ por tonelada de NH_3 produzida (Jabarivelisdeh et al., 2022).

Embora os métodos convencionais para a produção do NH_3 ainda dominem a sua produção, têm sido feitos avanços significativos no sentido de encontrar vias de produção mais sustentáveis e eficientes.

O NH_3 azul incorpora tecnologias de CCS, reduzindo assim as emissões de CO_2 associadas ao processo. Esta abordagem é considerada uma solução rapidamente disponível para descarbonizar a produção de

NH_3 , uma vez que aproveita as infraestruturas existentes de produção via SMR ou gaseificação. Estima-se que o NH_3 azul consiga reduzir as emissões de CO_2 até 55-70%, quando comparado ao processo convencional. No entanto, a implementação desta solução requer infraestruturas de CCS e uma monitorização rigorosa das potenciais fugas de gás durante o processo (Mohamed et al., 2024).

Uma das tecnologias com impactes ambientais globais mais reduzidos é a produção de NH_3 verde a partir de H_2 produzido por eletrólise da água, alimentada por energia renovável, como solar e/ou eólica. Existe também o conceito de NH_3 amarelo, que também utiliza H_2 produzido por eletrólise da água, mas alimentada por energia proveniente da rede elétrica. Neste caso, o impacte ambiental do processo varia conforme o *mix* energético do país, isto é, varia com a proporção de energia renovável presente na eletricidade disponível na rede (Boyce et al., 2024). A eletrólise da água para a produção de H_2 representa uma alternativa promissora, especialmente quando alimentada por fontes renováveis. No entanto, este método apresenta também alguns desafios, tais como o consumo intensivo de água pura e desionizada para alimentar o eletrolisador (Ghavam et al., 2021). Além disso, a eletrólise é também exigente a nível energético, necessitando cerca de 37,3 GJ por tonelada de NH_3 produzida (Jabarivelisdeh et al., 2022). O catalisador convencionalmente usado na síntese do NH_3 é à base de ferro, o que torna o processo mais intensivo em energia devido às elevadas temperaturas e pressões de trabalho que o catalisador exige. Neste sentido, estão a ser desenvolvidos esforços para o desenvolvimento de catalisadores mais sustentáveis que permitam operar a temperaturas e pressões mais baixas, com maior durabilidade e estabilidade (Bora et al., 2024). No entanto, a eletrólise está também dependente de outros recursos para além da eletricidade, nomeadamente matérias-primas críticas para os eletrolisadores, cuja escassez pode limitar o crescimento desta tecnologia. Kiemel et al. (2021) avalia como o uso de materiais críticos em eletrolisadores pode enfrentar desafios devido à disponibilidade limitada de matérias-primas como a platina, irídio, escândio e ítrio, considerando o aumento esperado da produção destes equipamentos impulsionado pela crescente procura por hidrogénio verde. Os autores avaliam também a reciclagem de eletrolisadores em fim de vida como uma estratégia para reduzir a dependência de recursos primários. É ainda destacado que os materiais identificados como críticos são principalmente usados em eletrolisadores PEM (*Proton exchange membrane*) e de alta temperatura, enquanto os eletrolisadores alcalinos, por sua vez, não enfrentam riscos significativos de fornecimento de materiais.

Outra tecnologia emergente é a gaseificação da biomassa para a produção de H_2 posteriormente usado para a síntese de NH_3 . Contudo, este processo enfrenta desafios relacionados com a baixa densidade energética da biomassa em comparação com os combustíveis fósseis, o que exige o transporte de volumes maiores de biomassa para obter a mesma quantidade de energia que seria fornecida por combustíveis fósseis, podendo tornar o processo menos competitivo do ponto de vista económico (Ghavam et al., 2021).

Existem vários estudos da literatura com foco em ACV de processos de produção de NH_3 . Mohamed et al. (2024) apresentam uma revisão das publicações mais recentes que utilizam a ACV como ferramenta para quantificar os impactes ambientais na produção de NH_3 . Segundo os autores, a produção de NH_3 a partir de carvão é o método menos sustentável, enquanto o NH_3 verde apresenta os menores impactes ambientais, apesar de enfrentar desafios relacionados à escalabilidade e viabilidade económica. É ainda destacado que uma parte significativa dos estudos recentes adota uma abordagem *cradle-to-gate*, concentrando-se na fase de produção, sendo identificada a necessidade de expandir as fronteiras para uma abordagem *cradle-to-grave*, incluindo as fases de tratamento final. Além disso, os autores enfatizam

que os resultados dos estudos de ACV variam dependendo de pressupostos como fronteiras do sistema, vias de produção, *mix* energético e cadeia de abastecimento.

Liu et al. (2020) reforçam a importância do grau de descarbonização da eletricidade utilizada para alimentar os eletrolisadores para a produção de NH_3 , indicando que o impacto ambiental do processo pode ser substancialmente reduzido se a eletricidade for proveniente de fontes 100% renováveis. Os autores destacam ainda a necessidade de mitigar a intermitência das fontes renováveis para garantir um fornecimento de energia estável.

Ghavam et al. (2021) fazem uma análise comparativa de ACV sobre métodos de produção de NH_3 , destacando que a produção de H_2 por eletrólise da água enfrenta barreiras principalmente devido à elevada necessidade de água para o processo.

Mayer et al. (2023) fazem uma análise das perspectivas técnico-económicas e de ciclo de vida da produção de NH_3 azul e verde, concluindo que o NH_3 azul pode competir com o verde, desde que as fugas de gás sejam inferiores a 0,2%, condição necessária para que os impactos climáticos sejam equiparáveis aos da produção baseada em energia solar. Adicionalmente, o NH_3 azul apresenta menores impactos em 11 de 15 categorias analisadas, à exceção das alterações climáticas, quando comparada ao NH_3 verde. Os autores destacam ainda que a sustentabilidade da produção de NH_3 verde e azul pode ser significativamente melhorada com avanços nas tecnologias de eletrólise e CCS.

Segundo o estudo de Boyce et al. (2024), que aborda a ACV de cenários globais de descarbonização do NH_3 , o NH_3 produzido por gaseificação do carvão apresenta maiores impactos ambientais. Por outro lado, o processo com menor impacto na categoria de alterações climáticas é a eletrólise com energia renovável, seguido do SMR com CCS. O estudo destaca que a eletrólise com eletricidade proveniente de fontes renováveis é a tecnologia mais promissora, embora a escassez de materiais críticos necessários para os eletrolisadores possa limitar a sua implementação. Além disso, o autor enfatiza a relevância de manter os estudos de ACV atualizados, especialmente importante para tecnologias emergentes, e reforça a necessidade de pesquisas complementares sobre materiais críticos associados a estas tecnologias.

Singh et al. (2018) apresentam uma análise aprofundada de ACV sobre métodos de produção de NH_3 , utilizando os métodos CML 2001 e Eco-indicator 99, avaliando seis categorias de impacto para cada metodologia. O estudo analisa sete processos produtivos de NH_3 : SMR, eletrólise alimentada por energia solar, eletrólise alimentada por energia eólica, gaseificação do carvão (com e sem CCS) e produção de NH_3 a partir da gaseificação da biomassa (por dois processos distintos). Os resultados indicam que a gaseificação de carvão sem CCS apresenta o maior Potencial de Aquecimento Global (GWP). Na categoria de depleção de recursos naturais, os métodos de produção de NH_3 baseados em gás natural demonstram impactos mais significativos. Os autores apontam também que a eletrólise alimentada por energia fotovoltaica apresenta valores elevados para as categorias de acidificação, eutrofização e toxicidade humana, atribuídos à utilização de materiais com elevados impactos ambientais associados no fabrico das células solares fotovoltaicas. Além disso, o estudo revela que os painéis solares possuem uma eficiência limitada e que é necessária uma quantidade significativa de unidades para atender às necessidades energéticas do processo, levando à ocupação de grandes áreas. Em contrapartida, a produção de NH_3 por eletrólise da água alimentada por energia eólica é identificada como uma solução viável para unidades de produção descentralizadas. Por fim, o método considerado com menor impacto ambiental é a produção

de NH_3 a partir de H_2 proveniente da gaseificação da biomassa. Os autores concluem que a utilização de processos de produção de NH_3 que utilizem fontes de energia renovável e a melhoria da eficiência dos equipamentos (no caso particular dos painéis solares) contribuem para a redução da pegada ambiental global da produção de NH_3 . No entanto, o elevado custo da eletricidade renovável ainda representa um desafio, podendo atrasar ou dificultar a implementação de métodos sustentáveis emergentes.

2 INTRODUÇÃO METODOLÓGICA

O presente capítulo estabelece as bases conceituais e práticas da metodologia de ACV, introduzindo conceitos fundamentais, como a unidade funcional, as fases da ACV, as melhores práticas, entre outros aspectos.

2.1 Análise de Ciclo de Vida

A ACV é uma metodologia que permite a análise e quantificação do impacto ambiental de um produto, processo ou sistema. Por princípio, esta análise inclui toda a vida do objeto de estudo, desde o seu início até o final de vida, passando por todas as etapas intermediárias, como produção, transporte e uso. É possível realizar também ACV reduzindo o âmbito de análise, excluindo, por exemplo, a fase de uso e fim-de-vida (*cradle-to-gate*, em oposição a *cradle-to-grave*).

Esta metodologia pode ser utilizada com vários objetivos, nomeadamente, para comparar o impacto ambiental de diferentes produtos ou processos com função semelhante, otimização do desempenho ambiental de um produto ou processo, ou ainda como instrumento de apoio à decisão, entre outros. A definição dos objetivos da ACV faz parte da própria metodologia e serve para guiar as opções do executante (por exemplo, escolha da unidade funcional, definição do âmbito, análise de sensibilidade).

