



Abordagem ao Ciclo de Vida do Mobiliário Escolar Desenvolvimento de Métricas para Avaliação e Melhoria da Sustentabilidade

MIGUEL SOUSA RAMALHO

setembro de 2025

**Abordagem ao Ciclo de Vida do Mobiliário Escolar:
Desenvolvimento de Métricas para Avaliação e
Melhoria da Sustentabilidade**

Miguel Sousa Ramalho

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Engenharia Gestão Industrial**

Orientador: Engenheira Maria Antónia Maio Nunes Da Silva Gonçalves

Júri:

Presidente:

Vogais:

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo aplicar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida ao mobiliário escolar, desenvolvendo indicadores que permitam quantificar e monitorizar a sua sustentabilidade. Para a construção do inventário foram recolhidos dados de processos reais, com especial destaque para a etapa de corte de chapas metálicas, considerada crítica no fabrico do mobiliário. Neste âmbito, foram modelados e comparados dois cenários de operação, corte com azoto e corte com ar comprimido, de modo a avaliar diferenças de desempenho ambiental e energético. A quantificação dos fluxos de entrada e saída incluiu consumos de energia, utilização de gases, geração de resíduos metálicos e emissões atmosféricas, os quais foram integrados em modelos no software OpenLCA. A análise demonstrou que o processo com azoto apresenta menores emissões e impactos ambientais, embora com custos mais elevados, enquanto o corte com ar comprimido, apesar de mais económico, revelou impactos superiores em diversas categorias, nomeadamente no consumo energético associado à compressão do ar e na formação de partículas. Com base nestes resultados foram desenvolvidos e testados indicadores de sustentabilidade, permitindo transformar dados complexos de inventário em métricas objetivas e comparáveis. Estes indicadores possibilitam avaliar de forma integrada a eficiência energética, a gestão de recursos e a geração de impactos, constituindo um instrumento essencial para apoiar decisões estratégicas. A discussão evidencia que a utilização sistemática de métricas de ciclo de vida permite alinhar competitividade industrial com objetivos de sustentabilidade, reforçando o papel do setor do mobiliário escolar na transição para modelos produtivos mais sustentáveis.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Sustentabilidade, Mobiliário Escolar, Processos de Corte, Indicadores de Sustentabilidade, Impactos Ambientais

Abstract

This dissertation aims to apply the Life Cycle Assessment methodology to school furniture, developing indicators that enable the quantification and monitoring of its sustainability. For the construction of the inventory, data were collected from real industrial processes, with particular emphasis on the sheet metal cutting stage, considered critical in furniture manufacturing. In this context, two operational scenarios were modelled and compared, cutting with nitrogen and cutting with compressed air, in order to assess differences in environmental and energy performance. The quantification of input and output flows included energy consumption, use of gases, generation of metallic residues, and atmospheric emissions, which were integrated into models in the OpenLCA software. The analysis demonstrated that the process using nitrogen presents lower emissions and environmental impacts, although with significantly higher costs, while cutting with compressed air, despite being more economical, showed higher impacts in several categories, namely energy consumption associated with air compression and the formation of particulate matter. Based on these results, sustainability indicators were developed and tested, allowing complex inventory data to be transformed into objective and comparable metrics. These indicators make it possible to assess in an integrated way energy efficiency, resource management, and impact generation, constituting an essential instrument to support strategic decision-making. The discussion highlights that the systematic use of life cycle-based metrics allows industrial competitiveness to be aligned with sustainability goals, reinforcing the role of the school furniture sector in the transition towards more sustainable production models.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment, Sustainability, School Furniture, Cutting Processes, Sustainability Indicators, Environmental Impacts

Índice

Lista de Figuras.....	X
Lista de Tabelas.....	xii
Acrónimos e Símbolos.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Apresentação do tema	1
1.2. Enquadramento do Estudo: O Mobiliário Escolar e a Sustentabilidade	2
1.3. Objetivos do estudo.....	3
1.4. Importância do estudo	4
1.5. Estrutura do trabalho	4
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1. Princípios do Lean Manufacturing	7
2.1.1. Os sete principais desperdícios Lean	8
2.1.2. Ferramenta para Eliminar os Desperdícios.....	10
2.2. Avaliação do Ciclo de Vida	14
2.2.1. Aplicação da Análise do Ciclo de Vida no Setor do Mobiliário	16
2.2.2. Evolução da ferramenta ACV	17
2.3. Economia Circular.....	18
2.3.1. Princípios da Economia Circular e Aplicações no Setor Mobiliário.....	18
2.3.2. Estratégias de Implementação	19
2.3.3. Tecnologias de Suporte à Economia Circular.....	20
2.4. Sustentabilidade em Sistemas de Produção.....	20
2.5. Integração de Lean, Segurança e Sustentabilidade	21
2.6. Métricas para avaliação da Sustentabilidade.....	22
2.6.1. Principais Métricas para Avaliação	22
2.6.2. Principais Métricas para Avaliação	23
2.7. Análise crítica da revisão bibliográfica	24
2.7.1. Conclusões finais.....	24
2.7.2. Limitações e trabalhos futuros	25
3. Métodos e Aplicação.....	27
3.1. Definição do Sistema e Delimitação do Estudo.....	28
3.1.1. Descrição dos equipamentos utilizados.....	28
3.1.2. Unidade funcional	30
3.1.3. Fronteiras do sistema	32
3.1.4. Assunções e limitações	33
3.2. Métodos de Recolha, Registo e Tratamento de Dados.....	35

3.2.1. Metodologia de Trabalho	36
3.2.2. Parâmetros monitorizados	38
3.2.3. Considerações sobre variabilidade e incerteza.....	40
3.3. Modelação do ciclo de vida e avaliação dos impactos ambientais.....	42
3.3.1. Definição do âmbito.....	42
3.3.2. Inventário do ciclo de vida	43
3.3.3. Avaliação de Impactos Ambientais do Ciclo de Vida	53
3.3.4. Seleção dos indicadores ambientais	53
4. Resultados e Discussão	57
4.1. Análise dos impactos ambientais através da ACV.....	57
4.2. Resultados e Análise dos Indicadores Ambientais	60
5. Conclusão	67
5.1. Conclusões finais	67
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	69
Referências.....	71
Declaração de Integridade	77
Anexo A	79

Lista de Figuras

Figura 1- Metodologia 5S (Agrahari et al., 2015)	11
Figura 2 - Etapas do Ciclo de Vida (MetalsHub, n.d.)	15
Figura 3 - Chapa em estudo – 430 mm x 187 mm	30
Figura 4 - Produto Final	30
Figura 5 - Distribuição da peças cortadas na chapa "mãe"	31

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Definição dos desperdícios.....	10
Tabela 2 - Casos de estudo.....	14
Tabela 3 - Fluxos Comuns do ACV.....	44
Tabela 4 - Fluxos Diferenciados do ACV.....	46
Tabela 5 - Inventário Corte de chapa através do N2.....	49
Tabela 6 - Inventário Corte de chapa através de ar comprimido.....	52
Tabela 7 - Indicadores do corte a N2 parametrizados.....	61
Tabela 8 - Indicadores do corte a Ar parametrizados.....	61

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ACV	Análise do Ciclo de Vida
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	Controlo Numérico Computorizado
IoT	Internet of Things
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
FSC	Forest Stewardship Council
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
UF	Unidade Funcional

Lista de Símbolos

<i>DA</i>	Dado de Atividade	kg, kWh, Nm ³ , m ³
<i>FE</i>	Fator de Emissão	kgCO ₂ e/(kg, kWh, m ³ , ...)

1. Introdução

A alta competitividade do mercado atual, conjugada com a crescente preocupação global pela sustentabilidade e pela segurança no ambiente de trabalho, tem impulsionado a procura por estratégias que otimizem sistemas de produção.

Nesse contexto, o Lean Manufacturing tem-se destacado como uma abordagem eficaz na otimização de processos produtivos, do mesmo modo que oferece soluções para reduzir impactos ambientais e melhorar a segurança no ambiente de trabalho, ciclos de vida dos produtos, particularmente no contexto da economia circular, assume uma importância vital, dado que abrange todas as fases de produção. Assim sendo, a combinação da filosofia Lean Manufacturing e os conceitos de ciclo de vida associado ao contexto de economia circular torna-se um paradigma essencial para eliminar desperdícios, melhorar a eficiência, promover a inovação, reduzir custos, acompanhar as tendências de mercado e também uma melhor utilização das matérias-primas para cada uma das fases de cada processo produtivo, contribuindo cada vez mais para um ambiente produtivo seguro e sustentável.

No entanto, a combinação de integração de práticas Lean com aspetos de sustentabilidade no ciclo de vida de produtos apresenta vantagens significativas, através da utilização de métricas de avaliação destes aspetos. Este estudo tem como objetivo explorar o modo de como estas práticas podem ser adaptadas e aplicadas em sistemas de produção mobiliário escolar, um setor amplamente procurado e relevante no mercado atual.

1.1. Apresentação do tema

Este estudo centra-se na análise do ciclo de vida do mobiliário escolar, com foco em modelos específicos de cadeiras, explorando como conceitos de Lean Manufacturing, economia circular e métricas de avaliação podem contribuir para a sustentabilidade.

O setor mobiliário, particularmente associado à produção de material inserido no contexto escolar, enfrenta cada vez mais desafios na procura de soluções de produção que conciliem produtividade, responsabilidade ambiental e bem-estar dos trabalhadores. Este tipo de produto, utilizado em vários contextos, desde escritórios a espaços públicos, ilustram um exemplo de setor cuja produção impacta não apenas o ambiente, mas também os processos industriais e as condições de trabalho. Assim, emerge a necessidade de aplicar um conjunto de práticas que reduzam os desperdícios associados à produção em massa, promovam a eficiência energética e a satisfação do cliente, garantam a segurança das equipas de produção e que

Introdução

permitam à empresa destacar-se perante outras num setor que cada vez mais se encontra competitivo (Debnath et al., 2023).

Neste enquadramento, a investigação foi realizada em colaboração com a empresa Nautilus, S.A., fundada em 1996 e sediada em Gondomar, Portugal. A Nautilus é uma referência no setor do mobiliário escolar e institucional, destacando-se pela sua aposta em inovação, ergonomia e sustentabilidade nos processos produtivos. Com várias unidades fabris, a empresa tem vindo a consolidar a sua presença tanto no mercado nacional como internacional, fornecendo mobiliário para escolas, universidades, bibliotecas e outros espaços públicos. A escolha da Nautilus como caso de estudo permitiu uma análise prática e aprofundada da aplicação de princípios de Lean Manufacturing e economia circular no fabrico de mobiliário escolares. O contacto direto com os seus processos industriais possibilitou a identificação de oportunidades de melhoria, contribuindo para uma abordagem mais eficiente, segura e sustentável no setor.

Assim, este trabalho assume-se como um contributo significativo para a prática industrial ao propor uma abordagem integrada que analise e avalie o impacto das práticas Lean em sistemas de produção seguros e sustentáveis. O foco neste tipo de material permite uma abordagem concreta e representativa dos desafios enfrentados pela indústria do mobiliário escolar em geral.

1.2. Enquadramento do Estudo: O Mobiliário Escolar e a Sustentabilidade

O setor do mobiliário escolar desempenha um papel essencial no contexto educacional e industrial, sendo responsável pela produção de bens que influenciam diretamente a experiência e o bem-estar dos utilizadores. Este setor apresenta desafios específicos no que diz respeito à sustentabilidade, uma vez que envolve a utilização de recursos naturais, como madeira, plásticos e metais, em grande escala, além de exigir processos de produção com elevados consumos energéticos, gera também impactos ambientais significativos, como a emissão de gases com efeito de estufa, a produção de resíduos industriais e a necessidade de uma gestão eficiente dos recursos para minimizar desperdícios e reduzir a pegada ecológica. Esses fatores tornam fundamental a adoção de estratégias que mitiguem os impactos ambientais e promovam práticas mais eficientes e sustentáveis (Saraiva et al., 2018). Por isso, torna-se imperativo repensar as cadeias de produção e consumo, privilegiando a economia circular e a gestão responsável dos recursos naturais. A natureza funcional e durável dos produtos é essencial, mas a gestão do ciclo de vida do mobiliário é frequentemente negligenciada e, portanto, a forma como esses produtos são geridos ao longo de todo o seu ciclo de vida muitas vezes não recebe a devida atenção. Isso implica que aspetos como o design sustentável, a reutilização de materiais, a reciclagem e o descarte responsável tendem a ser ignorados ou subestimados, o que pode levar a impactos ambientais negativos e desperdício de recursos. (UNEP, 2011).

A perspetiva do ciclo de vida aplicada ao mobiliário escolar considera todas as fases do produto, desde a conceção e seleção de matérias-primas até à produção, distribuição, uso, manutenção

e, finalmente, a reciclagem. Neste sentido, a transição de uma economia linear para uma economia circular surge como uma necessidade urgente para minimizar os impactos ambientais e prolongar a vida útil dos produtos. (Zach & Vyletal, 2014) (Prieto-Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2018).

Estes princípios estão alinhados com os objetivos globais de desenvolvimento sustentável, permitindo que as empresas do setor mobiliário possam responder às exigências dos consumidores e regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. Contudo, a implementação de práticas circulares apresenta desafios significativos, especialmente para pequenas e médias empresas (PMEs). Embora o Lean Manufacturing seja amplamente reconhecido pelo seu impacto positivo em sistemas de produção, a sua aplicação integrada com sustentabilidade e a eficiência ambiental enfrenta barreiras técnicas e organizacionais. Entre os principais desafios estão:

- **Integração de Métricas de Sustentabilidade:** embora o Lean tenha como foco a eliminação de desperdícios, muitas vezes há dificuldade em traduzir essas melhorias em termos de sustentabilidade ambiental, como a redução de emissões de carbono ou a eficiência energética.
- **Análise do Ciclo de Vida:** implementar uma ACV abrangente requer a coleta e interpretação de dados complexos sobre os impactos ambientais em todas as fases do ciclo produtivo, desde a extração de matérias-primas até o descarte do produto.
- **Cultura Organizacional:** A implementação de um modelo que combina Lean, segurança e sustentabilidade exige mudanças culturais e comportamentais nas equipas envolvidas, o que nem sempre é fácil de alcançar.

1.3. Objetivos do estudo

Constituem principais objetivos deste estudo:

- Desenvolver métricas para avaliar a influência de práticas Lean no ciclo de vida de produtos inseridos no setor mobiliário, considerando aspetos de sustentabilidade e segurança ocupacional. Para atingir este objetivo, serão definidos indicadores de desempenho que permitam quantificar os ganhos obtidos em termos de eficiência produtiva, redução de desperdícios e melhoria das condições de trabalho. As métricas desenvolvidas irão abranger todas as fases do ciclo de vida dos produtos, desde a obtenção de matérias-primas até ao descarte final.
- Identificar os principais pontos de desperdício no processo de produção e propor soluções Lean que os mitiguem. Serão aplicadas ferramentas como o Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) e o Kaizen, com o objetivo de analisar o fluxo produtivo e eliminar atividades que não agregam valor ao produto final. Desta forma, será possível propor soluções práticas para otimizar os processos e reduzir custos operacionais.

Introdução

- Avaliar os impactos ambientais do ciclo produtivo por meio de uma abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida, focando na eficiência energética e na redução de emissões de gases poluentes. A ACV será utilizada como ferramenta para identificar os pontos críticos do ciclo de vida, permitindo avaliar os impactos ambientais associados à produção e propor melhorias que tornem o processo mais sustentável.
- Propor um modelo replicável que integre os dois pilares: produtividade e sustentabilidade. O modelo desenvolvido servirá como referência para outras empresas do setor, fornecendo diretrizes claras para a implementação de práticas Lean e circulares. A integração destes pilares irá garantir não apenas o aumento da eficiência produtiva, mas também a melhoria das condições de trabalho e a redução dos impactos ambientais

1.4. Importância do estudo

Este estudo pretende fornecer um contributo significativo para o setor do mobiliário escolar, ajudando as empresas a compreender as vantagens e desafios da implementação de práticas sustentáveis e eficientes. Ao analisar o ciclo de vida do mobiliário escolar, este trabalho pretende servir de base para o desenvolvimento de políticas e estratégias que promovam a transição para uma economia circular, garantindo a competitividade e sustentabilidade das empresas no mercado global.