Uma das vantagens da ACV, em relação a outras metodologias de avaliação de impactos ambientais, é garantir que todos os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida são contabilizados, evitando assim o enviesamento a favor de soluções que transferem os impactos para outras fases. Para exemplificar, considera-se o caso dos veículos elétricos, em que se se concentra a análise na fase de utilização e no próprio veículo, resultam impactos muito reduzidos, já que estes estão a ocorrer a montante (na produção de eletricidade, por exemplo) ou a jusante (por exemplo, no fim de vida das baterias de íões de lítio).

Outra vantagem da ACV é a existência de uma norma dedicada. Os procedimentos da ACV são parte integrante da ISO 14000 - normas de gestão ambiental em empresas, desenvolvidas pela *International Organization for Standardization* (ISO) – sendo documentadas na norma ISO 14040:2006 e 14044:2006 (que substituiu as normas 14041 a 14043). De acordo com a norma ISO 14040, a ACV consiste em quatro fases interligadas:

1. definição de objetivos e âmbito,
2. análise de inventário,
3. avaliação do impacto, e
4. interpretação.

Estas fases estão interligadas entre si, tal como apresentado na Figura 2. Geralmente, esta análise é um procedimento iterativo, onde a experiência adquirida no final pode contribuir para melhorar as fases iniciais.

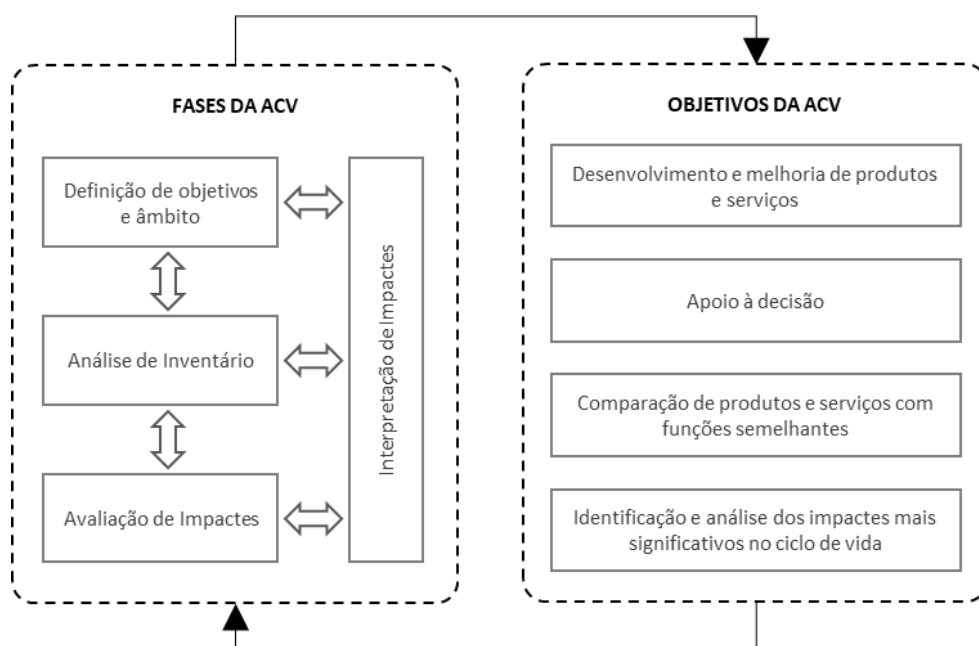


Figura 2. Fases e objetivos da ACV e interação entre estas

2.2 Definição dos objetivos e âmbito

O(s) objetivo(s) descreve(m) o propósito do estudo e para que tipo de ação servirão de suporte. A definição deste(s) é um passo fulcral, já que os resultados são fortemente dependentes da questão a ser respondida pelo estudo. Os seguintes pontos devem ser referenciados na definição do(s) objetivo(s):

- aplicação do estudo,
- razões para realizar o estudo, e
- destinatários dos resultados do estudo.

No âmbito de uma ACV deve-se especificar as características funcionais do objeto de estudo. A definição do âmbito deve conter os seguintes pontos:

- descrição do sistema estudado e unidade funcional,
- procedimentos fundamentais do estudo,
- critérios de avaliação, e
- exigência de dados.

A descrição do sistema estudado compreende uma análise do sistema do objeto de estudo, acompanhada por uma apresentação sucinta e clara. Os contextos temporais e espaciais do sistema são definidos de acordo com esta descrição do mesmo. Uma componente muito importante deste primeiro ponto trata-se da unidade funcional.

A unidade funcional fornece uma referência para relacionar os fluxos (*inputs* e *outputs*) ao sistema do objeto de estudo, devendo ser escolhida de forma a especificar a função do objeto de estudo e respetiva eficiência.

A definição dos procedimentos fundamentais do estudo é um passo essencial, pois é aqui que se descrevem hipóteses e regras gerais que são importantes para uma correta interpretação dos resultados do estudo. Pode-se incluir neste passo, por exemplo, a descrição do detalhe pretendido nos dados de inventário ou os critérios para se poder desprezar fluxos menos significativos (critérios de *cut-off*).

Na fase de avaliação de impactes é preciso definir os critérios que permitem converter os fluxos de saída em categorias de impactes ambientais (e.g., transformar emissões de CH₄ em alterações climáticas) e, opcionalmente, na normalização e agregação em categorias finais ou indicadores únicos de impacte. A comunidade académica e científica tem vindo a desenvolver os métodos de avaliação de impacte ambiental, melhorando e adequando face aos objetivos pretendidos e ao estado da arte em áreas como a toxicologia, a saúde pública, *stocks* de recursos, entre outras.

A exigência de dados consiste essencialmente na qualidade de resultados pretendida, podendo esta representar um obstáculo. Assim, deverá ser explicitada a qualidade pretendida, por exemplo, em termos de representatividade ou precisão.

2.3 Análise de inventário

Esta fase da ACV envolve a identificação e quantificação dos *inputs* e *outputs*, através da recolha e cálculo de informação, tendo em consideração as fronteiras de sistema definidas.

As fronteiras do sistema representam a separação deste com o ambiente envolvente. Aqui o ambiente é entendido como o limite externo da fronteira de análise, ou seja, os fluxos ocorrem de e para o ambiente, mas não são analisadas as transformações das matérias neste meio. Na definição das fronteiras do sistema há um compromisso entre tempo e recursos disponíveis e a qualidade de resultados do estudo. Como Ferrão (1998) afirma, não é possível efetuar uma ACV completa (devido à inexistência de dados, falta de tempo ou recursos), pelo que é necessário selecionar os processos unitários a modelar no estudo, de acordo com as nossas possibilidades e exigências, sem comprometer a qualidade dos resultados.

Esta definição de fronteiras pode ser mais complicada do que aparenta, pelo que geralmente sofre redefinições ao longo do estudo, à medida que se ganha sensibilidade para o sistema em questão. Contudo, há várias características funcionais que devem ser consideradas para uma correta definição de fronteiras, nomeadamente a utilização de recursos naturais, produção e utilização de energia (combustíveis, eletricidade e calor), tipo de utilizações e processos para disposição de resíduos, entre outros (Ferrão, 1998).

A representação do ciclo de vida do objeto de estudo, através de um diagrama de blocos, é importante para entender os processos unitários que constituem o sistema e como se interrelacionam. Para a elaboração deste diagrama, é necessária a identificação das fases relevantes do ciclo de vida, bem como os respetivos fluxos de massa e de energia que se estabelecem entre estas.

Os processos unitários que deverão ser modelados com maior detalhe são aqueles que representem, potencialmente, os maiores impactes ambientais e os que possam influenciar consideravelmente todo o sistema a jusante. Contudo, após obtenção de resultados, é fundamental rever a importância atribuída aos processos unitários, pois corre-se o risco de negligenciar processos importantes.

O passo seguinte consiste no planeamento efetivo da recolha de dados. Geralmente esta recolha é a fase mais dispendiosa, quer em recursos quer em tempo, pelo que uma correta estratégia pode ser muito importante para a qualidade do estudo. De acordo com o detalhe pretendido na definição do âmbito do estudo, deve-se tentar evitar cair no erro de considerar demasiados detalhes, já que isto provoca um aumento considerável nos recursos utilizados, sem melhorar muito os resultados do estudo.

A recolha de informação tem como objetivo estabelecer qualitativamente e quantitativamente os fluxos de matéria de cada processo unitário. Esta fase é, como foi referido, a que mais recursos consome. As fontes possíveis são extensas: consumidores, distribuidores, produtores, respetivas associações, entidades reguladoras, administrativas, comunidade científica (artigos, outros estudos de ACV, bibliografia), entre outras. No caso do presente estudo, foi possível recorrer aos dados de Projeto recolhidos e consolidados no âmbito do EIA.

Contudo, é importante referir que, complementarmente, os executantes de ACV utilizam bases de dados desenvolvidas propositadamente para a elaboração de ACV, por exemplo, a *Ecoinvent* ou *LCA Food DK*, para construir o inventário de ciclo de vida. É necessário fazer um balanço cuidadoso entre a recolha de dados específicos para o inventário e a utilização de processos de bases de dados de forma a não comprometer a precisão e interpretação do estudo e também a duração do mesmo.