Do ponto de vista prático, fornece às indústrias um modelo operacional capaz de:

- Melhorar a eficiência de produção, reduzindo custos e aumentando a competitividade.
- Minimizar os impactos ambientais.
- Garantir condições de trabalho mais seguras, contribuindo para o bem-estar dos trabalhadores e para o cumprimento de normas regulatórias.

No contexto específico do setor do mobiliário escolar, o estudo é particularmente relevante devido à ampla diversidade de produtos, os quais apresentam desafios em termos de reciclagem e impacto ambiental. Além disso, a segurança no ambiente de trabalho ganha ainda mais destaque nos sistemas de produção, que frequentemente envolvem equipamentos de alta temperatura e pressão.

1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos principais, conforme a descrição seguinte:

- Introdução: este capítulo tem como principal objetivo apresentar o contexto e a importância do tema abordado. São identificados os principais desafios enfrentados no setor estudado, com especial foco nas questões da sustentabilidade no ciclo de vida dos produtos. Adicionalmente, é feita a exposição dos objetivos gerais e específicos do estudo, bem como a justificação da sua importância no cenário atual, onde o equilíbrio entre produtividade, inovação e responsabilidade ambiental se torna cada vez mais

urgente. Por fim, é apresentada a estrutura do trabalho, de forma a guiar o leitor sobre os temas a serem discutidos ao longo dos capítulos.

- **Revisão de Literatura:** neste capítulo, são explorados os conceitos teóricos fundamentais que sustentam o desenvolvimento do trabalho. São abordados os princípios do Lean Manufacturing e as suas aplicações na otimização de processos produtivos, com destaque para a eliminação de desperdícios e a melhoria da eficiência operacional. Em seguida, é apresentada a Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta essencial para quantificar os impactos ambientais ao longo das diversas fases de um produto, desde a extração de matérias-primas até ao descarte final. Por fim, é discutida a importância da sustentabilidade como pilar fundamentais para a transformação de sistemas produtivos em modelos mais responsáveis e resilientes. Esta análise bibliográfica permite construir uma base sólida de conhecimento e fundamentar as abordagens adotadas no estudo.
- **Metodologia:** Este capítulo detalha o método de pesquisa utilizado, incluindo uma descrição aprofundada das etapas envolvidas na realização do estudo. Inicialmente, é apresentado o estudo de caso específico sobre a produção de mobiliário escolar incluindo a caracterização do processo produtivo, as matérias-primas utilizadas e os principais desafios encontrados. Posteriormente, são descritas as ferramentas analíticas aplicadas, como o Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM), 5S e Análise do Ciclo de Vida, que servem para identificar ineficiências, propor melhorias e avaliar os impactos decorrentes da implementação de práticas sustentáveis e Lean Manufacturing. A seleção da amostra, os métodos de recolha de dados (como questionários, entrevistas ou medições no local) e a estratégia de análise são igualmente apresentados, garantindo o rigor e a validade dos resultados obtidos.
- **Resultados e Discussão:** neste capítulo, são apresentados e analisados os principais resultados obtidos a partir da aplicação das ferramentas Lean e da abordagem sustentável. Os resultados são discutidos em termos de eficiência operacional, destacando-se os ganhos obtidos na redução de desperdícios, otimização de processos e aumento da produtividade. Além disso, é avaliado o impacto das melhorias introduzidas na sustentabilidade ambiental, com especial atenção à redução de resíduos, consumo de energia e emissões de carbono ao longo do ciclo de vida. A análise comparativa entre o cenário inicial e o final permite evidenciar os benefícios tangíveis e intangíveis da aplicação integrada das abordagens Lean e sustentáveis.
- **Conclusão:** O último capítulo sintetiza as principais descobertas do estudo, destacando os resultados mais relevantes e as suas contribuições para o setor estudado, entre outros. São apresentadas as conclusões em relação ao impacto da aplicação do Lean Manufacturing e da Avaliação do Ciclo de Vida na eficiência, sustentabilidade e do processo produtivo. Além disso, são discutidas as limitações encontradas durante o estudo, como restrições de tempo, acesso a dados ou limitações técnicas. Por fim, são sugeridas direções para futuras pesquisas, com ênfase na possibilidade de replicação

Introdução

do estudo para outros setores e na exploração de tecnologias emergentes que possam intensificar os ganhos obtidos em termos de eficiência e sustentabilidade.

Com esta estrutura detalhada, o trabalho visa proporcionar uma visão abrangente e multidimensional sobre a transformação de sistemas de produção tradicionais em modelos mais eficientes, sustentáveis e seguros. A análise apresentada foca em atender às exigências contemporâneas de produtividade, competitividade e responsabilidade ambiental, promovendo práticas como o Lean Manufacturing e a economia circular. Ao integrar esses conceitos, busca-se reduzir desperdícios, otimizar recursos e minimizar os impactos ambientais, ao mesmo tempo em que se aumenta o valor agregado dos processos produtivos. Assim, o trabalho oferece às empresas ferramentas práticas e estratégicas para enfrentar os desafios globais, promovendo um equilíbrio entre inovação, eficiência e sustentabilidade, essenciais para um futuro resiliente e competitivo.

2. Revisão Bibliográfica

No segundo capítulo, será apresentada a revisão da literatura relacionada à filosofia do Lean Manufacturing, com ênfase nas ferramentas diretamente associadas à realização deste trabalho. Nesse contexto, será exposta a metodologia adotada ao longo desta dissertação, a qual serve como diretriz para o cumprimento dos objetivos estabelecido.

2.1. Princípios do Lean Manufacturing

O Lean Manufacturing é uma filosofia de gestão operacional amplamente reconhecida por ter objetivo principal a eliminação de desperdícios em processos produtivos, promovendo a criação de valor para o cliente com o uso eficiente de recursos. Durante o período de reconstrução do Japão pós-Segunda Guerra Mundial, surgiu o Sistema Toyota de Produção (Toyota Production System - TPS), desenvolvido pelo engenheiro Taiichi Ohno, que estabeleceu as bases para o conceito de Lean Manufacturing (Vaz et al., 2023). Esta abordagem emergiu da necessidade de aumentar a competitividade e reduzir os desperdícios em um ambiente de recursos escassos.

A filosofia Lean caracteriza-se por seu foco na identificação e eliminação de desperdícios através da melhoria contínua. (Sundar et al., 2014). Através desta abordagem, é possível alcançar a maximização da produção, o aumento da eficiência e a diminuição de custos, proporcionando vantagens competitivas às empresas de produção em relação aos seus concorrentes (Shah & Ward, 2003). A implementação do Lean tem como objetivo final a criação de valor para o cliente, garantindo processos mais ágeis e eficazes.

Definição dos Princípios Fundamentais:

Womack e Jones (1996) destacam que o Lean Manufacturing está estruturado em cinco princípios básicos:

- **Definição de Valor:** o valor é sempre determinado a partir da perspectiva do cliente. Esta etapa inicial exige que as organizações compreendam profundamente as necessidades do cliente para que possam identificar quais atividades agregam valor e eliminar as que não o fazem (Costa et al., 2018). Este foco torna-se ainda mais relevante em cenários competitivos, onde a entrega de valor de forma ágil e eficaz é um diferencial (Ballesterro-Alvarez, 2012).
- **Mapeamento do Fluxo de Valor:** esta etapa visa identificar todas as etapas necessárias para levar um produto ou serviço ao cliente final, desde a concepção até a entrega. O

mapeamento do fluxo de valor (Value Stream Mapping - VSM) permite a identificação de gargalos e atividades que não agregam valor, como tempos de espera e stocks excessivos (Roriz et al., 2017)

- **Fluxo Contínuo:** fluxo de produção contínuo e bem estruturado é essencial para evitar paragens desnecessárias e melhorar a eficiência. O conceito de fluxo contínuo está diretamente relacionado à redução de lead time e à eliminação de interrupções entre as etapas de produção (Silva, 2019).
- **Produção Puxada:** neste princípio, a produção é guiada pela procura real do cliente, evitando a produção excessiva que resulta em stocks desnecessários. A aplicação do sistema Just-in-Time (JIT) é uma ferramenta comum para implementar este princípio (Roriz et al., 2017).
- **Busca pela Perfeição:** A melhoria contínua é um dos pilares do Lean Manufacturing. Através da abordagem Kaizen, as empresas promovem a identificação de oportunidades de melhoria e a participação ativa dos colaboradores em todas as etapas do processo produtivo (Sivarajan & Padmanabhan, 2014).

Além destes princípios, o Lean enfatiza a importância da padronização de processos, da capacitação das equipas e da utilização de ferramentas específicas, como o 5S, o mapeamento de fluxo de valor (VSM) e o Just-in-Time (JIT). Esta abordagem visa não apenas melhorar os resultados operacionais, mas também criar uma cultura organizacional destacada para a procura incessante pela excelência.

A implementação bem-sucedida dos princípios do Lean Manufacturing pode gerar benefícios significativos, como redução de custos, aumento da qualidade e flexibilidade, e maior satisfação do cliente. Contudo, a aplicação eficaz destes princípios requer um forte compromisso da liderança e a colaboração ativa de todos os níveis da organização.

2.1.1. Os sete principais desperdícios Lean

Este tipo de filosofia tem vindo cada vez mais a sofrer alterações com vista à sua evolução e caracteriza-se por ter como principal objetivo identificar e eliminar os desperdícios através da melhoria contínua. Deste modo é possível haver a maximização da produção, aumento da eficiência e diminuição dos custos, de modo a estas empresas de produção adquiram vantagem competitiva perante os seus rivais (Shah & Ward, 2003).

Os desperdícios no contexto do Lean Manufacturing são definidos como todas as atividades que consomem recursos, tempo ou espaço, mas não agregam valor ao produto final. Estes desperdícios, apresentados na Tabela 1, foram identificados e classificados no Sistema Toyota de Produção (TPS) e servem como base para a aplicação da filosofia Lean, visando maximizar a eficiência e reduzir custos. A eliminação dos desperdícios é, portanto, um dos pilares fundamentais para alcançar uma produção eficiente:

Tipo de desperdício	Definição
Transporte	<p>Produzir mais do que o necessário ou antes da procura real do cliente é um dos maiores desperdícios no Lean Manufacturing. A superprodução gera stocks desnecessários, maior consumo de recursos e espaço de armazenamento, além de aumentar os riscos de obsolescência do produto. A abordagem Just-in-Time (JIT) é amplamente utilizada para evitar este desperdício, sincronizando a produção com a procura.</p>
Produção excessiva	<p>Produzir mais do que o necessário ou antes da procura real do cliente é um dos maiores desperdícios no Lean Manufacturing. A superprodução gera stocks desnecessários, maior consumo de recursos e espaço de armazenamento, além de aumentar os riscos de obsolescência do produto. A abordagem Just-in-Time (JIT) é amplamente utilizada para evitar este desperdício, sincronizando a produção com a procura.</p>
Movimento desnecessário de pessoal	<p>Este desperdício ocorre quando há movimentos adicionais de operários ou equipamentos que não contribuem para a criação de valor. Movimentos repetitivos ou inadequados podem resultar em fadiga, aumento do tempo de ciclo e menor produtividade. Ferramentas como o 5S e a análise ergonómica são fundamentais para identificar e eliminar esses movimentos.</p>
Tempo de espera	<p>Processos que utilizam mais recursos do que o necessário ou que não são eficientes resultam em desperdício. Isso inclui etapas desnecessárias, inspeções excessivas e uso inadequado de tecnologia. O Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) é uma ferramenta essencial para identificar processos redundantes e propor melhorias.</p>
Processos inapropriados	<p>Processos que utilizam mais recursos do que o necessário ou que não são eficientes resultam em desperdício. Isso inclui etapas</p>

	desnecessárias, inspeções excessivas e uso inadequado de tecnologia. O Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) é uma ferramenta essencial para identificar processos redundantes e propor melhorias.
Inventários/equipamentos desnecessários	Stocks excessivos de matérias-primas, produtos semiacabados ou acabados resultam em altos custos de armazenamento, uso ineficiente de espaço e risco de obsolescência. Equipamentos ociosos ou desnecessários também são considerados desperdícios. A filosofia Lean busca reduzir stocks através da implementação de sistemas Just-in-Time e de técnicas como o SMED (redução de tempos de setup).
Defeitos	Produtos com defeitos ou fora das especificações resultam em retrabalho, desperdício de materiais e insatisfação do cliente. A melhoria contínua, aliada ao uso de ferramentas de qualidade, como o Kaizen, é essencial para minimizar os defeitos e garantir a entrega de produtos de alta qualidade.

Tabela 1 - Definição dos desperdícios

Associado a este tipo de filosofia estão diversas ferramentas capazes de auxiliar na otimização dos processos, tais como os 5S, o SMED, VSM e o TPM, entre outro tipo de ferramentas (Belekoukias et al., 2014).

2.1.2. Ferramenta para Eliminar os Desperdícios

5S

A metodologia 5S, surgiu no início da década de 1950 como parte do Sistema Toyota de Produção (TPS) e por mão de Takashi Osada. (Sorooshian et al., 2012). É uma ferramenta de organização e gestão do ambiente de trabalho amplamente reconhecida pela sua eficácia em melhorar a eficiência, a produtividade e a segurança nos processos industriais. Trata-se de um conjunto de práticas baseadas em cinco princípios japoneses que, em conjunto, quando aplicadas em um contexto favorável possibilitam atingir um ambiente organizado, limpo e eficiente, sendo a base para a implementação de outras práticas Lean e para o desenvolvimento de uma cultura de melhoria contínua.

Os 5S têm como objetivo não apenas criar um espaço de trabalho mais organizado, mas também estabelecer uma cultura empresarial centrada na melhoria contínua e na sustentabilidade. Estes princípios são frequentemente adaptados para atender às necessidades específicas de diferentes setores industriais, sendo reconhecidos pela sua flexibilidade e capacidade de promover mudanças organizacionais profundas e sustentáveis.



Figura 1- Metodologia 5S (Agrahari et al., 2015)

Os 5 Princípios dos 5S (A Common Sense Approach with the 5S Tool, n.d.)

- **Seiri (Utilização):** O primeiro princípio refere-se à triagem e separação de materiais, ferramentas e equipamentos. O objetivo é eliminar tudo aquilo que não é essencial para o trabalho, mantendo apenas os itens necessários e em bom estado de conservação. Essa etapa é fundamental para reduzir o desperdício de espaço e recursos, facilitando o acesso aos itens realmente úteis. Além disso, a prática do Seiri contribui para um ambiente mais seguro, ao remover objetos desnecessários que possam obstruir áreas de circulação ou representar riscos para os trabalhadores. Por exemplo, ferramentas obsoletas ou peças inutilizadas devem ser descartados ou alocados em áreas específicas para reciclagem ou reutilização.
- **Seiton (Organização):** após a triagem, os itens restantes devem ser organizados de forma lógica e funcional. O Seiton enfatiza a importância de definir um local específico para cada item e garantir que esses itens sejam armazenados de forma visível e acessível. Técnicas como o uso de etiquetas, marcações no chão e quadros de ferramentas são amplamente utilizadas para facilitar a localização e o retorno de materiais ao seu local apropriado. Este princípio não só economiza tempo, mas também reduz o stress dos trabalhadores, ao minimizar esforços desnecessários para encontrar ferramentas ou materiais.
- **Seiso (Limpeza):** Este princípio vai além da limpeza superficial. O Seiso promove a criação de uma cultura em que a limpeza é uma atividade contínua e integrada aos processos diários. Isso inclui não apenas a remoção de sujeira e resíduos, mas

também a identificação e eliminação das causas subjacentes da sujeira, como fugas ou processos mal geridos. Um ambiente limpo melhora a segurança, reduz defeitos nos produtos e aumenta a moral dos trabalhadores. Além disso, a prática regular da limpeza permite identificar falhas em equipamentos ou no espaço de trabalho, promovendo a manutenção preventiva.