Na eventualidade de inexistência de informação suficiente para um dado processo, dever-se-á recorrer a dados referentes a processos análogos, a extrapolações com base em balanços de massa ou energia, modelos numéricos ou qualquer outro método que o operador considere adequado. No limite, a não existência de informação deverá ser documentada para mais tarde ser revista.

A construção de bases de dados de Avaliação de Ciclo de Vida é uma área de desenvolvimento que tem vindo a crescer nas últimas décadas, complementando-se aquilo que são bases de dados mais abrangentes (por exemplo, *Ecoinvent*, *GaBI Database Content*, *European Reference Life Cycle Database*) com bases de dados específicas para determinados setores ou áreas de atividade (por exemplo, ARVI, que contém dados para a cadeia de compósitos de madeira e polímeros, ou *Agri-footprint*, que contém dados para o setor agroalimentar).

Deverão ser estabelecidos critérios para se poder desprezar fluxos menos significativos. Segundo a norma ISO 14044: 2006, poderão ser aplicados, em conjunto, critérios de contribuição mássica, energética e ambiental. Relativamente às contribuições de massa e energia, podem-se desprezar todas as entradas acumuladas que contribuam com uma fração inferior a valores pré-definidos (e.g. 10% para contribuições mássicas e 5% para energéticas) relativamente aos totais de entradas no sistema considerado. Relativamente a critérios de relevância ambiental, podem-se contabilizar entradas de matéria que contribuam para a emissão de substâncias com impactes considerados relevantes, numa fração superior a um valor pré-estabelecido relativamente ao total de emissão dessa mesma substância.

Finalmente, a informação deve ser toda processada, ou seja, compilada e organizada de forma a facilitar a leitura e a fase seguinte, a avaliação do impacte.

2.4 Avaliação do impacto

A avaliação do impacto é feita com base nos dados da análise de inventário. O efeito real de uma emissão de dada substância é dependente de muitas variáveis tornando a sua modelação demasiado complexa, pelo que tipicamente a avaliação é baseada no efeito potencial. Os fluxos são classificados de acordo com o efeito potencial em áreas (e.g., saúde pública ou recursos naturais) ou em categorias de impacto (e.g., alterações climáticas). Esta classificação e passos subsequentes são aqueles em que existe maior discricionariedade por parte do executante, pelo que é fundamental escolher criticamente e apresentar de forma explícita todos os pressupostos na fase de avaliação de impacto, como foi já referido.

A avaliação de impacto numa ACV inclui elementos indispensáveis, nomeadamente,

- a seleção das categorias de impacto, respetivos indicadores e modelos de caracterização,
- a atribuição dos resultados da análise de inventário às categorias de impacto (classificação), e
- o cálculo dos valores dos indicadores de impacto para cada categoria (caracterização);

e elementos opcionais, nomeadamente,

- cálculo da significância do indicador obtido para cada categoria relativamente à informação de referência (normalização),
- conversão e agregação dos indicadores obtidos nas várias categorias de impacto, recorrendo a fatores numéricos de ponderação (ponderação), e
- análise da fiabilidade dos valores obtidos para os indicadores das várias categorias (*data quality analysis*).

O primeiro passo na avaliação de impacto é a seleção de categorias de impacto. Estas categorias devem estabelecer uma ligação entre os potenciais impactos dos fluxos de matéria e os efeitos nas áreas relevantes (recursos naturais, saúde pública, etc.). Na fase de classificação, os dados da análise de inventário, ou seja, os fluxos de saída, são atribuídos às categorias de acordo com o seu impacto. Se uma dada substância contribui para várias categorias de impacto, tem que ser considerada nas várias categorias.

Após a classificação procede-se à caracterização, fase na qual se atribui um impacto potencial na(s) categoria(s) relevantes. Este impacto potencial é geralmente relativo a um fator dominante na categoria, como por exemplo, para a categoria de eutrofização é geralmente escolhido 1 kg de fosfato como referência. Estes impactos potenciais são multiplicados pela respetiva quantidade emitida, e os valores resultantes são somados por categoria, para se obter um valor para cada categoria.

Posteriormente à caracterização, é recomendável a apresentação do conjunto de valores dos indicadores das várias categorias de impacto para o produto – perfil ambiental do produto. Os resultados da análise de inventário que, por algum motivo, não são contabilizados na fase de avaliação de impacto, deverão também ser representados.

Relativamente aos elementos opcionais, é importante referir que estes são muito variáveis, já que têm uma forte componente subjetiva, principalmente na ponderação. A normalização do perfil ambiental traduz-se no quociente dos valores deste perfil por um valor de referência que é, geralmente, uma forma

de efeito por indivíduo, para um dado local e período (e.g. impacto médio de um cidadão europeu médio, na década de 90, na categoria pretendida). Assim, a normalização é realizada com base numa referência temporal e espacial, pelo que também está dependente do que quem realiza a ACV acha adequado.

A fase de ponderação procura a obtenção de um único valor sobre o impacto de um produto ou serviço, de forma a apoiar o decisor de forma mais objetiva. Obviamente, esta operação implica uma elevada subjetividade (principalmente dependente da sensibilidade do agente que realiza a ponderação), pelo que não é obrigatória. Na sua essência, consiste em atribuir valores de ponderação às diversas categorias ambientais, o que significa considerar uma certa categoria mais importante do que outra, no contexto do problema.

Por estas razões, a aplicação dos elementos de normalização e ponderação tem de ser consistente com o(s) objetivo(s) e âmbitos do estudo.

Dada a quantidade de pressupostos na fase de avaliação de impacto e a necessidade de os sustentar de forma científica, a prática generalizada é utilizar modelos de avaliação desenvolvidos pela comunidade académica e científica que fazem uso da melhor informação disponível. Só através do uso destes modelos padronizados é possível, de facto, comparar ACV de produtos ou serviços distintos e concluir sobre os impactos de cada, não obstante outras diferenças que possam existir (por exemplo, âmbito, unidade funcional).

A título de exemplo, na Figura 3 apresenta-se o modelo de avaliação do ReCIPe 2008¹, um modelo de avaliação de impacto que utiliza a informação do inventário de ciclo de vida e permite obter os impactos em categorias intermédias (método *midpoint*) ou em categorias finais (método *endpoint*). Como é prática generalizada destes métodos, as categorias *endpoint* são abrangentes e a sua utilidade é, essencialmente, permitir leituras aos não especialistas.

¹ Goedkoop, M., et al. (2009). ReCIPe 2008 - Report I: Characterisation. Netherlands: VROM.



Figura 3. Exemplo de modelo de avaliação de impacto ambiental – ReCiPe

2.5 Interpretação

No enquadramento de uma ACV, os resultados da avaliação de impactes e da análise de inventário são analisados e conclusões e recomendações são concretizadas. As normas ISO referem três elementos na interpretação:

- identificação dos problemas significativos,
- avaliação da sensibilidade e consistência dos resultados, e
- apresentação das conclusões e recomendações.

Para a identificação dos problemas significativos é necessário determinar as principais contribuições para cada categoria de impacto. Os dados da análise de inventário relevantes, que não são considerados pelas categorias de impacto, têm também de ser integrados neste elemento da interpretação. Seguindo a definição do âmbito, as contribuições podem também ser agrupadas por processo individual, fase do ciclo de vida ou mesmo pelo ciclo de vida. Com toda esta estruturação de informação, é possível estabelecer os principais problemas.

A avaliação dos resultados, de acordo com a norma ISO, engloba uma verificação da sensibilidade e consistência dos processos ou fases do ciclo de vida.

A sensibilidade é verificada através da variação de cenários para diferentes processos ou parâmetros (e.g. variando a colheita de uma exploração agrícola ou a percentagem de material reciclado no produto final). Os efeitos destas variações no resultado global demonstram a sensibilidade da ACV. Alguns softwares utilizados no desenvolvimento da ACV permitem realizar esta análise de sensibilidade de forma paramétrica, estabelecendo, por exemplo, uma distribuição probabilística para um determinado parâmetro e, posteriormente, utilizar a análise de Monte Carlo para, no final, obter uma distribuição de resultados face à variação determinada para aquele parâmetro.

A consistência dos resultados assegura que o procedimento é adequado ao(s) objetivo(s) e âmbito do estudo e ainda que a metodologia e outros princípios foram aplicados corretamente em todo o ciclo de vida do produto. É prática comum solicitar a colaboração de uma terceira parte independente com o objetivo de avaliar a consistência do estudo realizado e, no final, concluir sobre a metodologia e respetiva aplicação.

O terceiro elemento engloba a apresentação dos resultados, com respetivas conclusões e recomendações. É importante voltar a salientar que as conclusões e recomendações de qualquer ACV podem apenas ser relacionadas dentro do que foi definido na definição dos objetivos e âmbito e tendo sempre em conta os demais parâmetros no estudo.

2.6 Ferramentas de apoio à ACV

Os programas informáticos específicos para ACV são particularmente úteis na organização da grande quantidade de dados que caracterizam uma ACV, integrando de forma organizada e coerente bases de dados completas e métodos de avaliação de impacto ambiental. Neste caso, encontram-se ferramentas como o SIMAPRO, o GaBI e o openLCA.

Os softwares específicos de ACV têm a capacidade de compor o ciclo de vida de um produto ou serviço de forma mais modular. Por exemplo, no SIMAPRO, a estrutura de um Ciclo de Vida é composta pelo *Assembly* (montagem, na versão em português) que compreende todos os materiais e todos os processos associados à produção, transporte e utilização do produto, e o *Disposal scenario* que representa os processos a que o produto está sujeito após a sua utilização, incluindo o *Disassembly* que compreende a separação do produto em subunidades no fim de vida.

Associada à capacidade de integrar bases de dados de materiais e processos, os softwares específicos permitem também organizar a informação de forma consistentes. Por exemplo, no SIMAPRO, a informação encontra-se organizada em sete categorias de base de dados, estando elas de acordo com o seguimento do ciclo de vida:

- materiais;
- energia;
- transporte;
- processos;
- tipos de utilização;
- estratégias de condicionamento dos resíduos; e
- estratégias de processamento de resíduos.

Em suma, as escolhas em relação à utilização de software devem considerar os vários critérios mencionados, perspetivando o médio e longo prazo.

Outra vantagem relevante é a integração de funcionalidades para análise de sensibilidade. Em particular, existem softwares que permitem a análise da relação entre o parâmetro de processo ou de atividade e o resultante parâmetro de inventário, o que permite concluir sobre as opções de melhoria.

3 DEFINIÇÃO DA ABORDAGEM DE ACV

3.1 Objetivos da ACV

3.1.1 Aplicações pretendidas

O presente estudo de ACV teve como objetivo produzir informação sobre o desempenho ambiental da Unidade de Produção de NH_3 a partir de H_2 verde da Madoqua Power 2X, envolvendo:

- produzir uma tabela de inventário do processo que apresente as principais entradas (recursos e energia) e saídas (emissões e resíduos) por unidade funcional considerada;
- verificar quais os aspetos (fases, processos unitários, categorias de impacto) mais relevantes em termos de impacto ambiental, no contexto do ciclo de vida da Unidade de Produção do NH_3 e H_2 verde;
- avaliar comparativamente os impactos ambientais de diferentes cenários de produção de amoníaco.

3.1.2 Motivação e Público-Alvo

A Madoqua Power 2X, enquanto empresa dedicada ao desenvolvimento de projetos para a produção de produtos químicos e gases verdes, reconhece a importância da transformação do setor químico no âmbito da sustentabilidade ambiental dos processos produtivos. Neste contexto, a Madoqua Power 2X promoveu o desenvolvimento de um estudo de ACV da Unidade de Produção de NH_3 a partir de H_2 renovável, no sentido de complementar o EIA elaborado.

O público-alvo, isto é, a quem se pretende comunicar os resultados do estudo, é a própria estrutura da Madoqua Power 2X, assim como a Agência Portuguesa do Ambiente (APA, I.P.), enquanto autoridade competente no âmbito do regime jurídico de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA).

3.1.3 Equipa Responsável pelo Estudo

A entidade que desenvolveu o presente estudo foi a 3drivers – Engenharia, Inovação e Ambiente (3drivers), uma entidade externa ao promotor do estudo, a Madoqua Power 2X.

3.2 Definição de Âmbito

3.2.1 Descrição do sistema e dos cenários de análise

O Projeto consiste na produção de H_2 utilizando uma tecnologia de eletrólise da água e a produção de NH_3 através de um processo de *Haber-Bosch*. A futura unidade de produção de H_2 e NH_3 utilizará energia renovável, proveniente da rede elétrica de serviço público com recurso a contratos PPA com garantias de Origem GO-FER, para produzir H_2 verde e consequentemente NH_3 verde. No âmbito do estudo de ACV, importa estimar e analisar os impactos ambientais associados a este processo, procurando analisar o impacto da origem da eletricidade consumida no processo. Pretende-se também compreender as mais-valias deste processo comparativamente à tecnologia convencional de produção de NH_3 . São assim analisados três cenários de produção de NH_3 :

- Com produção de H_2 através de *steam methane reforming* (SMR);
- Com produção de H_2 através da eletrólise de água. São considerados os seguintes perfis de consumo de eletricidade:
 - Mix de produção nacional de 2023 (ELEC_MIX);
 - 50% de origem fotovoltaica / 50% de origem eólica (ELEC_50/50).

3.2.2 Unidade Funcional

Como descrito no capítulo 2.2, em ACV, a comparação entre dois ou mais sistemas com a mesma função só pode ser realizada tendo em consideração a mesma unidade, que se denomina de unidade funcional. Esta serve como referência para o cálculo dos impactos ambientais e para a comparação dos vários sistemas em análise, permitindo referenciar os *inputs* e os *outputs* de um determinado processo.

No âmbito do presente estudo, define-se a unidade funcional como sendo uma tonelada de NH_3 , enquanto matéria-prima, à “porta da fábrica”.

3.2.3 Fronteiras do Sistema

A ACV apresenta um âmbito ‘*cradle-to-gate*’, isto é, tem em consideração todos os impactos associados ao processo de produção de NH_3 , incluindo a extração e fornecimento de matérias-primas e o tratamento de resíduos do processo industrial, até à “porta de fábrica”. Nesse sentido, são excluídas as fases de transporte e utilização do produto, permitindo assim a comparação com outras soluções tecnológicas.

Importa também definir os processos de *foreground* e *background*, cuja distinção é tipicamente associada ao nível de detalhe da modelação. Os primeiros são aqueles que estão sobre a influência direta do produtor do bem ou serviço ou do consumidor do bem ou aquele em que este tem influência. Os segundos, por oposição, incluem aqueles que são operados como parte do sistema, mas que não estão sob o controlo direto ou influência do produtor do bem ou serviço ou do seu utilizador (por exemplo, geração de eletricidade em Portugal).

Como resultado da análise desenvolvida, foram definidas as fronteiras dos cenários de análise, representadas na Figura 4 e na Figura 5, onde é também apresentada a distinção entre os processos *background* e *foreground* a serem modelados, mais detalhada no capítulo 4.1.

Importa notar que cada cenário de produção de NH_3 é modelado de forma integrada, consolidando os processos de produção de H_2 , N_2 e NH_3 .