- **Seiketsu (Padronização):** A padronização é a chave para garantir a consistência e a sustentabilidade das práticas anteriores. O Seiketsu visa estabelecer normas e procedimentos claros que permitam a manutenção da organização, limpeza e eficiência a longo prazo. Isso inclui a criação de checklists, a realização de treinamentos regulares e o uso de ferramentas visuais que lembrem os colaboradores de suas responsabilidades. A padronização também facilita auditorias e avaliações periódicas, garantindo que os objetivos de organização e eficiência sejam continuamente alcançados.
- **Shitsuke (Disciplina):** O último princípio, Shitsuke, refere-se à manutenção dos hábitos criados pelas etapas anteriores e à promoção de uma cultura organizacional focada na autodisciplina e na melhoria contínua. Este é o passo mais desafiador, pois exige o comprometimento de todos os colaboradores, desde a gestão até os operadores. A disciplina é cultivada através de formação contínua, de auditorias regulares e reforço positivo, garantindo que as práticas dos 5S se tornem parte integrante do dia a dia da organização. Além disso, o Shitsuke é essencial para sustentar os ganhos obtidos e para criar um ambiente de trabalho mais seguro, produtivo e agradável.

Os 5S oferecem uma série de benefícios para as organizações, indo além da simples organização do espaço de trabalho. A sua implementação possibilita atingir melhorias significativas na eficiência operacional, redução de desperdícios, aumento da segurança e fortalecimento da cultura organizacional. Não é apenas uma ferramenta de organização, mas também uma filosofia de trabalho que promove a eficiência, a sustentabilidade e a segurança. A sua aplicabilidade transcende o setor industrial, sendo uma prática valiosa para qualquer organização que procure melhorar seus processos e criar um ambiente de trabalho mais produtivo e harmonioso.

A organização do ambiente de trabalho promovida pelos 5S reduz o tempo gasto na procura de ferramentas e materiais, enquanto a limpeza contínua melhora a segurança e a qualidade dos produtos. A padronização facilita a identificação de problemas e a introdução de melhorias, enquanto a disciplina assegura que os resultados alcançados sejam mantidos a longo prazo.

Título	Resumo	Autor
<i>Study and Implementation of '5S' Methodology in the Furniture Industry</i>	Este estudo apresenta a aplicação da metodologia 5S em um grande armazém da indústria de móveis, localizado em Maharashtra, Índia. O objetivo principal foi melhorar a produtividade e eficiência no armazém, reduzindo desperdícios, organizando o ambiente de trabalho e implementando padrões	(Wani & Shinde, 2021)

<p><i>Warehouse for Productivity Improvement</i></p>	<p>visuais e operacionais. A necessidade surgiu devido à falta de organização do espaço físico, atrasos no processamento de materiais e baixa eficiência operacional. A implementação do 5S trouxe resultados significativos como os atrasos no mapeamento e armazenamento de materiais foram reduzidos, o que permitiu um aumento substancial no armazenamento realizado no mesmo dia. A quantidade de produtos inspecionados diariamente cresceu de 642 para 2195 em apenas quatro meses, enquanto a produção de itens reparados passou de 235 para 399 unidades em três meses. Além disso, a criação de áreas designadas e a aplicação do Red Tag contribuíram para a eliminação de materiais desnecessários, otimizando o processo e melhorando a eficiência geral.</p>	
<p><i>Implementation of 5s Methodology In a Metalworking Company</i></p>	<p>Este estudo foi realizado no setor de maquinagem de uma empresa metalúrgica com o objetivo de implementar a metodologia 5S para melhorar o ambiente de trabalho, segurança e produtividade. Inicialmente foi efetuada uma análise ao processo produtivo, posteriormente foram registados os principais problemas detetados e elaborado um plano de trabalho com vista a eliminar os problemas inicialmente encontrado. Este caso de estudo promoveu um local de trabalho mais seguro, um aumento da produtividade e uma redução do desperdício, assim como um melhor ambiente de trabalho.</p>	<p>(Costa et al., 2018)</p>
<p><i>Improving Internal Logistics of a Bus Manufacturing Using the Lean Techniques</i></p>	<p>Este estudo foi realizado numa fábrica de autocarros em Vila Nova de Gaia, Portugal, com o objetivo de otimizar a logística interna, concentrando-se nos processos de receção, armazenamento e abastecimento das linhas de montagem. O baixo nível de automação neste setor, aliado à necessidade de manter um fluxo contínuo de produção, exigiu a adoção de soluções. Através da implementação de várias ferramentas Lean como os 5S, Kanban, PDCA, entre outras possibilitaram a obtenção de resultados como por exemplo a redução do espaço ocupado por materiais não utilizados em 6,8% (4,32 m²). A implementação deste sistema permite um maior</p>	<p>(Mourato et al., 2020)</p>

controlo visual e uma melhor organização dos materiais, garantindo também um controlo mais rigoroso sobre materiais sensíveis, como colas e tubos, o que elimina desperdícios e faltas. Além disso, a gestão passa a ser mais eficiente e automatizada através da utilização de uma base de dados digital. Com isso, obtém-se uma maior eficiência e produtividade na logística interna, bem como uma melhor organização do espaço, tanto na linha de montagem como no armazém. Os benefícios refletem-se ainda na redução de desperdícios de tempo, movimentos e materiais, contribuindo para a melhoria das condições de trabalho e para uma maior satisfação dos operadores.

Tabela 2 - Casos de estudo

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida

Nas últimas décadas, o mercado mundial tem oferecido um leque muito vasto de produtos, tanto a nível de variedade como de qualidade (Silva, 2009). A consciencialização do impacto ambiental do associado ao processo produtivo de uma empresa impulsionou a necessidade de desenvolver ferramentas capazes de proteger e reduzir os efeitos ambientais provocados pelos mesmos, assim sendo uma das ferramentas criadas de modo a reduzir estes mesmos efeitos foi a “Avaliação do Ciclo de Vida”. Esta ferramenta é uma metodologia sistemática que tem como objetivo quantificar e avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto. Esta abordagem abrange desde a extração de matérias-primas, passando pela produção, transporte, uso e, finalmente, pela eliminação ou reciclagem (Curran, 2013).

A ACV engloba todas as fases do ciclo de vida de um produto ou serviço: a extração de matérias primas do ambiente (solo, água e ar), a produção de materiais e produtos finais, o uso do produto e, finalmente, o fim de vida, que pode incluir reutilização, reciclagem ou disposição final. Adicionalmente, os transportes entre estas fases também são contabilizados, permitindo uma análise abrangente de todas as atividades envolvidas no ciclo de vida. Esta metodologia torna possível identificar e quantificar os impactos acumulativos gerados ao longo de todas as etapas, frequentemente incluindo aqueles que escapam a análises ambientais tradicionais, como as emissões associadas à extração de recursos ou aos sistemas de transporte utilizados (Guinée et al., 2001; U.S. Environmental Protection Agency, 2006).



Figura 2 - Etapas do Ciclo de Vida (MetalsHub, n.d.)

Partindo do pressuposto de que todas as fases do ciclo de vida de um produto geram impactos ambientais, a ACV aplica o conceito de ciclo de vida de forma quantitativa, integrando as atividades associadas a processos e produtos. Em cada etapa, são monitorizadas as entradas (inputs) – como recursos, matérias-primas, energia e combustíveis – e as saídas (outputs), que incluem emissões para o ar, solo e água, bem como resíduos e produtos. A partir destes dados, é possível avaliar os impactos nos recursos naturais, nos ecossistemas e na saúde humana.

Existem diferentes abordagens de ACV adaptadas às necessidades específicas de cada estudo.

Entre elas: (Wulf et al., 2024)

- **cradle to grave** (do berço ao túmulo) avalia todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de recursos até à disposição final do produto.
- **cradle to gate** (do berço ao portão) concentra-se apenas nas fases anteriores à saída do produto da fábrica, sendo úteis quando os dados sobre o uso e o descarte são indisponíveis ou irrelevantes.
- **gate to gate** (do portão ao portão) restringe-se aos processos internos de uma organização, excluindo tanto os processos antes, aqueles que ocorrem antes de os materiais ou recursos chegarem à organização, e depois, que se referem como processos que acontecem após os produtos saírem da organização.
- **gate to grave** tem por base todos os processos de distribuição, uso e disposição final do produto

Estas variantes permitem adaptar a ACV a diferentes contextos, garantindo maior flexibilidade nos estudos.

A ACV evoluiu significativamente ao longo do tempo, adaptando-se às exigências crescentes de setores industriais e regulamentares. Esta dinâmica reflete-se na sua aplicação em diversas áreas, incluindo a indústria do mobiliário, onde pode contribuir para o design de produtos mais sustentáveis, a otimização de recursos e a redução de impactos ambientais. As abordagens de ciclo de vida continuam a expandir-se, integrando-se em iniciativas de economia circular e em

normas ambientais, como as ISO 14040 e ISO 14044, que fornecem diretrizes para garantir rigor e credibilidade nas análises realizadas.

Assim, a Avaliação do Ciclo de Vida não só fornece uma base quantitativa para avaliar os impactos ambientais, mas também orienta decisões estratégicas que promovam a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental em sistemas produtivos.

2.2.1. Aplicação da Análise do Ciclo de Vida no Setor do Mobiliário

A Avaliação do Ciclo de Vida é regida pelas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, que fornecem diretrizes rigorosas para sua aplicação, assegurando consistência e credibilidade nos resultados obtidos. A norma ISO 14040 estabelece os princípios e a estrutura da ACV, enquanto a ISO 14044 especifica requisitos detalhados e orientações metodológicas. Essas normas organizam a ACV em quatro etapas principais: definição do objetivo e do âmbito, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados (International Organization for Standardization [ISO], 2006). Estas fases permitem uma abordagem sistemática para identificar, quantificar e avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos (Sousa, 2010).

No setor de mobiliário escolar, a aplicação da ACV é crucial para identificar os pontos críticos do ciclo produtivo, onde os maiores impactos ambientais são observados. Esta ferramenta fornece informações essenciais para a tomada de decisões estratégicas, permitindo otimizar processos, reduzir desperdícios e aumentar a eficiência. Por exemplo, a escolha de matérias primas de baixo impacto ambiental, como madeira certificada pelo FSC, a integração de fontes de energia renováveis durante a produção e a implementação de sistemas de reciclagem são ações que podem ser guiadas pelos resultados da ACV (Sousa, 2010; Leitão, 2015).

No contexto da economia circular, a ACV torna-se ainda mais relevante, pois contribui para a avaliação de alternativas que prolonguem a vida útil dos produtos e minimizem a extração de recursos naturais. Isso inclui estratégias como a reprodução, a reutilização de componentes e o design modular, que facilitam a reparação e a reciclagem. As métricas mais comuns para avaliar a ACV incluem indicadores como pegada de carbono, consumo energético, uso de água e taxa de reciclagem, que permitem monitorizar e controlar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. (International Organization for Standardization [ISO], 2006).

A integração da ACV com práticas Lean e os princípios da economia circular cria uma abordagem para a otimização dos processos produtivos, resultando em reduções de custos e impactos ambientais. Por exemplo, a ACV pode ajudar a identificar oportunidades para eliminar desperdícios nas operações, enquanto orienta a escolha de materiais e tecnologias mais sustentáveis. No setor do mobiliário escolar, onde a durabilidade e a funcionalidade são prioridades, a ACV emerge como uma ferramenta indispensável para guiar a transição para modelos de produção mais sustentáveis, alinhados com as crescentes exigências de consumidores e reguladores. Estas práticas não só melhoram a competitividade das empresas, mas também reforçam seu compromisso com a sustentabilidade e a inovação (Leitão, 2015; Abrantes, 2021).

2.2.2. Evolução da ferramenta ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida teve as suas origens como uma abordagem focada inicialmente no consumo energético e na eficiência na utilização de matérias-primas. Esta ferramenta foi concebida na década de 1960, nos Estados Unidos, com o objetivo de enfrentar desafios relacionados com a gestão de recursos e as emissões ambientais. A primeira aplicação prática reconhecida deste conceito foi através da Análise de Perfil Ambiental e de Recursos (REPA - Resource and Environmental Profile Analysis), que consistia na quantificação do uso de recursos naturais e na avaliação de emissões geradas durante os processos produtivos (Filimonau, 2015).

Estas análises, levadas a cabo pelo Midwest Research Institute (MRI) e financiadas por empresas privadas como a Coca-Cola e a Mobil Corporation, serviram como um marco inicial para a aplicação da metodologia. Em 1965, a Coca-Cola solicitou ao MRI um estudo comparativo entre diferentes tipos de embalagens de refrigerantes, com o intuito de identificar qual apresentava menor impacto ambiental em termos de consumo de recursos e emissões geradas. Este tipo de análise tornou-se uma prática comum em vários setores industriais, particularmente durante a crise petrolífera dos anos 1970, que intensificou a preocupação global com a gestão eficiente dos recursos naturais (Curran, 1996; Curran, 2006).

Durante os anos 1980, o interesse pela avaliação de ciclo de vida sofreu uma diminuição devido à estabilização dos preços do petróleo. Contudo, a crescente preocupação global com as emissões de gases com efeito de estufa e a degradação ambiental resultaram numa nova fase de desenvolvimento da metodologia. Estudos mais avançados começaram a integrar novos fatores, como as emissões para a atmosfera, efluentes líquidos e resíduos sólidos, promovendo uma abordagem mais abrangente e detalhada.

Um dos marcos importantes nesta evolução ocorreu em 1984, com a realização de um estudo pelos Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA) a pedido do Ministério do Meio Ambiente da Suíça. Este trabalho, que avaliava o impacto ambiental de diferentes materiais de embalagem, gerou grande interesse na comunidade científica e foi transformado num banco de dados público, contribuindo para a disseminação da metodologia.

Nos anos 1990, tornou-se evidente a necessidade de padronizar as práticas de Avaliação do Ciclo de Vida. A diversidade de métodos e resultados gerava inconsistências e comprometia a credibilidade das análises. Para responder a este desafio, a Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) organizou workshops nos Estados Unidos e na Europa com o objetivo de criar diretrizes técnicas uniformes. Estas diretrizes formaram a base para a criação da primeira série de normas da ISO 14040, publicada em 1997. Posteriormente, estas normas foram revistas em 2006, resultando nas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que estabeleceram os princípios, os requisitos e as orientações para a realização de estudos de ACV (Filimonau, 2015).

Mais recentemente, a ISO introduziu a série 14070, desenvolvida especificamente para atender às necessidades das organizações que desejam avaliar o seu desempenho ambiental. Atualmente, a ACV é amplamente reconhecida como uma ferramenta indispensável para a avaliação detalhada dos impactos ambientais associados a produtos e serviços. Para além da

quantificação de emissões e resíduos, a ACV permite analisar os efeitos sobre a saúde humana e os ecossistemas, oferecendo uma base sólida para decisões estratégicas que visam a sustentabilidade e a melhoria do desempenho ambiental.

2.3. Economia Circular

A transição para a economia circular (EC) representa um dos maiores desafios para a indústria no século XXI, especialmente no setor mobiliário escolar, onde a dependência de recursos naturais e os altos níveis de desperdício são entraves significativos à sustentabilidade. A economia circular, como alternativa ao modelo linear de “extrair, produzir e descartar”, propõe um sistema regenerativo que maximiza o uso de recursos ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, promovendo práticas como reutilização, reciclagem e redução de resíduos. Esse modelo busca não apenas mitigar os impactos ambientais, mas também aumentar a eficiência produtiva e criar novas oportunidades de negócio baseadas em práticas sustentáveis (Dantas et al., 2021).