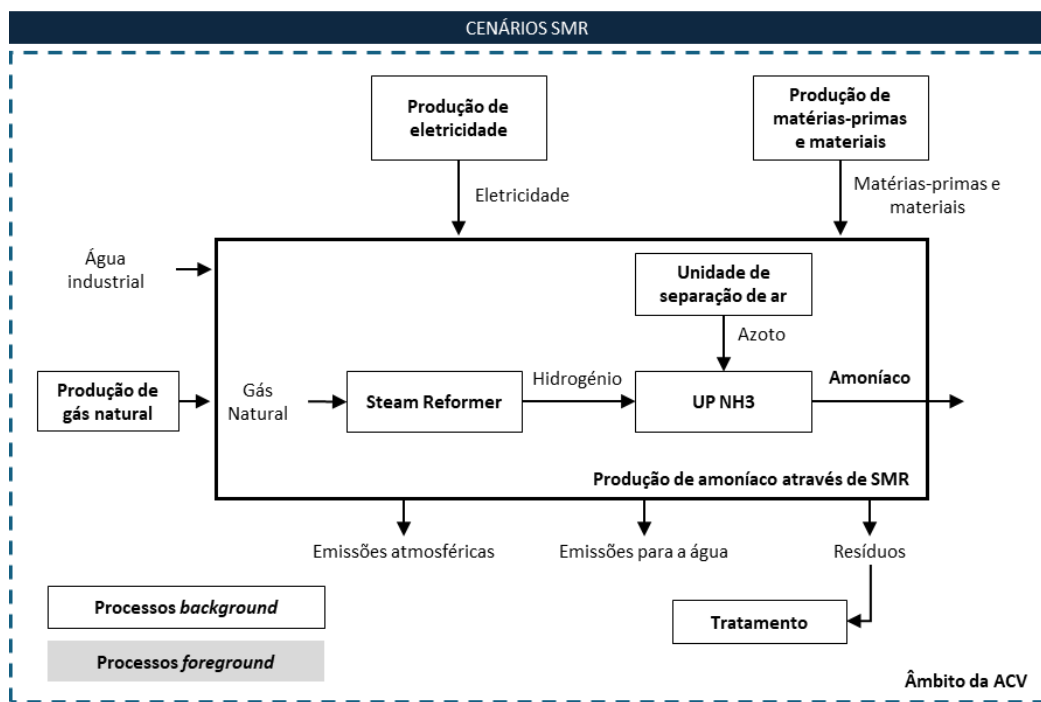


Figura 4. Definição das fronteiras do sistema do cenário SMR

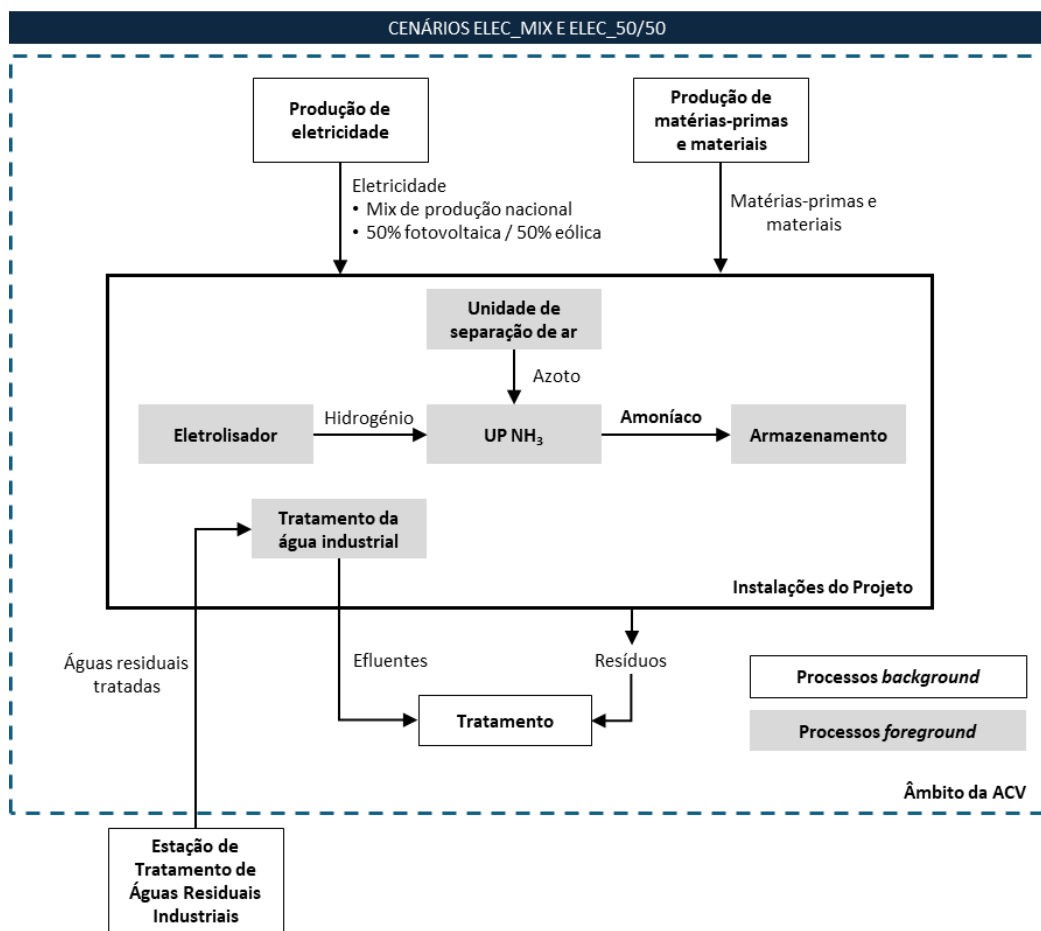


Figura 5. Definição das fronteiras do sistema dos cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50

3.2.4 Representatividade tecnológica, geográfica e temporal

Dado o âmbito do estudo, e de forma a melhor articular o processo de recolha de dados para a construção do ICV, optou-se por utilizar dados de bases de dados externas para a modelação dos processos de produção de matérias-primas, e de tratamento de resíduos, dada a complexidade da tarefa. Um dos cuidados a ter prende-se com a validação desses dados externos para perceber se cumprem os requisitos definidos nos objetivos e âmbito do estudo. Os processos a serem modelados com dados específicos de exploração do Projeto são dados relativamente ao consumo de matérias-primas, água e energia, quantidade fabricada do produto em estudo, bem como produção de resíduos e águas residuais (Tabela 2).

Tabela 2. Critérios de representatividade tecnológica e geográfica para o ICV

ETAPA	FOREGROUND	BACKGROUND
Produção e transporte de matérias-primas e materiais	• Consumo de matérias-primas e materiais com base em dados quantitativos específicos da exploração do Projeto	• Produção e transporte de matérias-primas e materiais com base em dados médios para a Europa
Processamento	• Processos no fabrico de H_2, N_2 e NH_3 com base em dados específicos da exploração do Projeto (e.g. consumo de eletricidade)	• Produção de energia elétrica com base no perfil energético nacional de 2023 • Produção de gás natural e gasóleo com valores médios para a Europa • Tratamento de resíduos e águas residuais com base em dados médios para a Europa e Portugal
Construção e desmantelamento de infraestrutura	-	• Construção e desmantelamento de instalação química média na Europa

Para a modelação dos processos *foreground*, foram utilizados dados previstos para a futura exploração do Projeto com base na informação consolidada no âmbito do EIA.

3.2.5 Critérios de *cut-off*

No âmbito do presente estudo, não foram considerados critérios de *cut-off*. Para os processos dentro dos limites do sistema, todos os dados disponíveis de energia e fluxos de materiais foram incluídos na análise, com exceção da estimativa de emissões atmosféricas resultantes das *flares*, que representam menos de 1% dos impactos na categoria de Aquecimento Global dos cenários ELEC (ver secção 4.1.5).

3.2.6 Metodologia e critérios para os Inventários de Ciclo de Vida

A fase de ICV exige a definição de opções metodológicas e de pressupostos, que deverão ser apresentadas e justificadas de forma clara para que seja possível o contraditório ou replicação da ACV. No presente estudo, foram definidos os seguintes pressupostos:

- **Modelo de Ciclo de Vida:** O modelo de ciclo de vida para o cálculo dos impactos ambientais diretos e indiretos associados à produção de NH_3 é do tipo “*attributional model*”, ou seja, o modelo de ciclo de vida é desenvolvido de acordo com os processos unitários existentes. Este tipo de modelação é utilizado quando se pretende determinar o impacto ambiental de um

produto ou processo ou quando se pretende comparar os impactos de dois ou mais produtos com a mesma unidade funcional.

- **Representatividade tecnológica, geográfica e temporal:** Dado o âmbito do estudo, e de forma a melhor articular o processo de recolha de dados para a construção do ICV, optou-se por utilizar dados de bases de dados externas para a modelação dos processos de produção embalagens e de tratamento em fim de vida, dada a complexidade da tarefa. Um dos cuidados que foi necessário ter prendeu-se com a validação desses dados externos para perceber se cumprem os requisitos definidos no objetivo e âmbito deste estudo.

3.2.7 Critérios para a Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida

De forma análoga ao ICV, também na fase de AICV é necessário definir e apresentar os pressupostos de base e opções metodológicas que permitem a replicação e contraditório. No presente estudo foram estabelecidos os seguintes pressupostos:

- **Software utilizado:** Para o desenvolvimento da ACV foi utilizado o programa SIMAPRO, versão 9.4.0.2.
- **Categorias de Impacte, Métodos e Outros Aspetos:** O âmbito da avaliação de impacto do ciclo de vida das embalagens consideradas inclui todas as categorias de impacto ambiental que são consideradas nos métodos de avaliação mais recentes, sendo que é dada ênfase particular às categorias de impacto geralmente mais associadas à produção e consumo de energia e de recursos materiais, e emissões de carbono. Tendo em consideração os objetivos do projeto, utilizou-se o método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.07 / World (2010) H.

O método de avaliação de impactos ReCiPe é comumente aceite em todo o mundo e avalia as principais categorias de impacto habitualmente reportadas e compreensíveis para os não especialistas, nomeadamente: alterações climáticas, depleção do ozono estratosférico, utilização da água, utilização do solo, escassez de recursos, toxicidade, entre outras. As categorias de impacto (classes que representam questões ambientais preocupantes) estudadas e os seus indicadores (as representações quantificáveis das categorias de impacto) do método ReCiPe empregue são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Categorias de impacto do método ReCiPe

CATEGORIA DE IMPACTE	UNIDADE DO INDICADOR
Aquecimento global	kg CO ₂ eq.
Depleção do ozono estratosférico	kg CFC ⁻¹¹ eq.
Radiação ionizante	kBq Co ⁻⁶⁰ eq.
Formação de ozono, saúde humana	Kg NO _x eq.
Formação de partículas finas	kg PM _{2.5} eq.
Formação de ozono, Ecossistemas terrestres	kg NO _x eq.
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq.
Eutrofização de água doce	kg P eq.
Eutrofização marinha	Kg N eq.
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade da água doce	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB

CATEGORIA DE IMPACTE	UNIDADE DO INDICADOR
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB
Uso da terra	m ² a crop eq.
Escassez de recursos minerais	kg CU eq.
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq.
Consumo de água	m ³

4 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

4.1 Dados e pressupostos do inventário do ciclo de vida

Após a definição das fronteiras do sistema, com base na revisão de literatura científica e na informação do Projeto, foram recolhidos e processados os dados fornecidos pela Madoqua Power 2X no âmbito do EIA.

Para a modelação do cenário SMR, recorreu-se ao processo da base de dados Ecoinvent - *Ammonia, anhydrous, liquid {RER w/o RU}| ammonia production, steam reforming, liquid | Cut-off, U*. De forma a permitir a comparação com os restantes cenários de produção de amoníaco, foi ajustado o processo de SMR no que respeita ao consumo de eletricidade, para considerar o *mix* de eletricidade nacional de 2023 (ver 4.1.2).

Para os cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50, foram utilizados os dados de exploração do Projeto apresentados no Relatório Síntese do EIA para a modelação dos processos *foreground* (Tabela 2). Para a modelação dos processos *background*, foram utilizados os dados da base de dados Ecoinvent v3.8, que incluem impactes associados à infraestrutura², como detalhado seguidamente.

4.1.1 Consumo de matérias-primas e materiais

Foram considerados todos os consumos de matérias-primas e materiais previstos no âmbito da exploração do Projeto (Tabela 4). Para os materiais como o zeólito, Oxigone e hidróxido de potássio, foram tidos em consideração os seus tempos de vida na exploração do projeto (e.g. 4 anos).

Tabela 4. Identificação das matérias-primas e materiais que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50)

MATÉRIAS-PRIMAS E MATERIAIS	ETAPA DO PROJETO	PROCESSO CORRESPONDENTE EM BASE DE DADOS ECOINVENT
Zeólito Molecular Sieve 5A	UP H_2	<i>Zeolite, powder {RER} production Cut-off, U</i>
OxiGone 230 (0,3% Pt)		<i>Platinum {GLO} market for Cut-off, U</i>
Hidróxido de potássio		<i>Potassium hydroxide {RER} production Cut-off, U</i>
Sate HyKat A-202R	UP NH_3	<i>Cobalt {GLO} production Cut-off, U</i>
Oxidation Sate HyKat A-202		
Vários produtos químicos	Tratamento de água industrial	Considerados químicos incluídos no processo: <i>Water, deionised {Europe without Switzerland} market for water, deionised Cut-off, U</i>
Hipoclorito de sódio 12%	Tratamento de água potável	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RER} sodium hypochlorite production, product in 15% solution state Cut-off, U</i>

Relativamente ao consumo de produtos químicos no tratamento da água industrial, não possível proceder à sua modelação com recurso a processos de bases de dados de ACV, dada a falta de informação sobre os

² No caso dos cenários com eletrólise, foram considerados os impactes de infraestrutura modelados no processo do Ecoinvent - *Hydrogen, liquid {RER}| chlor-alkali electrolysis, membrane cell | Cut-off, U*.

produtos em questão. Nesse sentido, recorreu-se ao processo de produção de água desmineralizada, identificado na Tabela 4, que inclui no seu inventário o consumo de produtos químicos, como sulfato de alumínio, óxido de magnésio, entre outros.

4.1.2 Consumo de energia

Os cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50 diferenciam-se apenas no que respeita à origem da eletricidade consumida. No primeiro, foi considerado o perfil de geração de eletricidade em Portugal em 2023³ (Tabela 5), enquanto no segundo, foi considerado que 50% da eletricidade consumida era de origem fotovoltaica e 50% de origem eólica.

Tabela 5. Perfil de produção de eletricidade em Portugal em 2023 (Fonte: REN)

PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	2023
Gás natural	19,1%
Importação líquida	19,9%
PRE térmica	0,4%
Eólica	25,1%
PRE hidroelétrico	22,9%
Fotovoltaico	7,0%
Biomassa	5,6%

Para a modelação destes processos, recorreram-se a processos de produção de energia provenientes da base de dados Ecoinvent, adaptados para a realidade nacional com base em projetos anteriores desenvolvidos pela 3drivers (Tabela 6).

Tabela 6. Pressupostos de adaptação dos processos de produção de energia para a realidade nacional

PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	PRESSUPOSTOS DE MODELAÇÃO DOS PROCESSOS
Gás natural	Baseado no processo " <i>Natural gas, burned in power plant/MJ/UCTE</i> ".
Importação líquida	Assumido como pressuposto que a importação de eletricidade seria realizada de Espanha; considerado <i>mix</i> de eletricidade de Espanha.
PRE térmica	Foi considerada uma desagregação da produção PRE térmico com base na informação da ERSE de 2009.
Eólica	Baseado no processo " <i>electricity, at wind power plant /RER</i> ".
PRE hidroelétrico	Baseado no processo " <i>electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/RER</i> ".
Fotovoltaico	Considerado o mesmo <i>mix</i> do processo " <i>electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/PT</i> ".
Biomassa	Baseado no processo " <i>wood chips, burned in cogen 6400kWth/MJ/CH</i> ".

Numa primeira iteração do cálculo dos impactes ambientais, verificou-se um impacte ambiental significativamente elevado na categoria de 'Consumo de Água' no cenário ELEC_MIX. Após análise dos

³ REN (2024). Data Hub – Balanço Energético (acumulado 2023). Disponível em <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/balanco-mensal?date=2023-12-31>

contributos dos processos do inventário de ciclo de vida, foi possível observar que tal era devido ao facto de, na modelação do PRE hidroelétrico, que representa cerca de 23% do *mix* de eletricidade nacional, ser considerado que a água utilizada é consumida. Tendo em consideração o âmbito do estudo, e de forma a ser possível realizar uma análise comparativa dos impactes ambientais dos diferentes cenários na categoria de consumo de água, foi desconsiderado o consumo de água associado ao processo PRE hidroelétrico.

Foi também considerado o consumo de gasóleo previsto no âmbito do Projeto em geradores e motobombas, assim como o consumo de gás natural a ser utilizado nas *flares* (Tabela 7).

Tabela 7. Identificação dos combustíveis que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50)

COMBUSTÍVEIS	ETAPA DO PROJETO	PROCESSO CORRESPONDENTE EM BASE DE DADOS ECOINVENT
Gasóleo	Geradores de emergência e auto-bombas de incêndio	<i>Diesel {Europe without Switzerland} diesel production, petroleum refinery operation Cut-off, U</i>
Gás Natural	<i>Flares</i>	<i>Natural gas, high pressure {Europe without Switzerland} market group for Cut-off, U</i>

4.1.3 Consumo de água

Foram considerados os consumos de água potável e de água industrial no âmbito do Projeto, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Identificação dos fluxos de resíduos e respetivo tratamento que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50)

FLUXO DE RESÍDUOS	ETAPA DO PROJETO	PROCESSO CORRESPONDENTE EM BASE DE DADOS ECOINVENT
Água potável	Utilidades	<i>Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U</i>
Água industrial		Considerado consumo de água incluído no processo: <i>Water, deionised {Europe without Switzerland} water production, deionised Cut-off, U</i>

4.1.4 Produção e tratamento de resíduos

De acordo com a informação do Projeto, foram modelados os fluxos de resíduos gerados no processo de produção de NH_3 e respetivo tratamento, de acordo com a Tabela 9. Importa destacar que não estão ainda previstos os destinos de tratamento dos diferentes fluxos de resíduos a serem gerados na exploração do Projeto, pelo que foram assumidos pressupostos para a modelação dos inventários de ciclo de vida.

Tabela 9. Identificação dos fluxos de resíduos e respetivo tratamento que constituem o ICV dos cenários de Projeto (ELEC_MIX e ELEC_50/50)

FLUXO DE RESÍDUOS	TRATAMENTO	PROCESSO CORRESPONDENTE EM BASE DE DADOS ECOINVENT
Resíduos perigosos	Incineração	<i>Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery Cut-off, U</i>
Resíduos urbanos	Aterro, Incineração e Valorização Energética	<i>Municipal solid waste {PT} market for municipal solid waste Cut-off, U</i>
Lamas	Digestão Anaeróbia	Considerado processo de tratamento de lamas incluído no processo: <i>Water, deionised {Europe without Switzerland} market for water, deionised Cut-off, U</i>
Águas residuais	Tratamento em ETAR	Considerado processo de tratamento de águas residuais incluído no processo: <i>Water, deionised {Europe without Switzerland} market for water, deionised Cut-off, U</i>

4.1.5 Emissões atmosféricas

Segundo a informação apresentada no Relatório Síntese do EIA, existem emissões atmosféricas associadas às *flares*, aplicando-se a situações em que o NH_3 não cumpra com as especificações necessárias ou em casos de libertação de NH_3 durante o processo produtivo ou armazenamento. Conforme referido no capítulo 1.4, a combustão completa do NH_3 resulta em azoto e água (IIAR, 2008), o que, aliado ao elevado teor em H_2 na sua composição, tem despertado interesse no NH_3 como vetor energético. Com base na literatura, as *flares* geralmente operam com uma eficiência mínima de combustão de 98% (U.S. Environmental Protection Agency, n.d.). Partindo do pressuposto que a combustão do NH_3 é completa, admite-se que este processo não contribui para a categoria de Aquecimento Global. Consequentemente, foi realizada uma estimativa das emissões associadas, com foco exclusivo nas emissões de CO_2 associadas à combustão do gás natural utilizado como combustível das *flares*. Desta análise resultou que as emissões de CO_2 provenientes da combustão de gás natural representariam menos de 1% das emissões totais de cada cenário de produção de NH_3 considerado. Por esta razão, as emissões associadas às *flares* foram excluídas do âmbito da avaliação.

4.2 Inventários de Ciclo de Vida dos Cenários

A Tabela 10 apresenta os dados de inventário do cenário de produção de NH_3 através de eletrólise (comum para ELEC_MIX e ELEC_50/50).

Tabela 10. Dados de inventário dos cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50 (unidade funcional=1 t NH₃ produzida)

TIPO	MATERIAL/RECURSO/PROCESSO	QUANTIDADE	UNIDADE
Entradas (materiais)	Zeólito Molecular Sieve 5A	1,54E-06	t
	Platina em OxiGone 230	1,23E-08	t
	Hidróxido de potássio	3,37E-04	t
	Sate HyKat A-202R	7,61E-09	t
	Oxidation Sate HyKat A-202	7,61E-09	t
	Químicos para tratamento de água industrial (vários)	1,64E-03 ⁴	t
	Hipoclorito de sódio 12%	7,06E-05	t
	Gasóleo	4,39E-05	t
	Gás Natural	0,77	Nm ³
	Água para consumo	0,01	t
	Água industrial	3,53	t
Entradas (eletricidade/calor)	Eletricidade	11,01	MWh
Saídas (resíduos e emissões)	Águas residuais ⁵	2,83E-01	m ³
	Lamas ⁶	7,83E-02	m ³
	Resíduos perigosos	7,21E-04	t
	Resíduos urbanos	4,17E-04	t

⁴ Segundo a informação consolidada no âmbito do EIA, está previsto no Projeto o consumo de 5,45E-04 toneladas de diversos produtos químicos para o tratamento da água industrial por tonelada de amoníaco produzido. No entanto, foram consideradas as quantidades de produtos previstas no processo do Ecoinvent utilizado para modelar o processo de produção de água industrial (desmineralizada).

⁵ Segundo a informação consolidada no âmbito do EIA, está previsto no Projeto a produção de 1,35 toneladas de efluentes do tratamento da água industrial. No entanto, foram consideradas as quantidades de efluentes previstas no processo do Ecoinvent utilizado para modelar o processo de produção de água industrial (desmineralizada).