No setor mobiliário escolar, a implementação dos princípios da EC é essencial para enfrentar os impactos ambientais associados à produção e ao consumo. Este setor depende fortemente de recursos como madeira e metais, materiais cuja exploração intensiva resulta frequentemente em ciclos de vida curtos e elevados volumes de resíduos. A adoção de práticas circulares, como o reaproveitamento de materiais e a extensão da vida útil dos produtos, oferece uma solução eficaz para aumentar a eficiência dos recursos, reduzir desperdícios e promover uma relação mais sustentável entre produtores, consumidores e o meio ambiente (Soares et al., 2024).

2.3.1. Princípios da Economia Circular e Aplicações no Setor Mobiliário

A economia circular baseia-se em princípios fundamentais que têm grande relevância para o setor mobiliário escolar. Um desses princípios é o design para reutilização e reciclagem, que promove o desenvolvimento de produtos modulares e de fácil desmontagem. Esta abordagem facilita a recuperação de componentes e sua reintegração no ciclo produtivo, além de permitir que os produtos sejam adaptados para diferentes usos ao longo do tempo. A modularidade não só melhora a eficiência material, mas também reduz custos associados ao descarte e à aquisição de novas matérias-primas (Fraga, 2017). Por exemplo, móveis escolares modulares têm mostrado grande eficácia na extensão de sua vida útil, permitindo substituições rápidas de componentes específicos sem a necessidade de descartar o produto completo (Dantas et al., 2021).

Outro princípio importante é o uso eficiente de materiais, que incentiva a substituição de recursos virgens por alternativas recicladas ou certificadas, como madeiras provenientes de florestas sustentáveis. Essa abordagem minimiza a extração de matérias-primas, diminuindo os custos de produção e reduz o impacto ambiental associado à exploração intensiva de recursos naturais. Por exemplo, o uso de madeira certificada pelo FSC não só reduz a pressão sobre as florestas naturais, mas também garante práticas de manejo sustentável, promovendo a conservação ambiental (Leitão, 2015). Além disso, a incorporação de plásticos reciclados em

componentes estruturais dos móveis escolares tem demonstrado ser uma prática eficaz na redução de resíduos e na promoção da economia circular (Dantas et al., 2021).

A extensão da vida útil dos produtos também é um objetivo central da EC, alcançado por meio de designs duráveis e estratégias como a remanufactura e o leasing de produtos. Esses modelos permitem que os produtos mantenham seu valor ao longo do tempo, reduzindo a necessidade de novas produções e diminuindo a pegada ambiental associada. Por exemplo, o leasing de mobiliário escolar permite que as escolas substituam ou atualizem móveis de forma mais eficiente, enquanto os fabricantes podem reaproveitar os componentes antigos para novos ciclos produtivos (Soares et al., 2024).

2.3.2. Estratégias de Implementação

A implementação de práticas circulares na indústria de mobiliário escolar envolve várias estratégias que incluem desde a introdução de materiais sustentáveis até o uso de tecnologias avançadas para otimizar a produção. Tal como referido anteriormente a utilização de madeiras certificadas ou até mesmo materiais como os termoplásticos e colas ecológicas, por exemplo, demonstra como materiais sustentáveis podem substituir alternativas convencionais, reduzindo o impacto ambiental. Além disso, tecnologias de automação e IoT permitem monitorizar e otimizar processos produtivos, resultando em maior eficiência e menor desperdício (Dantas et al., 2021).

A reutilização de materiais é outra estratégia essencial. Resíduos como aparas de madeira e plásticos podem ser reaproveitados para criar produtos ou componentes. Empresas que utilizam esses resíduos para fabricar painéis compostos exemplificam como a economia circular pode gerar valor a partir de materiais descartados. Por exemplo, aparas de madeira transformadas em painéis compostos não só reduzem o desperdício, mas também oferecem uma alternativa mais económica e sustentável para a fabricação de móveis escolares (Fraga, 2017) (Leitão, 2015). Atualmente já diversas empresas destacam-se neste contexto ao transformar resíduos em produtos de valor acrescentado. Entre elas, encontram-se a STACBOND e a Sonae Arauco, que são exemplos claros de como é possível alinhar práticas empresariais com os princípios da economia circular. A STACBOND produz painéis compósitos de alumínio e adota um sistema avançado de recolha e reciclagem de resíduos nos seus processos de fabrico. Um dos seus produtos de destaque é o STACBOND ECOGREEN, que incorpora materiais reciclados e utiliza matérias-primas com baixas emissões, destacando-se pelo seu compromisso com a sustentabilidade ambiental (STACBOND, n.d.). A Sonae Arauco é uma referência no setor de painéis de madeira e participa no projeto EcoReFibre, que utiliza tecnologias inteligentes para reciclar madeira pós-consumo. Este projeto transforma resíduos em novos produtos de construção, reforçando o compromisso da empresa com a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos (Sonae Arauco, n.d.). Estas empresas são exemplos de como a economia circular pode ser integrada nos processos industriais para criar valor a partir de materiais descartados, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e para um futuro mais sustentável. Adicionalmente, a reutilização de metais provenientes de

estruturas de móveis antigos tem se mostrado eficiente na produção de novas unidades, reduzindo significativamente o custo e o impacto ambiental.

A produção baseada na procura, o que significa que ajusta a produção às necessidades reais do mercado, também é uma prática eficaz para minimizar inventários excessivos e evitar o desperdício de recursos. Essa abordagem não apenas reduz custos, mas também melhora a eficiência ao alinhar a produção com a procura do consumidor, eliminando a produção em excesso e o descarte desnecessário (Leitão, 2015). Empresas que adotaram essa prática relataram uma redução de até 20% nos custos de armazenamento e uma diminuição considerável nos resíduos gerados (Dantas et al., 2021).

2.3.3. Tecnologias de Suporte à Economia Circular

O uso de tecnologias avançadas desempenha um papel vital na transição para a economia circular no setor mobiliário escolar. Ferramentas de automação e digitalização facilitam a monitorização em tempo real de processos, otimizando operações e reduzindo desperdícios. Por exemplo, sensores conectados por IoT podem identificar ineficiências na linha de produção, permitindo ajustes imediatos que aumentam a eficiência energética e reduzem o desperdício material (Soares et al., 2024).

Além disso, tecnologias de impressão 3D com materiais reciclados têm demonstrado grande potencial no setor, permitindo a produção de peças personalizadas e sustentáveis enquanto promovem a reutilização de materiais anteriormente descartados. Esta abordagem tem sido particularmente útil para criar componentes sob medida para mobiliário escolar, melhorando a funcionalidade e reduzindo os custos associados à produção em massa (Fraga, 2017). Adicionalmente, a impressão 3D tem permitido o desenvolvimento de protótipos mais rápidos e económicos, reduzindo o tempo de desenvolvimento de novos produtos (Leitão, 2015). A integração dessas tecnologias não só melhora a eficiência operacional, mas também contribui para a redução da pegada de carbono associada à produção. Estudos recentes mostram que fábricas que adotam soluções automatizadas baseadas em economia circular podem reduzir suas emissões em até 30%, demonstrando a eficácia dessas práticas para alcançar metas de sustentabilidade (Dantas et al., 2021). Além disso, o uso de softwares avançados para gestão de resíduos tem permitido às empresas identificar áreas críticas e implementar ações corretivas com maior agilidade (Soares et al., 2024).

2.4. Sustentabilidade em Sistemas de Produção

A sustentabilidade em sistemas de produção tornou-se essencial face aos atuais desafios ambientais e sociais. Este conceito integra práticas que reduzem impactos ambientais, otimizam recursos e geram benefícios sociais e económicos ao longo da cadeia de valor, através da economia circular, da gestão responsável de resíduos e da eficiência energética, promovendo equilíbrio entre crescimento económico e preservação ambiental (Reganold, 2001; Gonzalez-Garcia et al., 2016). A transição exige substituir processos lineares por modelos

circulares e regenerativos, apoiados em tecnologias limpas e digitais, como IoT e inteligência artificial, que aumentam a eficiência e reduzem desperdícios (Daian et al., 2019).

A gestão eficiente de recursos é outro pilar central, incluindo o reaproveitamento de resíduos e a integração de energias renováveis, reduzindo custos operacionais e a pegada de carbono (Gonzalez-Garcia et al., 2016; Reganold, 2001). A dimensão social também é essencial, envolvendo condições de trabalho seguras, formação em práticas sustentáveis e interação com comunidades, reforçando reputação e fidelização dos consumidores (Daian et al., 2019). Normas internacionais, como as ISO 14001 e 14040, fornecem diretrizes que incentivam a melhoria contínua e aumentam a credibilidade no mercado (Reganold, 2001; Gonzalez-Garcia et al., 2016).

Tecnologias emergentes, como softwares de análise de ciclo de vida, big data e blockchain, oferecem rastreabilidade e transparência, enquanto a economia circular reforça a reutilização de materiais e a redução de desperdícios. Assim, a sustentabilidade em sistemas produtivos não é apenas um diferencial competitivo, mas uma necessidade estratégica para garantir resiliência empresarial e impacto positivo a longo prazo (Daian et al., 2019).

2.5. Integração de Lean, Segurança e Sustentabilidade

A integração de Lean Manufacturing com sustentabilidade, conhecida como Green Lean, é fundamental para transformar operações industriais em processos mais eficientes, seguros e ambientalmente responsáveis. Esta abordagem alia a redução de desperdícios e a melhoria da produtividade à harmonização de objetivos económicos, ambientais e sociais. Ferramentas como o Value Stream Mapping (VSM), Just-in-Time (JIT) e o sistema 5S, quando combinadas com estratégias sustentáveis, como o uso de materiais recicláveis e energia renovável, contribuem para reduzir emissões, otimizar recursos e minimizar impactos ambientais (Francis e Thomas, 2019; Hartini et al., 2018; Rame et al., 2023).

Estudos recentes destacam que a aplicação de ferramentas Lean com tecnologias digitais, como IoT e inteligência artificial, aumenta a eficiência, a transparência e a adesão a padrões globais, como as normas ISO 14001 e ISO 14044 (ISO, 2022; Gonzalez-Garcia et al., 2016). Além disso, a automação associada a melhorias ergonómicas reforça a segurança, reduzindo tarefas repetitivas e riscos ocupacionais. Práticas como o 5S, JIT e VSM promovem ambientes mais organizados, reduzem estoques e transportes desnecessários, e incentivam o alinhamento com metas globais de sustentabilidade (Rame et al., 2023; Reganold, 2001).

Apesar dos benefícios, persistem desafios, como os custos iniciais de implementação, a resistência organizacional e possíveis conflitos de objetivos, exemplificados por sistemas JIT mal planeados que podem gerar emissões adicionais (Daian et al., 2019; Gonzalez-Garcia et al., 2016). Ainda assim, oportunidades surgem com tecnologias emergentes, que permitem monitorização em tempo real e integração de soluções sustentáveis, enquanto normas internacionais fornecem uma estrutura confiável para reforçar a competitividade global (ISO 14001; Gonzalez-Garcia et al., 2016; Hartini et al., 2018).

Na dimensão social, a integração Lean-Sustentabilidade melhora condições de trabalho, promove formação contínua e fortalece a confiança de consumidores e stakeholders, cada vez mais atentos às práticas empresariais (Daian et al., 2019; Rame et al., 2023). O futuro desta integração depende da superação de desafios através de inovação, cultura de melhoria contínua e colaboração entre atores. Assim, Lean, segurança e sustentabilidade convergem para criar sistemas produtivos mais resilientes, competitivos e alinhados com as metas globais de desenvolvimento sustentável.

2.6. Métricas para avaliação da Sustentabilidade

A avaliação da sustentabilidade em sistemas de produção, particularmente no setor de mobiliário escolar, exige um conjunto robusto de métricas capazes de capturar e quantificar os impactos ambientais, sociais e económicos associados às operações produtivas. Essas métricas não só fornecem uma base para a análise detalhada dos processos, mas também orientam a implementação de estratégias que promovam a eficiência, a economia circular e o equilíbrio entre os pilares da sustentabilidade. A criação e o uso de indicadores são fundamentais para garantir que as decisões tomadas ao longo do ciclo de vida dos produtos sejam informadas, eficazes e alinhadas aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

A sustentabilidade, como conceito abrangente, requer medições precisas que permitam avaliar o desempenho em várias dimensões. No setor mobiliário escolar, onde os produtos são utilizados por longos períodos e em grande escala, métricas específicas tornam-se cruciais para identificar áreas de melhoria e promover práticas que minimizem impactos negativos. Indicadores como a pegada de carbono, a eficiência energética, a análise de ciclo de vida e a reutilização de materiais destacam-se como elementos essenciais para avaliar a sustentabilidade de forma holística (Marjaba & Chidiac, 2016).

2.6.1. Principais Métricas para Avaliação

A avaliação da sustentabilidade no setor de mobiliário escolar exige o uso de métricas robustas que permitam capturar com precisão os impactos ambientais, sociais e económicos ao longo do ciclo de vida dos produtos. Estas métricas têm um papel crucial na identificação de desafios, permitindo a formulação de soluções que não apenas maximizem a eficiência operacional, mas também promovam a responsabilidade ambiental e social de forma alinhada com os princípios da economia circular. Com base em estudos recentes, destacam-se as seguintes métricas:

- **Pegada de Carbono:** é uma métrica central que mede as emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto. Desde a extração das matérias-primas até ao transporte e descarte, esta métrica ajuda a identificar os pontos críticos de emissão. No setor mobiliário escolar, a substituição de fontes de energia fósseis por renováveis, como solar e eólica, tem mostrado grande potencial para reduzir significativamente as emissões (Rocha, 2012) (Ince et al., 2023).
- **Taxa de Materiais Reciclados:** mede a proporção de materiais reciclados utilizados em comparação aos materiais virgens. No caso do mobiliário escolar, o uso de

componentes reaproveitados, como madeira reciclada e plásticos, tem demonstrado ser uma alternativa eficiente para reduzir a exploração de recursos naturais (Rantala et al., 2024) (Yang, 2020).

- **Eficiência Energética:** esta métrica avalia o consumo de energia em cada etapa do processo produtivo, incentivando a adoção de práticas e tecnologias que aumentem a eficiência. Por exemplo, a modernização de equipamentos fabris com sistemas energeticamente eficientes pode resultar em reduções substanciais no consumo total de energia, otimizando custos e minimizando impactos ambientais (Tanzil & Beloff, 2006) (Mio et al., 2021).
- **Produção de Resíduos e Taxa de Reaproveitamento:** avalia a quantidade de resíduos gerados durante os processos produtivos e a percentagem destes que é reaproveitada. Esta métrica incentiva a implementação de estratégias de reciclagem e reuso, reduzindo significativamente o envio de materiais para aterros sanitários (Yang, 2020).
- **Impacto Social Positivo:** considera fatores como a satisfação dos trabalhadores, condições de segurança no local de trabalho e o envolvimento com comunidades locais. Estas métricas ajudam a avaliar o impacto social das atividades empresariais e podem ser usadas para fortalecer iniciativas de responsabilidade social corporativa (Çınar, 2005)
- **Análise do Ciclo de Vida e Reciclabilidade:** A ACV é uma ferramenta padronizada pelas normas ISO 14040 e 14044, que permite identificar e quantificar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos. Este método oferece uma visão abrangente, comparando diferentes materiais e processos para selecionar as opções mais sustentáveis (Abrantes, 2021). No mobiliário escolar, a ACV é particularmente útil para avaliar o impacto de materiais reciclados versus virgens.

Além dos indicadores ambientais, métricas sociais e económicas desempenham um papel essencial. No âmbito social, o índice de segurança ocupacional mede a frequência de acidentes no ambiente fabril, incentivando práticas de trabalho mais seguras e inclusivas. Já o impacto comunitário, que avalia o envolvimento das empresas com as comunidades locais, reflete o compromisso social e a responsabilidade corporativa. Economicamente, indicadores como o custo por ciclo de vida integram os custos de produção, manutenção e descarte, promovendo decisões financeiras mais sustentáveis. Essa métrica incentiva o design de produtos mais duráveis e eficientes, alinhando objetivos económicos com práticas sustentáveis (Rocha, 2012).