⁶ Segundo a informação consolidada no âmbito do EIA, está previsto no Projeto a produção de 6,85E-05 toneladas de lamas do tratamento da água industrial. No entanto, foram consideradas as quantidades de lamas previstas no processo do Ecoinvent utilizado para modelar o processo de produção de água industrial (desmineralizada).

5 AVALIAÇÃO DE IMPACTES DA PRODUÇÃO DE AMONÍACO

Neste capítulo são apresentados os resultados da Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida cuja metodologia foi desenvolvida de acordo com o estabelecido na norma ISO 14040.

Foi utilizado o método ReCiPe Midpoint (H) na sua versão 1.07, de 2016, que permitiu a classificação e caracterização dos impactes dos três cenários de produção de NH_3 . O método fornece um conjunto de indicadores para diferentes categorias de impacto que refletem impactes potenciais (pressões) relacionados com emissões poluentes ou consumo de recursos. Destacam-se os impactes nas categorias 'Aquecimento Global', 'Escassez de Recursos Fósseis', 'Escassez de Recursos Minerais' e 'Consumo de Água', apresentadas na Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9, respetivamente.

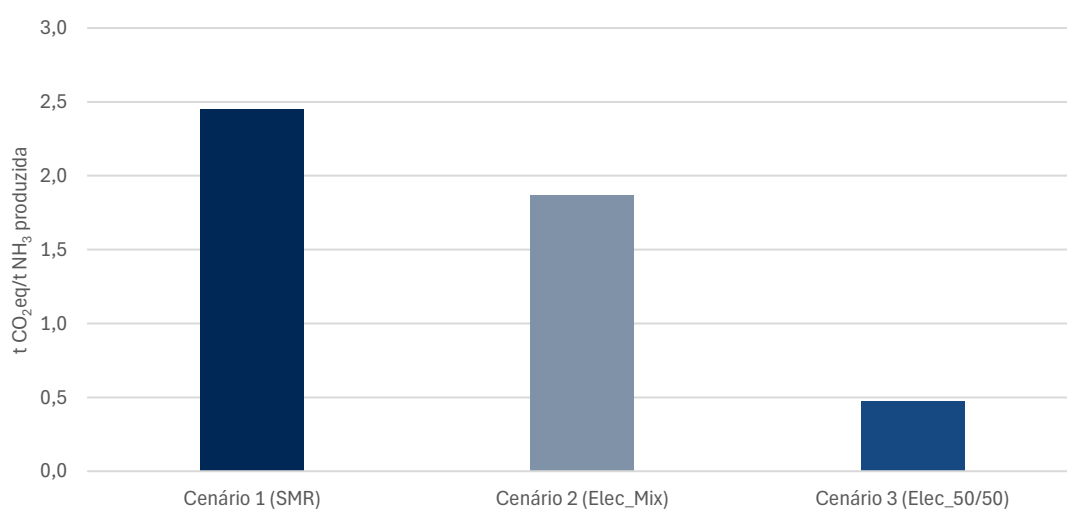


Figura 6. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria 'Aquecimento Global'

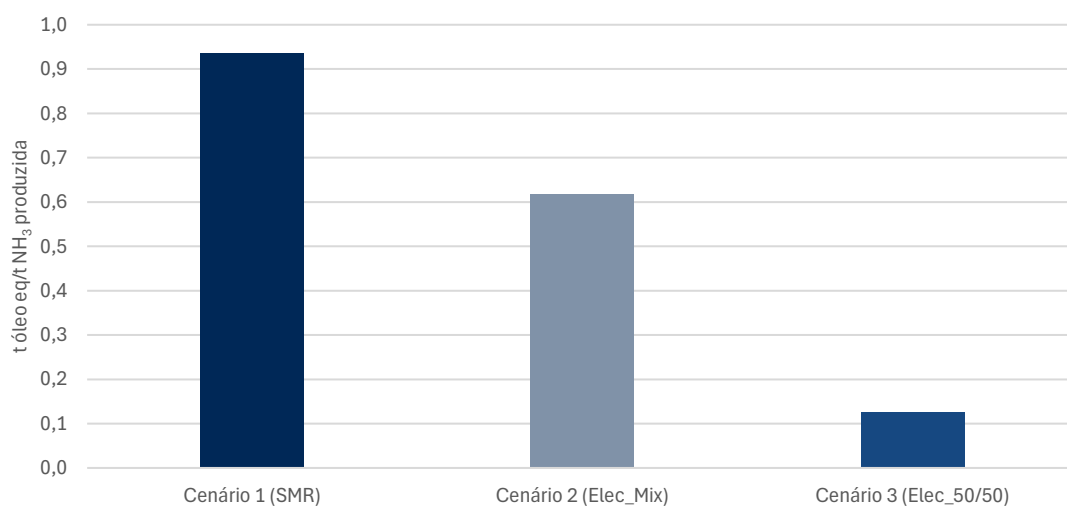


Figura 7. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria 'Escassez de Recursos Fósseis'

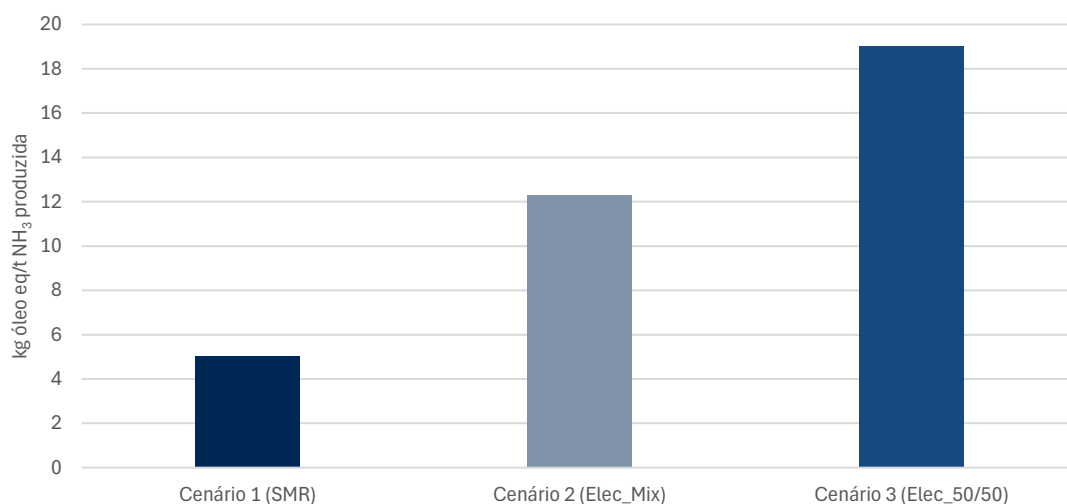


Figura 8. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria 'Escassez de Recursos Minerais'

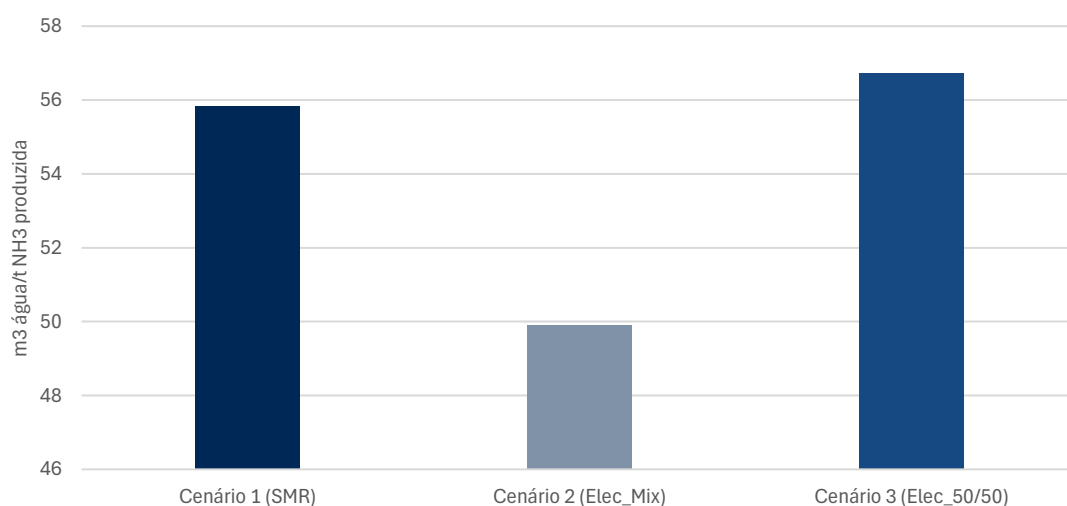


Figura 9. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria 'Consumo de Água'

No caso dos impactes na categoria de 'Aquecimento Global' é possível concluir que os impactes ambientais são significativamente reduzidos quando a produção ocorre por eletrólise alimentada exclusivamente por fontes de energia renovável, nomeadamente eólica e fotovoltaica. A produção por eletrólise utilizando o *mix* energético nacional apresenta impactes ligeiramente inferiores comparativamente ao método tradicional de SMR, assumindo o *mix* de produção de eletricidade nacional em 2023 (Tabela 5). Paralelamente, o consumo de recursos fósseis é maior no cenário SMR, pelo consumo de gás natural no *Steam Methane Reformer*.

Os impactes mais significativos dos cenários ELEC_MIX e ELEC_50/50 na escassez de recursos minerais estão associados ao consumo de metais na produção de painéis fotovoltaicos, na produção de eletricidade, e no consumo de catalisadores, no processo de hidrólise.

No que respeita ao consumo de água, este é mais significativo no cenário ELEC_50/50, estando maioritariamente associado aos processos de produção de painéis fotovoltaicos.

Apresentam-se também os resultados da normalização dos impactes de ciclo de vida (resultados são normalizados num único indicador, neste caso, o impacte da atividade média de um cidadão europeu num ano) nas categorias de impacte indicadas (Figura 10 e Figura 11).

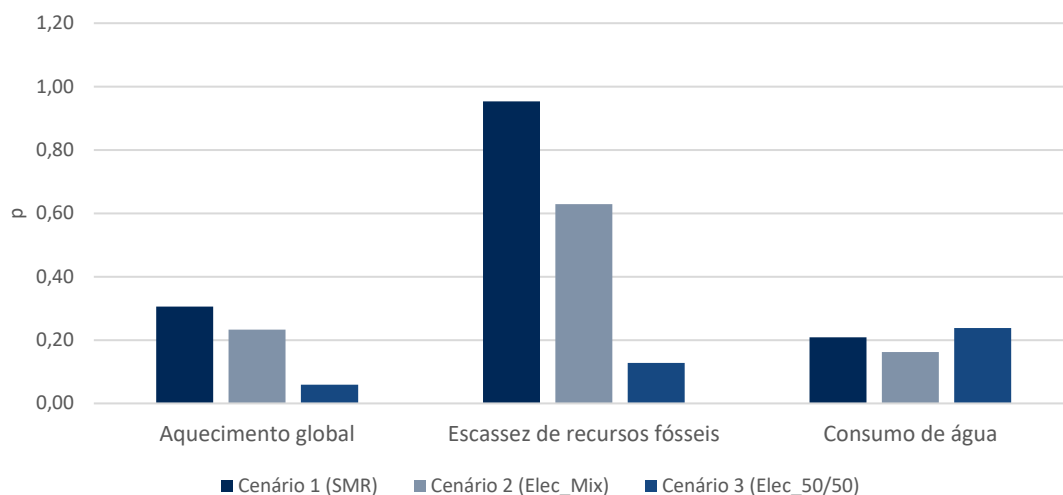


Figura 10. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco nas categorias de impacte 'Aquecimento Global', 'Escassez de recursos fósseis' e 'Consumo de Água' (normalização)

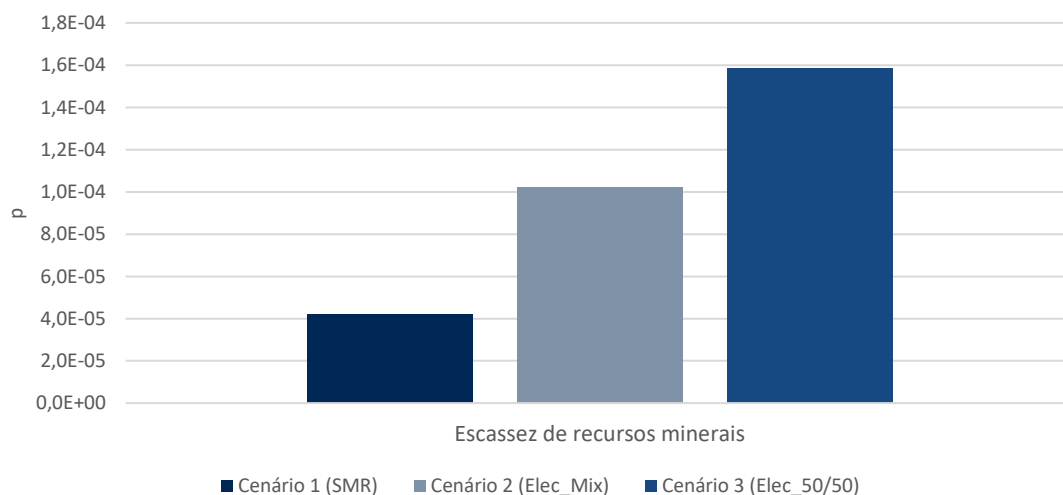


Figura 11. Comparação dos impactes ambientais dos cenários de produção de amoníaco na categoria de impacte 'Escassez de recursos minerais' (normalização)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo de Avaliação de Ciclo de Vida teve como objetivo estimar e analisar os impactos ambientais associados ao processo de produção de amoníaco da Madoqua Power 2X a partir de hidrogénio renovável, enquadrando o desempenho ambiental do Projeto comparativamente a outros cenários de produção de amoníaco. Este foi desenvolvido em complemento com o Estudo de Impacte Ambiental (EIA) do Projeto, de forma a contribuir para estender o âmbito da análise para uma perspetiva de ciclo de vida e a valorar aspetos como os impactos evitados.

No âmbito do estudo, foram analisados três cenários de produção de amoníaco: (i) com produção de hidrogénio através de *steam methane reforming* (SMR); com produção de hidrogénio através da eletrólise de água, recorrendo a (ii) um mix de produção nacional de eletricidade de 2023, e recorrendo a (iii) eletricidade com 50% de origem fotovoltaica e 50% de origem eólica.

No que respeita à categoria de 'Aquecimento Global', o processo convencional de SMR apresenta os impactos ambientais mais elevados, sendo que estes são significativamente reduzidos quando a produção de hidrogénio ocorre por eletrólise alimentada exclusivamente por fontes de energia renovável, nomeadamente eólica e fotovoltaica. Este resultado está alinhado com a literatura, que destaca a eletrólise com energia renovável como a tecnologia mais promissora para mitigar os impactos climáticos. Contudo, quando se recorre ao *mix* de eletricidade nacional para alimentar o processo, os impactos nesta categoria diminuem de forma pouco significativa em comparação com o método tradicional de SMR, refletindo a dependência ainda significativa de combustíveis fósseis em Portugal.

Noutras categorias de impacto ambiental, como consumo de água e escassez de recursos minerais, os cenários de produção de hidrogénio através de eletrólise apresentam impactos mais elevados do que o cenário convencional de SMR, associados aos próprios processos de produção de eletricidade renovável.

É possível assim concluir que, embora a utilização de energias renováveis seja fundamental para atingir os objetivos de descarbonização, existe um *trade-off* entre a produção de energia 'verde' e o consumo intensivo de recursos minerais, incluindo matérias-primas críticas. Este *trade-off* é comum na análise de tecnologias e processos associados à transição para a neutralidade carbónica e obrigam à adoção de estratégias de economia circular de forma a minimizar a necessidade de extração de matérias-primas através do prolongamento do tempo de vida e através da recuperação das matérias-primas críticas através da recolha e reciclagem dos equipamentos para as energias renováveis.

Este é um ponto de destaque tanto na literatura como nos resultados deste estudo, que indica que o impacto na escassez de recursos minerais é acentuado nos cenários que envolvem produção de NH_3 por eletrólise, particularmente associado ao fabrico de painéis solares, que apresenta elevada dependência destes materiais. Estes impactos podem ser mitigados com aposta em processos mais eficientes de produção de solar PV e uma maior aposta na reciclagem de materiais críticos, contribuindo assim para a redução da dependência da extração de recursos minerais.

REFERÊNCIAS

- Bicer, Y., Dincer, I., Vezina, G., & Raso, F. (2017). Impact assessment and environmental evaluation of various ammonia production processes. *Environmental management*, 59, 842-855.
- Bora, N., Singh, A. K., Pal, P., Sahoo, U. K., Seth, D., Rathore, D., ... & Sarangi, P. K. (2024). Green ammonia production: Process technologies and challenges. *Fuel*, 369, 131808.
- Boyce, J., Sacchi, R., Goetheer, E., & Steubing, B. (2024). A prospective life cycle assessment of global ammonia decarbonisation scenarios. *Heliyon*, 10(6).
- Ferrão, P (1998). Introdução à gestão ambiental: A avaliação do ciclo de vida de produtos. Coleção ensino da ciência e tecnologia. IST PRESS.
- Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. G., & Styring, P. (2021). Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, 9, 580808.
- IEA. (2021). Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertiliser production.
- International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR). (2008). Ammonia Data Book – Chapter 2. Properties of Ammonia Thermodynamic Properties of Ammonia. Disponível em https://web.iiar.org/membersonly/PDF/CO/databook_ch2.pdf [acedido em dezembro de 2024].
- Jabarivelisdeh, B., Jin, E., Christopher, P., & Masanet, E. (2022). Ammonia production processes from energy and emissions perspectives: a technical brief. *Technical Report*.
- Kiemel, S., Smolinka, T., Lehner, F., Full, J., Sauer, A., & Mieke, R. (2021). Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. *International Journal of Energy Research*, 45(7), 9914-9935.
- Liu, X., Elgowainy, A., & Wang, M. (2020). Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green Chemistry*, 22(17), 5751-5761.
- Mayer, P., Ramirez, A., Pezzella, G., Winter, B., Sarathy, S. M., Gascon, J., & Bardow, A. (2023). Blue and green ammonia production: A techno-economic and life cycle assessment perspective. *IScience*, 26(8).
- Mohamed, A. M., Economou, I. G., & Bicer, Y. (2024). Navigating Ammonia Production Routes: Life Cycle Assessment Insights for a Sustainable Future. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100947.
- Singh, V., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2018). Life cycle assessment of ammonia production methods. In *Exergetic, energetic and environmental dimensions* (pp. 935-959). Academic Press.
- U.S. Environmental Protection Agency (n.d.) Industrial Flares, Disponível em https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/C13S05_4-20-15.pdf [acedido em dezembro de 2024].