2.6.2. Principais Métricas para Avaliação

A criação de novas métricas pode ampliar ainda mais a capacidade de avaliação da sustentabilidade no setor mobiliário escolar:

- **Índice de Circularidade de Materiais (ICM):** mede a proporção de materiais reciclados ou reutilizados em comparação ao total de materiais empregados, incentivando práticas circulares.

- **Índice de Durabilidade e Reparabilidade (IDR):** avalia a vida útil do mobiliário e a facilidade de reparação, promovendo designs modulares e adaptáveis.
- **Índice de Eficiência Logística (IEL):** analisa o impacto ambiental associado ao transporte e armazenamento de produtos, propondo melhorias em rotas e sistemas de entrega.
- **Taxa de Reciclabilidade Pós-Uso (TRPU):** mede a percentagem de componentes recicláveis ao final da vida útil do produto, incentivando a reciclagem em larga escala.

A implementação dessas métricas exige um compromisso significativo por parte das empresas, incluindo investimentos em tecnologia, formação e monitorização contínua. No entanto, os benefícios são evidentes. As empresas que adotam sistemas de medição robustos relatam melhorias na eficiência operacional, maior alinhamento com regulamentações ambientais e aumento da confiança do consumidor (Tanzil & Beloff, 2006).

2.7. Análise crítica da revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma análise crítica da revisão bibliográfica realizada ao longo deste trabalho, com foco na integração de Lean Manufacturing, economia circular, segurança e a Avaliação do Ciclo de Vida. Inicialmente, são discutidas as conclusões finais extraídas da revisão, enfatizando as principais contribuições e lacunas identificadas na literatura. Em seguida, abordam-se as limitações das abordagens atuais e os desafios enfrentados pelas organizações na implementação de práticas integradas. Por fim, são sugeridas direções para trabalhos futuros, com o objetivo de aprofundar os conhecimentos e superar os obstáculos existentes.

2.7.1. Conclusões finais

A revisão bibliográfica permitiu identificar uma forte sinergia entre Lean Manufacturing, economia circular, segurança e a Avaliação do Ciclo de Vida, destacando o potencial destas abordagens para transformar sistemas produtivos em processos mais eficientes, sustentáveis e seguros. A filosofia Lean, com a sua ênfase na eliminação de desperdícios e na melhoria contínua, complementa os princípios da economia circular, que promovem a regeneração e reutilização de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos. Por sua vez, a ACV fornece uma base metodológica rigorosa para quantificar os impactos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até ao descarte ou reciclagem do produto final.

Estudos recentes demonstraram que a adoção de práticas integradas, como o uso de tecnologias digitais (IoT, inteligência artificial) e a implementação de ferramentas Lean (5S, VSM, Kaizen), resulta em melhorias significativas na eficiência operacional, na sustentabilidade ambiental e na segurança ocupacional. A integração da ACV como ferramenta de apoio tem se mostrado essencial para identificar pontos críticos de impacto ambiental e para orientar decisões estratégicas que otimizem os processos produtivos. Contudo, a revisão também

revelou que muitas organizações enfrentam barreiras na implementação destas práticas, incluindo custos elevados, resistências culturais e desafios tecnológicos.

Em termos práticos, a revisão evidenciou que a combinação de Lean, economia circular e ACV permite alcançar benefícios como a redução de emissões de carbono, a otimização de recursos e a promoção de cadeias de valor regenerativas. No entanto, a falta de padronização na aplicação da ACV e a necessidade de maior alinhamento entre políticas e regulamentações continuam a ser entraves para a adoção em larga escala.

2.7.2. Limitações e trabalhos futuros

Apesar dos avanços destacados, a revisão bibliográfica apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. Uma das principais limitações é a escassez de estudos empíricos que avaliem a integração de Lean, economia circular e ACV em setores específicos, como o mobiliário, com foco na segurança ocupacional. Além disso, muitas das abordagens analisadas baseiam-se em modelos teóricos ou em estudos de caso limitados, o que restringe a generalização dos resultados para diferentes contextos industriais.

Outro aspeto crítico é a insuficiência de dados quantitativos que demonstrem de forma clara os impactos económicos e ambientais da implementação destas práticas. Muitos estudos ainda carecem de métricas padronizadas, como as fornecidas pela ACV, que permitam avaliar e comparar o desempenho de sistemas produtivos Lean-Circular.

Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de investigações mais aprofundadas que explorem a aplicação prática da integração Lean-Circular-Segurança-ACV em diferentes indústrias, com ênfase em análises quantitativas e em metodologias híbridas que combinem dados empíricos e modelos preditivos. A utilização da ACV como ferramenta central pode permitir análises mais detalhadas dos impactos ambientais e económicos das práticas implementadas.

Além disso, é crucial promover colaborações entre academia e indústria para validar as teorias propostas e fomentar inovações tecnológicas que facilitem a adoção de práticas integradas. Estudos futuros podem também focar-se no desenvolvimento de frameworks que auxiliem as empresas na superação de barreiras culturais e económicas, bem como na criação de políticas públicas que incentivem a transição para modelos de produção mais sustentáveis e resilientes. Estas iniciativas não apenas preencherão lacunas existentes na literatura, mas também contribuirão para a construção de sistemas produtivos mais alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Revisão Bibliográfica

3. Métodos e Aplicação

Este capítulo apresenta de forma pormenorizada a abordagem metodológica adotada no presente estudo, que se centra na análise comparativa entre dois processos de corte de chapa metálica por laser. Um dos processos com recurso a gás industrial, azoto, e outro utilizando ar comprimido. Esta análise é realizada no contexto da produção de mobiliário escolar metálico, com o objetivo de avaliar e melhorar o desempenho ambiental do processo, sem comprometer a sua eficiência técnica e funcional.

A metodologia desenvolvida enquadra-se nos princípios da Avaliação do Ciclo de Vida, conforme estabelecido pelas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, proporcionando uma abordagem sistemática para quantificar os impactos ambientais associados a cada alternativa de corte. Para além da ACV, a investigação incorpora a recolha de dados experimentais em ambiente industrial real, bem como a análise técnico-operacional dos equipamentos envolvidos, de modo a garantir uma avaliação robusta e representativa das condições práticas de fabrico.

Complementarmente, são desenvolvidas métricas específicas de sustentabilidade, que integram indicadores ambientais, energéticos e materiais, com o intuito de apoiar decisões informadas na seleção de tecnologias de corte mais eficientes e sustentáveis. A abordagem adotada visa, assim, não apenas quantificar os impactos ambientais, mas também fornecer orientações técnicas para a melhoria contínua dos processos de produção, contribuindo para um setor do mobiliário escolar mais ecológico e eficiente.

O capítulo está estruturado em três subsecções principais:

- A Subsecção 3.1 procede à definição do sistema em estudo, descrevendo os materiais utilizados, os processos de fabrico analisados, os equipamentos envolvidos, bem como os limites e pressupostos considerados na análise do ciclo de vida;
- A Subsecção 3.2 apresenta os métodos de recolha, registo e tratamento de dados, tanto de natureza qualitativa como quantitativa, com destaque para os parâmetros operacionais da máquina de corte a laser, os consumos de energia e de gás auxiliar, e a geração de resíduos metálicos;
- Por fim, a Subsecção 3.3 descreve a modelação do ciclo de vida e os métodos de avaliação de impactos ambientais, incluindo os softwares e bases de dados utilizados, os indicadores selecionados, e os critérios aplicados à comparação entre as duas tecnologias de corte.

Esta abordagem integrada assegura uma avaliação multidimensional do processo de corte por laser, permitindo identificar oportunidades de melhoria que combinem desempenho técnico com sustentabilidade ambiental.

3.1. Definição do Sistema e Delimitação do Estudo

Nesta subsecção procede-se à caracterização detalhada do sistema técnico em análise, com o objetivo de estabelecer os limites e pressupostos fundamentais para a avaliação comparativa dos dois métodos de corte a laser aplicados ao fabrico de componentes metálicos para mobiliário escolar. Esta etapa é crucial para garantir a coerência e a transparência da Avaliação do Ciclo de Vida, bem como para assegurar a comparabilidade entre as duas configurações de processo estudadas: corte com gás industrial e corte com ar comprimido.

O sistema em estudo corresponde à fase de corte de chapas metálicas, especificamente aço-carbono, que serão posteriormente utilizadas na produção da estrutura de armários escolares. O foco é colocado na operação de corte por laser, um processo amplamente utilizado pela sua precisão, repetibilidade e eficiência em ambientes industriais.

3.1.1. Descrição dos equipamentos utilizados

O processo de corte foi efetuado numa máquina de corte a laser de fibra ótica Motofil MFL315, equipada com CNC. Este equipamento, fabricado em 2019, apresenta o número de série 010021701 e o tipo I071C3155G310. A fonte laser instalada possui uma potência máxima de trabalho de 4 kW, sendo a potência elétrica total instalada de 5 kW.

A MFL315 foi concebida para a execução de cortes de elevada precisão e eficiência em chapas metálicas de diferentes materiais e espessuras. A sua estrutura robusta, de conceção mecano-soldada, foi especialmente desenvolvida para reduzir ao mínimo as vibrações durante o processo, assegurando uma elevada precisão dimensional e um acabamento superficial de qualidade nas peças produzidas.

Entre as suas principais características destaca-se o sistema de troca automática de mesas de corte, que permite a preparação de uma chapa em simultâneo com o corte de outra. Esta funcionalidade reduz significativamente os tempos de paragem entre operações, otimizando o fluxo produtivo, aumentando a eficiência global do processo e potenciando a produtividade industrial.

Especificações técnicas relevantes da Motofil MFL315 2kW:

- **Área útil de corte:** 3030 mm x 1530 mm
- **Tipos de cortes:** Nitrolaser, Oxicorte e corte a ar comprimido
- **Espessura máxima de corte:**
 - Aço carbono: até 14 mm
 - Aço inoxidável: até 8 mm

- Alumínio: até 6 mm
- **Sistema de controlo:** CNC com interface amigável e suporte para importação de ficheiros CAD
- **Sistema de movimentação:** Motores de alta precisão com guias lineares
- **Sistema de segurança:** sistemas de segurança passiva com limites de segurança por encoders, limites por fim de curso, sistemas anticolisão, segurança ativa e segurança elétrica;

A utilização da mesma máquina para a realização de ambos os métodos de corte permite eliminar variáveis externas associadas ao equipamento. Desta forma, garante-se que as diferenças observadas nos resultados obtidos podem ser atribuídas exclusivamente ao tipo de gás auxiliar utilizado no processo.

- **Sistema de fornecimento de gases auxiliares:**
 - **Cenário com gás industrial:** neste cenário, foram utilizados gases auxiliares de elevada pureza, nomeadamente azoto (N_2), fornecido em estado comprimido por meio de garrafas pressurizadas ou tanques criogénicos. A pureza dos gases foi certificada, com valores de 100% para o azoto, conforme especificado nas respetivas fichas técnicas do fornecedor, como se pode verificar no anexo A. A gestão logística do fornecimento destes gases – incluindo o transporte, armazenamento e manutenção das garrafas – foi assegurada por um operador externo especializado, nomeadamente a empresa Acail Gás S.A. Os gases eram distribuídos até à máquina de corte por uma rede interna equipada com válvulas de segurança, reguladores de pressão e sistemas de monitorização, garantindo um fornecimento contínuo, estável e controlado, em conformidade com os requisitos operacionais do processo de corte por laser.
 - **Cenário com ar comprimido:** no cenário com ar comprimido, o gás auxiliar foi gerado localmente através de um compressor da marca Ingersoll Rand, modelo RSe11ne-A13, com capacidade de fornecimento de até 1260 L/min e pressão de operação ajustável entre 8 e 13 bar. Este compressor foi acoplado a um sistema de filtração em múltiplas etapas, concebido para remover eficazmente partículas sólidas, humidade e vapor de óleo, assegurando uma qualidade de ar compatível com os requisitos técnicos do corte por laser. Adicionalmente, foi integrado um secador de ar do tipo refrigerado (ou adsorvente, dependendo do equipamento utilizado) e um conjunto de filtros de linha em conformidade com a norma ISO 8573-1, atingindo uma classificação de qualidade Classe 1.4.1 (Classe 1 para partículas sólidas, Classe 4 para humidade e Classe 1 para óleo residual). Esta configuração garantiu não apenas a expulsão eficaz do material fundido e a proteção do feixe laser durante a execução do corte, mas também a fiabilidade e estabilidade do processo de fabrico.

Ambos os sistemas apresentam vantagens e limitações distintas, tanto do ponto de vista técnico como ambiental. O recurso a gases industriais proporciona maior estabilidade e pureza

controlada, o que se traduz em cortes mais precisos e velocidades superiores, sobretudo em materiais sensíveis à oxidação. Em contrapartida, a utilização de ar comprimido produzido localmente configura uma alternativa mais económica e potencialmente mais sustentável, ao reduzir a dependência de fornecedores externos, diminuir os custos logísticos e limitar as emissões associadas ao transporte e à compressão industrial de gases.

3.1.2. Unidade funcional

A unidade funcional definida para este estudo consistiu no corte de uma chapa metálica “mãe” com dimensões de 2500 mm × 1250 mm, espessura de 0,8 mm e peso aproximado de 19,82 kg, em peças cortadas de 430 × 187 mm, conforme ilustrado na figura 3.



Figura 3 - Chapa em estudo – 430 mm x 187 mm

Este intervalo de espessuras representa a gama mais comum de materiais utilizados na produção de estruturas metálicas para mobiliário escolar, nomeadamente prateleiras, como ilustrado na Figura 4, em que a conjugação entre resistência mecânica e leveza estrutural constitui um requisito essencial.



Figura 4 - Produto Final

A definição da unidade funcional constitui uma etapa fundamental na estruturação de qualquer estudo de Avaliação do Ciclo de Vida, uma vez que estabelece a referência sobre a qual todos os fluxos de entrada e saída do sistema serão quantificados e comparados. A adoção desta unidade funcional permite a normalização sistemática de todos os fluxos associados ao processo, incluindo:

Resultados e Discussão

- o consumo energético da máquina de corte, expresso em função da superfície de chapa processada, o que assegura a comparabilidade entre equipamentos e condições operacionais distintas;
- o consumo de gás auxiliar, reportado em volume normalizado, possibilitando a avaliação direta do impacto da escolha do fluido de corte na eficiência do processo;
- a geração de resíduos metálicos como aparas, rebarbas e perdas de material, que constituem um indicador relevante de eficiência material e de potenciais fluxos para reciclagem;
- a produção de emissões diretas associadas ao processo de corte, sobretudo gases e partículas gerados pela interação entre o feixe laser e o material metálico.

Desta forma, a definição da unidade funcional assegura uma base comum de comparação entre os cenários estudados, permitindo a quantificação relativa dos impactos ambientais, operacionais e económicos decorrentes da adoção de diferentes tecnologias de corte ou gases auxiliares. Tal abordagem é consistente com os princípios metodológicos da ACV, garantindo que os resultados obtidos sejam objetivos, comparáveis e reproduzíveis.

Na prática industrial, o aproveitamento de chapas metálicas tende a ser maximizado através da aplicação de técnicas de aninhamento de peças, em que diferentes geometrias são estrategicamente dispostas sobre a mesma chapa, reduzindo o volume de desperdício e aumentando a eficiência global do processo, tal como se pode verificar na figura 5. No entanto, para este estudo optou-se por uma abordagem metodológica simplificada, na qual apenas um modelo de peça foi considerado por chapa. Esta decisão teve como objetivo isolar a variável em análise, o tipo de gás auxiliar utilizado, evitando interferências decorrentes da complexidade geométrica, da diversidade de componentes ou da variabilidade do aninhamento. Desta forma, os resultados obtidos podem ser atribuídos, com maior grau de confiança, às diferenças entre os processos de corte avaliados, reforçando a robustez das conclusões.

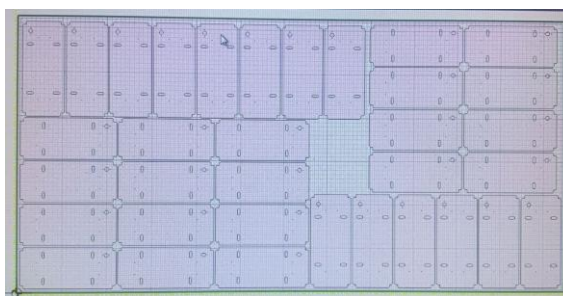


Figura 5 - Distribuição da peças cortadas na chapa "mãe"

A escolha de uma unidade funcional baseada na área efetivamente cortada justifica-se ainda pela sua pertinência em termos industriais. O desempenho de processos de corte a laser está fortemente correlacionado com a superfície trabalhada, uma vez que parâmetros como o tempo de operação, o consumo energético, a quantidade de gás auxiliar utilizado e a eficiência produtiva dependem diretamente da área processada e não apenas da quantidade de peças finais produzidas. Assim, esta métrica assegura não só a coerência metodológica do estudo,

como também a sua aplicabilidade prática, permitindo que os resultados possam ser extrapolados para contextos industriais reais com diferentes tipologias de peças.

Em síntese, a definição da unidade funcional adotada neste trabalho desempenha um papel central na consistência da análise, na comparabilidade entre cenários e na interpretação dos resultados. Ao considerar o corte de uma chapa metálica estandardizada em peças cortadas de dimensões uniformes, garante-se que as diferenças observadas nos indicadores ambientais e operacionais refletem efetivamente as características técnicas e de sustentabilidade associadas às opções tecnológicas avaliadas.

3.1.3. Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema foram estabelecidas segundo uma abordagem do tipo gate-to-gate, compreendendo o percurso desde a entrada da chapa metálica na unidade fabril até à sua saída já cortada em peças cortadas. Assim, a análise incide exclusivamente sobre a etapa de corte a laser, excluindo todas as fases anteriores, por exemplo, a produção e transporte da chapa metálica até à fábrica, e posteriores como operações de conformação, soldadura ou acabamento superficial. Esta delimitação metodológica tem como principal objetivo isolar o impacto ambiental e operacional diretamente associado à variável em estudo, nomeadamente o tipo de gás utilizado no corte. Deste modo, assegura-se que as diferenças identificadas entre cenários resultam unicamente da alteração desta variável, eliminando potenciais fatores de confusão relacionados com etapas invariáveis do processo produtivo.

A escolha de uma perspetiva gate-to-gate justifica-se ainda pela sua coerência com a realidade industrial: na prática, o corte a laser constitui uma operação autónoma dentro da linha de fabrico, com inputs e outputs específicos que podem ser avaliados de forma independente. Tal abordagem permite uma quantificação mais rigorosa e transparente dos consumos energéticos, dos fluxos materiais e das emissões associadas, reforçando a credibilidade dos resultados obtidos.

Dentro das fronteiras do sistema foram considerados os seguintes elementos:

- Consumo energético da máquina de corte: inclui a energia elétrica consumida pela Motofil MFL315 durante o processamento, abrangendo não apenas a emissão do feixe laser, mas também os sistemas auxiliares como motores de movimentação dos eixos, CNC, controlo ótico. O consumo foi normalizado em função da área processada, assegurando a comparabilidade entre cenários.
- Consumo energético do compressor de ar: no cenário em que é utilizado ar comprimido como gás auxiliar, foi contabilizado o consumo energético do compressor industrial responsável pela geração, acondicionamento e fornecimento do ar. Nesta conta incluem-se as perdas por compressão, os requisitos de filtragem e a energia necessária para manter as condições de pressão adequadas ao corte a laser.
- Consumo de gás industrial: no cenário em que se recorre a azoto como gás auxiliar, foi registado o consumo volumétrico por metro quadrado de chapa processada. Para além do fornecimento direto, foram incluídas as etapas internas de armazenamento,

pressurização e distribuição até ao ponto de utilização, de modo a refletir de forma mais completa o impacto associado à utilização deste recurso.

- Quantidade e gestão de resíduos metálicos: contabilizam-se as aparas, sobras de material e perdas associadas ao processo de corte e ao aninhamento da chapa. Os resíduos foram registados em peso e, apesar de serem encaminhados para reciclagem interna ou externa, a sua consideração é essencial para avaliar a eficiência no aproveitamento da chapa e os impactos ambientais associados.

Foram excluídas das fronteiras do sistema todas as etapas anteriores, como a extração e transformação das matérias-primas, a produção da chapa metálica e o respetivo transporte até à unidade fabril, bem como todas as etapas posteriores, designadamente operações de soldadura, pintura, montagem final e logística de distribuição. Esta exclusão fundamenta-se no facto de tais etapas não sofrerem qualquer influência da variável em análise, isto é, a seleção do gás auxiliar no processo de corte a laser, mantendo-se invariáveis em todos os cenários considerados.

Este enquadramento metodológico assegura que a análise permaneça focada, objetiva e comparável, permitindo que as diferenças observadas nos indicadores ambientais, energéticos e operacionais resultem exclusivamente do tipo de gás auxiliar utilizado. Ao restringir a avaliação ao processo de corte, elimina-se a interferência de fatores externos e garante-se que os resultados obtidos possam ser diretamente associados às opções tecnológicas estudadas.

3.1.4. Assunções e limitações

Para assegurar a consistência, a comparabilidade e a viabilidade da Avaliação do Ciclo de Vida aplicada ao presente estudo, tornou-se necessário estabelecer um conjunto de assunções operacionais e metodológicas que funcionam como base da modelação. A definição destas assunções não constitui apenas uma formalidade metodológica, mas sim uma etapa essencial para delimitar o âmbito da análise e clarificar quais os parâmetros e condições em que os resultados podem ser considerados válidos.

As assunções foram formuladas com base em três fontes principais de informação:

- I. dados técnicos reais, obtidos a partir das especificações fornecidas pelo fabricante do equipamento e dos registos internos da unidade fabril;
- II. observações industriais diretas, resultantes da monitorização do processo de corte durante a campanha experimental;
- III. literatura científica e técnica de referência, utilizada para complementar e validar os valores adotados, nomeadamente no que respeita a rendimentos energéticos médios e práticas de operação comuns no setor.

Ao integrar estas três dimensões, assegura-se que os pressupostos definidos refletem simultaneamente a realidade prática do processo, o conhecimento técnico consolidado e a robustez científica necessária a uma análise de ACV. Deste modo, as assunções funcionam como

pressupostos fundamentais que permitem modelar o sistema de forma consistente, definindo os limites de validade dos resultados obtidos e a fiabilidade das comparações entre cenários.

As principais suposições adotadas são as seguintes:

- Desempenho da máquina de corte a laser Motofil MFL315: considerou-se que o desempenho da máquina, em termos de potência efetiva do feixe laser, velocidade de corte e qualidade dimensional das peças produzidas, é equivalente em ambos os cenários analisado. Esta equivalência aplica-se desde que os cortes sejam realizados dentro da mesma gama de espessuras, que corresponde ao intervalo mais representativo das aplicações industriais analisadas. Eventuais diferenças residuais, como a formação de rebarbas, foram tratadas como variação estatística, sendo consideradas insignificantes do ponto de vista metodológico. Desta forma, garante-se que a comparação entre os cenários incide unicamente sobre a variável em estudo e não sobre fatores secundários.
- Consumo energético do compressor de ar: no cenário em que se recorre a ar comprimido localmente gerado, foi incluído de forma explícita o consumo energético do compressor industrial, integrando todas as etapas necessárias à produção e acondicionamento do ar comprimido. Para além da energia consumida durante o funcionamento contínuo do compressor, foram também contabilizadas as perdas inerentes ao processo de compressão, a energia adicional exigida para as operações de filtragem e secagem do ar, bem como a manutenção das condições de pressão necessárias ao corte por laser. A eficiência global do sistema de ar comprimido foi estimada com base em valores médios reportados na literatura técnica. Esta abordagem assegura que a modelação do consumo energético reflete com rigor a realidade industrial, evitando subestimações do impacto associado ao uso de ar comprimido.
- Origem da energia elétrica utilizada nas operações industriais: para efeitos de cálculo das emissões associadas à eletricidade consumida, assumiu-se um mix energético fixo, correspondente à matriz elétrica nacional de Portugal. Este mix inclui uma combinação de fontes renováveis como hídrica, eólica e solar, gás natural e uma componente residual proveniente do carvão e de interligações com sistemas energéticos vizinhos. A adoção deste pressuposto assegura que não existem variações externas que possam influenciar a análise comparativa entre os dois cenários. Desta forma, qualquer diferença observada nos impactos ambientais e operacionais é exclusivamente atribuída à variável em estudo. Este pressuposto encontra-se em conformidade com as boas práticas metodológicas da ACV, ao garantir que as condições de comparação são homogéneas.
- Perdas por desperdício metálico: as perdas associadas ao processo de corte foram também incluídas na análise, englobando sobras de chapa resultantes do aninhamento das peças, falhas ocasionais de corte e imprecisões operacionais inevitáveis. A quantificação destes resíduos foi realizada com base em dados empíricos recolhidos durante a campanha experimental, complementados por registos históricos disponibilizados pela unidade fabril. Embora se reconheça que a utilização de diferentes gases auxiliares pode originar variações marginais, nomeadamente ao nível da precisão

geométrica ou da formação de rebarbas, estas diferenças foram consideradas negligenciáveis dentro da margem de erro admitida. Assim, assegura-se que os resíduos contabilizados refletem a realidade média do processo, sem comprometer a comparabilidade entre cenários.

Estas assunções, ainda que simplificadoras, foram concebidas de forma a garantir o equilíbrio entre realismo e aplicabilidade metodológica. A sua robustez resulta não só do facto de se basearem em dados empíricos e técnicos fiáveis, mas também da validação cruzada realizada com engenheiros e operadores da unidade fabril, cuja experiência prática contribuiu para confirmar a pertinência das escolhas adotadas.

Este enquadramento metodológico assegura, portanto, que os resultados do estudo apresentam rastreabilidade, transparência e reprodutibilidade, três requisitos fundamentais em qualquer abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida. Ao seguir as recomendações e diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, a análise reforça a sua credibilidade académica e científica, garantindo que as conclusões extraídas são comparáveis com outros estudos desenvolvidos sob a mesma lógica metodológica.

Finalmente, importa salientar que as limitações inerentes às assunções adotadas serão objeto de discussão crítica no Capítulo 5, onde se analisará em detalhe a sua influência potencial nos resultados e a margem de incerteza associada. Esta abordagem contribui para uma leitura mais equilibrada dos resultados, permitindo que o estudo seja não apenas tecnicamente fundamentado, mas também metodologicamente transparente e academicamente rigoroso.

3.2. Métodos de Recolha, Registo e Tratamento de Dados

Esta subsecção descreve de forma aprofundada os procedimentos adotados para a recolha, registo e tratamento dos dados utilizados na análise comparativa dos dois sistemas de corte por laser em estudo. A qualidade desta informação empírica assume uma relevância central, uma vez que constituem a base sobre a qual assenta toda a modelação do ciclo de vida e, conseqüentemente, a quantificação dos impactos ambientais, operacionais e materiais associados a cada cenário. Sem dados consistentes, representativos e devidamente validados, qualquer exercício de Avaliação do Ciclo de Vida ficaria comprometido em termos de credibilidade científica e de aplicabilidade prática.

A recolha de dados foi conduzida em ambiente de produção real, o que se revelou essencial para assegurar a representatividade das condições estudadas. Diferentemente de um ensaio laboratorial, onde as variáveis podem ser rigidamente controladas, o contexto fabril integra as flutuações e constrangimentos próprios da operação industrial, permitindo que os resultados reflitam de forma mais fiel a realidade operacional. A recolha decorreu sob acompanhamento direto de pessoal técnico especializado, incluindo engenheiros de processo e operadores experientes, cuja participação não só garantiu a correção dos registos efetuados, como também permitiu contextualizar fenómenos observados que poderiam, de outra forma, ser mal interpretados.

O foco principal da recolha centrou-se nos parâmetros de desempenho da máquina de corte a laser, nomeadamente os consumos energéticos, os consumos de gases auxiliares e a quantidade de resíduos metálicos resultantes. Estes indicadores foram considerados fundamentais por estarem diretamente ligados à eficiência do processo e ao impacto ambiental associado. Contudo, a abordagem não se limitou à recolha de dados quantitativos. Foram igualmente registadas observações qualitativas, relacionadas, por exemplo, a presença ou ausência de rebarbas. A inclusão deste tipo de informação justifica-se pela importância de captar uma visão mais holística do sistema, na medida em que aspetos qualitativos podem ter repercussões indiretas em consumos adicionais de energia ou em perdas de material, ainda que tal não seja imediatamente evidente a partir de dados numéricos isolados.

Para garantir consistência e comparabilidade, a recolha de dados foi organizada segundo um plano experimental previamente estruturado, no qual foram definidos critérios claros de amostragem, variáveis a monitorizar e procedimentos de medição uniformes. Este planeamento foi essencial para assegurar que as medições efetuadas em diferentes momentos e por diferentes operadores pudessem ser comparadas entre si sem introduzir enviesamentos. Para cada cenário considerado foram realizadas séries contínuas de produção, de modo a captar o comportamento médio do processo e não apenas valores pontuais que poderiam estar sujeitos a flutuações momentâneas. A repetição dos ensaios, distribuída por diferentes turnos de trabalho, permitiu ainda identificar e mitigar potenciais desvios associados à variabilidade humana ou às condições de operação da máquina.

Para complementar os dados recolhidos diretamente em contexto fabril, foram igualmente integradas informações adicionais, obtidas a partir de fontes secundárias, como literatura científica especializada. Estes dados foram particularmente relevantes para caracterizar consumos energéticos indiretos.

Em síntese, a abordagem adotada para a recolha e tratamento de dados procurou equilibrar rigor científico com representatividade prática. A integração de medições quantitativas, observações qualitativas, validações cruzadas e dados complementares contribuiu para construir uma base sólida e fiável de informação, capaz de sustentar a análise comparativa dos dois cenários de corte a laser. Este processo assegura não apenas a coerência interna do estudo, mas também a sua conformidade com os princípios de transparência, rastreabilidade e reprodutibilidade preconizados pelas normas internacionais da Avaliação do Ciclo de Vida (ISO 14040 e 14044).

3.2.1. Metodologia de Trabalho

Para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida, procedeu-se a uma consulta detalhada das normas NP EN ISO 14040:2008 e NP EN ISO 14044:2010, que estabelecem os princípios, requisitos e orientações para a execução de estudos de ACV. Estas normas forneceram a base metodológica para a definição do escopo, delimitação de fronteiras do sistema e seleção da unidade funcional, garantindo que todo o estudo se mantivesse alinhado com as melhores práticas internacionais. Complementarmente, foram consultados documentos internos relacionados com o produto, tais como fichas técnicas dos gases, instruções de operação e

Resultados e Discussão

manuais da máquina de corte e relatórios históricos de produção. Para reforçar a validade prática dos dados, realizaram-se visitas à unidade fabril, permitindo observar diretamente o funcionamento do equipamento e a organização do processo produtivo. A obtenção de informação foi complementada por comunicação direta com colaboradores, realizada por vezes de forma espontânea e, noutras ocasiões, através de entrevistas estruturadas, nas quais se utilizaram questionários previamente elaborados, assegurando que todas as questões relevantes para a avaliação fossem abordadas de forma consistente. Para além destas abordagens presenciais, recorreu-se também a pesquisa em meios digitais e bases de dados especializados, garantindo que os dados obtidos fossem abrangentes e consistentes com a literatura existente.

O planeamento da campanha experimental constituiu uma fase crítica do estudo, uma vez que a qualidade e fiabilidade dos dados recolhidos dependem diretamente da metodologia adotada. Considerando a complexidade do processo de corte por gases auxiliares em ambientes industriais reais, onde fatores como variações de temperatura, experiência do operador e pequenas flutuações do equipamento podem influenciar os resultados, foi delineado um esquema que assegurasse a representatividade estatística dos dados e minimizasse o efeito de variáveis externas não controladas. Este planeamento envolveu a definição clara das condições experimentais, critérios de amostragem, procedimentos de medição e protocolos de registo, garantindo que todos os dados recolhidos fossem comparáveis entre si e adequados para a modelação do ciclo de vida.

No que respeita à definição das condições experimentais, a campanha baseou-se na execução de séries contínuas de produção, durante as quais foram realizadas medições sistemáticas dos parâmetros operacionais da máquina e observações qualitativas sobre os resultados obtidos. Esta abordagem permitiu captar a variabilidade inerente ao processo industrial, incluindo oscilações causadas pelas condições ambientais, diferenças entre operadores e eventuais alterações no desempenho do equipamento ao longo do tempo. Para efeitos do estudo, considerou-se o valor médio das medições realizadas, permitindo uma representação robusta do comportamento típico do sistema.

O estudo centrou-se em duas configurações experimentais claramente definidas. A Configuração A corresponde ao corte com gás industrial, utilizando azoto como gás auxiliar, selecionado em função da espessura da chapa e do nível de qualidade de corte exigido. Esta configuração é amplamente adotada na indústria devido às propriedades físico-químicas do azoto, que influenciam diretamente a velocidade de corte, a estabilidade do feixe laser e a qualidade dimensional das peças obtidas. Por outro lado, a Configuração B considerou o corte com ar comprimido produzido localmente através de um compressor industrial equipado com sistemas de filtragem. Esta alternativa foi incluída por representar uma opção economicamente mais vantajosa e potencialmente mais sustentável, mas cuja eficiência comparativa face ao uso de gases industriais requereu análise detalhada.

A seleção das amostras de chapas metálicas foi realizada com critérios rigorosos de uniformidade. A composição química foi certificada e homogénea, garantindo que propriedades metalúrgicas como dureza, condutividade térmica ou resistência mecânica não introduzissem variações não relacionadas com a variável estudada. A espessura das chapas foi

mantida constante. Por fim, a origem das chapas foi controlada, adquirindo-se todo o material ao mesmo fornecedor e lote, eliminando potenciais diferenças decorrentes de variações de fabrico ou tratamentos pré-existentes.

Para assegurar a qualidade e fiabilidade dos dados, implementou-se um protocolo rigoroso de monitorização. A velocidade de corte foi medida continuamente com sensores integrados na máquina, permitindo verificar a estabilidade operacional e correlacionar esta variável com a qualidade dos cortes. As condições ambientais, nomeadamente temperatura e humidade relativa, foram monitorizadas continuamente, dado que estas influenciam a propagação da chama, a formação de óxidos e a qualidade geral do corte. Antes do início da campanha, a máquina de corte foi submetida a revisão detalhada, limpeza, lubrificação e calibração, com realização de testes preliminares para garantir que todos os sistemas operavam dentro das especificações do fabricante.

Para além dos parâmetros operacionais, a campanha incluiu análise detalhada dos cortes realizados, combinando técnicas quantitativas e qualitativas. Entre estas, destaca-se a avaliação da presença de rebarbas, realizada por inspeção visual, permitindo analisar a dimensão e frequência das irregularidades na borda do corte. Este tipo de análise é fundamental, pois irregularidades podem afetar diretamente a necessidade de retrabalho, o consumo energético adicional em operações posteriores e a qualidade final do produto.

Todos os dados recolhidos foram organizados num sistema digital centralizado, que permitiu o armazenamento sincronizado de variáveis operacionais e resultados de análises qualitativas. O software utilizado assegurou a integridade e consistência temporal dos registos, permitindo cruzamento de informações e análise estatística confiável. Esta organização garantiu que todos os dados pudessem ser facilmente integrados na modelação da ACV, assegurando transparência e rastreabilidade.

O planeamento experimental detalhado e rigoroso desenvolvido permitiu criar um quadro metodológico sólido, capaz de suportar conclusões confiáveis e fundamentadas sobre a influência do tipo de gás no processo de corte industrial. Esta abordagem fornece não apenas evidência sobre a eficiência e qualidade do corte, mas também subsídios práticos para a otimização do processo produtivo, redução de custos operacionais e minimização de impactos ambientais, contribuindo para uma análise completa e robusta do desempenho comparativo das duas tecnologias estudadas.

3.2.2. Parâmetros monitorizados

A monitorização dos parâmetros-chave constituiu um elemento central para a avaliação comparativa entre as diferentes configurações experimentais, permitindo compreender não apenas o comportamento operacional da máquina, mas também os efeitos indiretos sobre a eficiência energética, a qualidade do produto final e os impactos ambientais associados. A seleção criteriosa dos indicadores baseou-se na identificação das variáveis que mais influenciam o desempenho global do processo, assegurando uma análise holística e tecnicamente fundamentada. Esta abordagem permitiu correlacionar aspetos quantitativos e qualitativos,

facilitando a interpretação dos resultados e a identificação de oportunidades de otimização do processo industrial.

O consumo energético da máquina de corte, expresso em kWh por metro quadrado de chapa processada, foi monitorizado em tempo real através de um sistema integrado de gestão de energia, composto por sensores de corrente e tensão instalados diretamente no quadro elétrico da Motofil MFL315. Estes dispositivos permitiram a recolha contínua e de elevada precisão do perfil de consumo ao longo de cada ciclo de corte, proporcionando informação detalhada sobre os picos e variações de energia durante operações específicas. Para assegurar a fiabilidade dos dados, aplicaram-se procedimentos de filtragem e tratamento que eliminaram valores anómalos, como picos de corrente decorrentes de arranques ou paragens súbitas da máquina, os quais não refletem o consumo médio real durante a operação contínua. A normalização do consumo energético em função da área de chapa processada foi essencial para permitir comparações objetivas entre diferentes configurações e lotes de produção, independentemente do tamanho, forma ou número de peças produzidas, assegurando assim uma base de avaliação consistente para a ACV.

O consumo de gás auxiliar e de ar comprimido foi igualmente monitorizado de forma rigorosa. Para os gases industriais, a medição incluiu parâmetros volumétricos, pressão e caudal, utilizando manómetros digitais e caudalímetros calibrados instalados na linha de alimentação. No caso do ar comprimido, dado que o consumo energético do compressor é uma componente significativa do impacto ambiental, procedeu-se a uma monitorização específica da energia elétrica utilizada pelo sistema de compressão. Esta abordagem permitiu isolar a contribuição energética do compressor e realizar uma avaliação completa do consumo total associado a cada configuração. Todos os valores de volume de gás foram normalizados para Nm³, considerando as condições de pressão e temperatura, o que assegura a comparabilidade entre ensaios realizados em diferentes condições ambientais ou com variações de pressão de operação, mantendo a consistência metodológica do estudo.

O tempo de corte por peça, expresso em segundos ou por componente, foi obtido através do software de controlo da máquina, que regista automaticamente o tempo de operação de cada ciclo de corte. Para validar estes dados, foram realizadas medições paralelas com cronómetros industriais durante a campanha experimental, assegurando que o registo automático refletisse fielmente a duração real do processo. Esta variável é fundamental para a avaliação da produtividade, uma vez que pequenas diferenças no tempo de corte entre configurações podem traduzir-se em impactos significativos nos custos operacionais, na capacidade de resposta da linha de produção e na eficiência global do processo. Além disso, o tempo de corte influencia diretamente a utilização energética da máquina, permitindo correlacionar consumos elétricos com a produtividade obtida.

A qualidade do acabamento do corte foi avaliada através de um protocolo padronizado adotado pela empresa. A inspeção visual foi complementada com medições dimensionais utilizando equipamentos de precisão, presença e extensão de rebarbas, níveis de oxidação superficial e regularidade do traço de corte. Para além destes aspetos, foi registada a necessidade de operações de retrabalho, como desbaste ou lixagem, cujo impacto é relevante tanto do ponto de vista económico, pelo aumento do tempo e custo de mão-de-obra, como ambiental pelo

consumo adicional de energia e geração de resíduos. Esta avaliação permitiu correlacionar de forma direta a escolha do gás auxiliar com a qualidade final do produto, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisão industrial e a otimização do processo.

A quantidade de desperdício metálico gerado foi outro parâmetro monitorizado com rigor. A recolha das aparas e sobras de chapa após cada operação foi realizada com uma balança industrial calibrada, assegurando a precisão dos dados. A análise deste desperdício permite inferir a eficiência do aninhamento das peças e identificar potenciais efeitos adversos relacionados com a qualidade do feixe de corte, como interferências provocadas por partículas presentes no gás auxiliar ou variações na estabilidade do corte. Esta variável tem impactos diretos tanto nos custos de matéria-prima, ao indicar perdas de material que poderiam ser reduzidas, como na sustentabilidade ambiental da produção, ao permitir calcular a quantidade de recurso desperdiçado e as implicações associadas à sua reciclagem ou eliminação.

A conjugação destes parâmetros operacionais e indicadores qualitativos possibilitou construir um quadro abrangente e integrado do desempenho comparativo das duas configurações de corte por laser. A monitorização detalhada permitiu não só quantificar consumos e perdas, mas também compreender como cada variável interage com as demais, contribuindo para uma avaliação robusta do impacto ambiental, económico e operacional do processo industrial, fundamentando decisões estratégicas para melhoria contínua e otimização do uso de recursos.

3.2.3. Considerações sobre variabilidade e incerteza

A variabilidade inerente ao processo experimental foi cuidadosamente analisada, tendo em conta múltiplos fatores que podem afetar os resultados e, conseqüentemente, a interpretação global da Avaliação do Ciclo de Vida aplicada ao processo de corte por laser. Reconhecer e quantificar estas fontes de variabilidade é essencial porque, em contextos industriais, é praticamente impossível reproduzir condições idênticas em todas as operações. Pequenas diferenças na operação da máquina, no estado dos componentes ou nas condições ambientais podem ter impactos significativos sobre parâmetros-chave, como consumo energético, qualidade do corte e geração de desperdício metálico. Sem uma análise da variabilidade, os resultados poderiam refletir situações pontuais ou excepcionais, comprometendo a confiabilidade e a aplicabilidade das conclusões em cenários industriais reais.

Entre os fatores ambientais, as flutuações na pressão atmosférica e na temperatura ambiente representam fontes naturais de incerteza. Estas variáveis influenciam diretamente a densidade e a compressibilidade do ar, especialmente relevante na Configuração B, em que se utiliza ar comprimido produzido localmente. Alterações na densidade do ar provocam variações no volume efetivo fornecido à máquina e na pressão atingida pelo compressor, impactando tanto a eficiência do corte quanto o consumo energético total. Por exemplo, um ar ligeiramente menos denso exige maior trabalho do compressor para atingir a pressão nominal, aumentando o consumo de energia e, potencialmente, alterando a velocidade de corte. Se estas variáveis não fossem monitorizadas, poder-se-ia interpretar de forma incorreta diferenças de desempenho entre configurações, atribuindo-as unicamente ao tipo de gás, quando na realidade parte do efeito deriva de condições ambientais externas. A monitorização contínua

destas condições permitiu correlacionar variações observadas no processo com alterações ambientais, reduzindo a incerteza associada a estes fatores.

Outro elemento crítico de variabilidade reside nas diferenças operacionais entre operadores e turnos de trabalho. Mesmo quando os operadores recebem formação uniforme e seguem protocolos padronizados, existem pequenas divergências inevitáveis na execução das tarefas. Experiência individual, atenção aos detalhes, interpretação de instruções e velocidade de intervenção podem introduzir variações nos ajustes do equipamento, na posição da chapa ou no manuseamento do gás auxiliar. Estas diferenças influenciam diretamente parâmetros como tempo de corte, qualidade do acabamento e quantidade de resíduos metálicos. Reconhecer esta fonte de incerteza é importante porque, em cenários industriais reais, diferentes operadores podem reproduzir resultados ligeiramente distintos mesmo utilizando a mesma máquina e material. Para mitigar este efeito, foram aplicadas repetições de ensaios, supervisão técnica constante e protocolos de monitorização rigorosos, permitindo estimar a variação natural e reduzir o impacto de fatores humanos sobre os resultados da ACV.

O estado de manutenção dos componentes críticos da máquina, nomeadamente bicos de corte e lentes óticas, constitui outra fonte relevante de incerteza. O desgaste progressivo destes elementos provoca alterações no feixe laser, como perda de intensidade, dispersão ou focagem incorreta, afetando simultaneamente a velocidade de corte e a qualidade do acabamento. Esta variabilidade é particularmente importante porque altera simultaneamente múltiplos indicadores do processo: pode aumentar o consumo energético se a máquina demorar mais tempo a cortar, gerar mais resíduos metálicos devido a cortes imprecisos e necessitar de retrabalho adicional para corrigir defeitos. A realização de manutenção preventiva e inspeções periódicas durante a campanha experimental garantiu que estas fontes de incerteza fossem minimizadas, permitindo que as diferenças observadas entre configurações fossem atribuídas principalmente ao tipo de gás utilizado, e não ao desgaste do equipamento.

Para compreender a influência combinada destas fontes de variabilidade, foi realizada uma análise de sensibilidade quantitativa. Esta consistiu em ajustar parâmetros ambientais, operacionais e técnicos dentro dos intervalos observados durante a campanha e verificar o efeito nos indicadores-chave de desempenho, tais como consumo energético, produção de resíduos, tempo de corte e qualidade do acabamento. A análise demonstrou que, embora pequenas flutuações pudessem alterar valores individuais, os padrões globais permanecem consistentes, indicando que as conclusões principais do estudo são robustas. Este procedimento é essencial em ACV porque permite quantificar a incerteza inerente aos dados experimentais e fornecer intervalos de confiança para as recomendações, evitando generalizações precipitadas a partir de dados pontuais.

Além disso, a abordagem adotada permite diferenciar entre variabilidade natural e erro sistemático. Enquanto a variabilidade natural, causada por fatores como temperatura, pressão ou experiência do operador, é intrínseca ao processo e deve ser incorporada nas análises, o erro sistemático foi minimizado através de calibração de sensores, procedimentos de registo padronizados e verificação cruzada de dados. Esta distinção é crucial para garantir que a ACV reflita a realidade operacional e não seja enviesada por artefactos metodológicos.

Em síntese, a gestão cuidadosa da variabilidade e das incertezas reforça significativamente a credibilidade e aplicabilidade prática do estudo. Ao identificar as fontes de incerteza, monitorizá-las e incorporá-las na análise, os decisores industriais podem aplicar as recomendações derivadas do estudo com maior confiança, otimizando recursos, melhorando a eficiência do corte e minimizando impactos ambientais, mesmo quando confrontados com variações inevitáveis na operação diária. Esta abordagem não apenas fortalece a robustez da ACV, como também fornece um modelo metodológico replicável para estudos similares em outros processos industriais complexos.

3.3. Modelação do ciclo de vida e avaliação dos impactos ambientais

A definição clara do âmbito e das fronteiras do sistema é um passo fundamental na modelação do ciclo de vida, pois delimita os processos, fluxos e impactos considerados na avaliação ambiental, garantindo coerência e transparência ao estudo.

Neste trabalho, o sistema em análise abrange o processo de corte a laser de chapas metálicas, contemplando todas as etapas diretamente relacionadas com a operação de corte, desde a preparação do material até à obtenção da peça finalizada. São incluídos os consumos energéticos da máquina de corte e dos equipamentos auxiliares, nomeadamente o compressor de ar para a Configuração B e o fornecimento de gás industrial para a Configuração A. Adicionalmente, são considerados os resíduos metálicos gerados no processo, nomeadamente aparas e sobras resultantes do aninhamento e corte.

Foram excluídas da análise as etapas relacionadas com a produção das matérias-primas metálicas, o fabrico e manutenção dos equipamentos e o transporte dos materiais e produtos, por se encontrarem fora do âmbito imediato do processo de corte a laser, permitindo focar a análise nos impactos operacionais específicos das duas configurações experimentais.

Esta delimitação baseia-se na necessidade de avaliar de forma comparativa e prática as duas tecnologias de corte, num contexto industrial real, garantindo que as conclusões obtidas sejam diretamente aplicáveis às operações de fabrico e que possam suportar decisões estratégicas no âmbito da sustentabilidade e da eficiência produtiva.

3.3.1. Definição do âmbito

A definição precisa do âmbito e das fronteiras do sistema é essencial para assegurar a coerência, fiabilidade e relevância da análise do ciclo de vida. Ao delimitar claramente quais processos, fluxos e impactos são considerados, é possível focar a avaliação nos elementos que efetivamente diferenciam os cenários estudados, evitando ruído e enviesamento nos resultados.

No presente estudo, o sistema em avaliação concentra-se no processo de corte a laser de chapas metálicas, abrangendo todas as etapas diretamente relacionadas com a operação de corte, desde a preparação do material até à obtenção da peça acabada. Este foco permite

quantificar de forma rigorosa o consumo de recursos, a produção de resíduos e a eficiência operacional, elementos críticos para decisões de sustentabilidade e otimização industrial.

Foram consideradas duas configurações distintas:

- Configuração A— O gás industrial, azoto, é utilizado devido às suas propriedades físico-químicas, que proporcionam cortes mais limpos e rápidos, especialmente em materiais sensíveis à oxidação. A monitorização do consumo de gás é crucial, pois influencia diretamente a eficiência energética, os custos operacionais e a pegada ambiental associada ao processo. A inclusão desta variável na ACV permite avaliar o impacto de uma tecnologia amplamente utilizada na indústria, fornecendo parâmetros comparativos relevantes.
- Configuração B — O ar comprimido, produzido localmente, representa uma alternativa mais económica e potencialmente mais sustentável, reduzindo a dependência de fornecedores externos e as emissões associadas ao transporte de gases industriais. A monitorização do consumo energético do compressor e do ar fornecido permite quantificar de forma precisa a eficiência deste sistema e compará-lo com o gás industrial, destacando possíveis trade-offs entre custo, sustentabilidade e desempenho do corte.

Foram excluídas da análise as fases relativas à produção das matérias-primas metálicas, à fabricação e manutenção dos equipamentos, bem como ao transporte dos materiais e produtos, por não integrarem o âmbito específico do processo operacional de corte a laser.

Assim, as fronteiras do sistema definem-se num modelo “gate-to-gate”, focando-se nos seguintes elementos. Esta delimitação visa garantir que a análise seja representativa das condições industriais reais e permita uma avaliação comparativa rigorosa entre as duas tecnologias de corte, suportando decisões estratégicas no âmbito da sustentabilidade e eficiência.

Os dados operacionais recolhidos durante a campanha experimental, descrita na Secção 3.3.2, foram utilizados para fundamentar os valores assumidos nesta modelação, assegurando que os resultados refletem com rigor as condições de operação observadas.

3.3.2. Inventário do ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida constitui a etapa central da avaliação ambiental, sendo nesta fase que todos os fluxos de entrada e saída do sistema são quantificados de forma detalhada. A sua importância reside no facto de permitir transformar os dados operacionais recolhidos durante a campanha experimental em um conjunto estruturado e sistemático de informações, que servem de base para a modelação e quantificação dos impactos ambientais. Sem um inventário rigoroso e completo, qualquer avaliação subsequente, incluindo a análise comparativa de diferentes tecnologias de corte, estaria sujeita a incertezas significativas e potencialmente enviesada, comprometendo a validade das conclusões.

Para a presente análise, os dados utilizados no inventário foram obtidos a partir de três fontes complementares, permitindo construir um quadro robusto e representativo da realidade

industrial. As medições experimentais realizadas in loco constituem a fonte primária e mais fiável de dados, fornecendo informações precisas sobre os consumos energéticos da máquina de corte e do compressor de ar, os volumes e pressões dos gases auxiliares, bem como a quantidade de resíduos metálicos produzidos durante a operação. A recolha direta em ambiente industrial permite capturar não apenas valores médios, mas também a variabilidade inerente ao processo, refletindo as condições reais de operação, como variações na eficiência do equipamento, desempenho dos operadores e flutuações ambientais. Esta abordagem garante que o inventário representa de forma realista a operação diária, em vez de depender apenas de estimativas teóricas ou dados genéricos.

Para complementar as medições experimentais, foram utilizadas bases de dados especializadas, reconhecidas internacionalmente, que fornecem informações sobre perfis de emissão de gases industriais, consumo energético médio de equipamentos e outros parâmetros gerais que não podem ser medidos diretamente na fábrica. Esta integração permite padronizar certos fluxos e assegurar que os dados utilizados são consistentes com práticas internacionais de ACV, facilitando a comparação com outros estudos e garantindo a transparência metodológica. A revisão de literatura técnica serviu ainda para validar e contextualizar os dados obtidos experimentalmente e nas bases de dados, fornecendo benchmarks sobre eficiência de compressão, consumo de gás em cortes industriais e impactos típicos associados a diferentes tecnologias, o que permite identificar possíveis desvios ou inconsistências e garantir que as suposições adotadas são fundamentadas.

Na análise comparativa das configurações de corte, torna-se útil classificar os fluxos em comuns e diferenciadores, seguindo as recomendações da ISO 14040 e ISO 14044. Os fluxos comuns referem-se àqueles presentes em todas as configurações de corte, independentemente do tipo de gás utilizado, e incluem a chapa metálica como matéria-prima, a energia elétrica consumida pela máquina durante o corte, os resíduos metálicos resultantes do aninhamento e corte, assim como o componente final cortado. A contabilização consistente destes fluxos estabelece uma base comparativa uniforme, permitindo que quaisquer diferenças observadas nos resultados sejam atribuídas exclusivamente aos fluxos diferenciadores e não a variáveis externas.

Fluxo	Unidade	Descrição
Chapa metálica	m ²	Unidade funcional do estudo, 1 m ² de chapa de aço-carbono
Energia elétrica	kWh/m ²	Energia consumida pelos equipamentos
Componente cortado	m ²	Produto final do processo
Resíduos metálicos	kg/m ²	Aparos, sobras ou restos de corte

Tabela 3 - Fluxos Comuns do ACV

Os fluxos comuns apresentados na tabela representam elementos essenciais do estudo comparativo e constituem a base uniforme sobre a qual se apoia toda a análise ambiental. A contabilização destes fluxos de forma idêntica em todas as configurações é fundamental para garantir que qualquer diferença observada nos impactos ambientais seja atribuível exclusivamente aos fluxos diferenciadores, ou seja, aos elementos específicos de cada tecnologia de corte, como o consumo de gás industrial na Configuração A ou o consumo energético do compressor de ar na Configuração B. Este procedimento assegura uma análise clara, objetiva e metodologicamente consistente, em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044, que recomendam a identificação de fluxos comuns e diferenciadores para aumentar a precisão e a fiabilidade dos resultados de uma ACV.

A chapa metálica, considerada como unidade funcional do estudo, é contabilizada por metro quadrado e representa o material base utilizado no processo de corte. Este fluxo é crucial, pois define a escala da avaliação e permite normalizar todos os outros fluxos de entrada e saída. Ao manter a mesma unidade funcional para todas as configurações, assegura-se que os resultados são comparáveis e que as diferenças nos impactos ambientais refletem apenas as variáveis operacionais em estudo, sem interferência de variações de material ou quantidade processada.

A energia elétrica consumida pela máquina de corte constitui outro fluxo comum fundamental. Medida em quilowatt-hora por metro quadrado de chapa processada, esta variável inclui não apenas o feixe laser, mas também todos os sistemas auxiliares, como motores de movimentação, CNC, sistemas de extração de fumos e controlo ótico. A monitorização rigorosa deste fluxo permite avaliar o consumo energético real do processo e fornece uma referência uniforme entre as duas configurações, garantindo que as diferenças observadas nos impactos ambientais não resultem de flutuações na energia consumida pelo equipamento principal.

O componente cortado, também expresso por metro quadrado, representa o produto final do processo de corte. A sua contabilização permite quantificar de forma objetiva a eficiência do processo e correlacionar o consumo de recursos e a produção de resíduos com o resultado final obtido. Este fluxo é determinante para avaliar a produtividade do processo e a eficácia do processo de nesting, fatores que impactam tanto a dimensão económica como ambiental da operação.

Por fim, os resíduos metálicos, medidos em quilogramas por metro quadrado, incluem aparas, sobras e restos de corte que não são incorporados no produto final. A contabilização rigorosa destes resíduos é essencial para avaliar a eficiência de aproveitamento do material, um indicador crítico para a sustentabilidade do processo. Além disso, a gestão destes resíduos influencia diretamente os impactos ambientais, pois o seu encaminhamento para reciclagem, armazenamento ou descarte pode ter efeitos significativos na pegada de carbono e no consumo de energia associado ao ciclo produtivo.

Em conjunto, estes fluxos comuns constituem a estrutura de referência do estudo comparativo, assegurando que todos os cenários partem de uma base homogénea. Esta uniformidade permite isolar de forma clara os efeitos dos fluxos diferenciadores e, conseqüentemente, realizar uma avaliação ambiental objetiva e fiável. Sem esta padronização, seria impossível

determinar com precisão se as diferenças observadas nos impactos derivam efetivamente do tipo de gás auxiliar utilizado ou de outras variáveis externas não controladas.

A tabela a seguir apresenta os fluxos diferenciadores, ou seja, aqueles fluxos que são específicos de cada configuração de corte e que geram variações significativas nos impactos ambientais entre os cenários analisados. Ao contrário dos fluxos comuns, que se mantêm constantes em todas as situações, os fluxos diferenciadores representam precisamente os elementos que distinguem o corte com azoto do corte com ar comprimido, permitindo quantificar de forma objetiva os efeitos de cada tecnologia no desempenho ambiental do processo.

Configuração	Fluxo	Unidade	Descrição
Corte com N ₂	Gás azoto	Nm ³ /m ²	Inclui produção, compressão, transporte e armazenamento
Corte com N ₂	Emissões atmosféricas	kg/m ²	Fumos, partículas metálicas e óxidos (ex.: Fe ₂ O ₃) formados pela reação química
Corte com ar comprimido	Ar comprimido	Nm ³ /m ²	Produção local, contabilizando eficiência do compressor
Corte com ar comprimido	Energia elétrica – compressor	kWh/m ²	Energia consumida pelo compressor industrial

Tabela 4 - Fluxos Diferenciados do ACV

Os fluxos diferenciadores apresentados na tabela evidenciam claramente as principais diferenças entre os processos de corte analisados, permitindo compreender como cada configuração impacta de forma distinta os indicadores ambientais do ciclo de vida. No caso do corte com azoto, os fluxos críticos incluem o consumo do próprio gás, expresso em metros cúbicos por metro quadrado de chapa cortada, e as emissões atmosféricas resultantes da operação. O consumo de gás abrange não apenas o volume utilizado durante o corte, mas também incorpora as etapas de produção, compressão, transporte e armazenamento, fatores que contribuem significativamente para a pegada ambiental total do processo. As emissões atmosféricas incluem fumos, partículas metálicas e óxidos, como o Fe₂O₃, formados pela reação química entre o feixe laser e a superfície metálica. Estes subprodutos químicos representam impactos ambientais específicos e potencialmente mais complexos do que os produzidos pelo corte com ar comprimido, justificando a sua monitorização detalhada e a sua inclusão como fluxo diferenciador.

No corte com ar comprimido, os fluxos diferenciadores mais relevantes são o próprio ar comprimido, contabilizado em metros cúbicos por metro quadrado de chapa cortada, e a energia elétrica consumida pelo compressor industrial responsável pela sua produção e pressurização. O ar é gerado localmente, e a análise inclui a eficiência do compressor, bem

como as perdas energéticas inerentes ao processo de compressão, filtragem e pressurização. As emissões geradas neste cenário são essencialmente partículas físicas levantadas pelo jato de ar, sem ocorrência de reações químicas complexas, o que diferencia claramente o seu perfil ambiental do corte com azoto. A monitorização destes fluxos permite avaliar de forma precisa a eficiência energética e ambiental desta alternativa, destacando possíveis vantagens em termos de redução de emissões químicas, apesar do maior consumo de energia associado à compressão do ar.

A identificação clara destes fluxos diferenciadores é fundamental para assegurar que a análise ambiental se concentre nos aspectos mais relevantes de cada configuração, permitindo atribuir com rigor as diferenças nos impactos às variáveis efetivamente em estudo. Para reforçar a comparabilidade entre os dois cenários, todos os consumos e emissões foram normalizados relativamente à unidade funcional adotada, o metro quadrado de chapa cortada. Esta normalização é essencial, pois permite comparar diretamente os processos, independentemente de diferenças no tamanho das peças, número de cortes ou variações na produção durante a campanha experimental. Sem esta etapa, seria impossível determinar de forma objetiva qual configuração apresenta maior eficiência ou menor impacto ambiental por unidade de área processada.

Os dados recolhidos foram cuidadosamente processados e organizados numa base de dados estruturada, permitindo armazenar de forma consistente todas as variáveis operacionais, volumes de gás, consumo energético e quantidades de resíduos ou emissões. Esta base serviu de input para o software de modelação ambiental utilizado, garantindo transparência, rastreabilidade e replicabilidade do estudo, elementos essenciais para qualquer análise de ciclo de vida robusta.

No seguimento desta caracterização geral dos fluxos, torna-se essencial descrever de forma detalhada as duas configurações de processo consideradas no estudo. Ambas partilham a mesma base tecnológica, ou seja, o corte a laser de fibra ótica com a máquina CNC Motofil MFL315, garantindo que o equipamento e a metodologia de operação permanecem constantes. A principal diferença reside no tipo de gás auxiliar utilizado, que constitui a variável-chave do estudo e que será avaliada quanto ao seu impacto ambiental, energético e operacional. Esta abordagem permite isolar o efeito do gás auxiliar, assegurando que quaisquer diferenças nos resultados da ACV podem ser atribuídas com confiança a esta variável específica.

Configuração A – Corte efetuado a azoto

No processo de corte de chapas metálicas assistido por azoto, a definição dos fluxos de inventário segue critérios de relevância ambiental, representatividade operacional e impacto potencial, assegurando que todos os elementos significativos para a caracterização do sistema são considerados de forma rigorosa. A chapa total utilizada no processo constitui a base do inventário e representa a matéria-prima disponível para corte. A sua contabilização é fundamental para estabelecer a unidade funcional, permitindo normalizar todos os fluxos de entrada e saída por unidade de produto, avaliar a eficiência material e comparar diferentes cenários tecnológicos ou operacionais. A medição da massa inicial da chapa fornece também

uma referência objetiva para interpretar o consumo de energia, de gases auxiliares e a geração de resíduos durante o processo, assegurando coerência metodológica.

A energia elétrica representa um fluxo de entrada crítico, dado o elevado consumo característico dos sistemas de corte a laser. A inclusão deste fluxo no inventário é essencial para refletir os impactos ambientais decorrentes da produção e utilização de eletricidade, como as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes associados à rede elétrica. Além disso, o consumo de energia influencia diretamente a eficiência operacional do equipamento e o desempenho de outros fluxos do processo, nomeadamente o consumo de gás auxiliar e a geração de calor local, sendo, portanto, indispensável para a avaliação precisa da pegada ambiental do corte com azoto.

O azoto (N_2) é contabilizado como fluxo de entrada por desempenhar um papel funcional determinante no processo. Atua como gás de proteção, evitando a oxidação excessiva do material, e expulsa os resíduos metálicos fundidos, garantindo a qualidade e precisão do corte. A sua produção, purificação, transporte e utilização incorrem em impactos ambientais próprios, que devem ser refletidos no inventário. A monitorização e quantificação do consumo de azoto permitem avaliar a eficiência operacional do processo, identificar oportunidades de redução de desperdício e otimizar custos associados ao recurso.

O fluxo de gás auxiliar combustível, embora muitas vezes secundário ou residual, é incluído para assegurar completude metodológica. Combustíveis como acetileno ou propano podem estar presentes em determinadas operações, contribuindo para emissões adicionais e impactos ambientais indiretos associados à extração, refinação e transporte de combustíveis fósseis. A contabilização deste fluxo garante que todos os potenciais impactos associados à operação térmica do laser são capturados, mesmo que o seu contributo seja relativamente pequeno.

A peça cortada constitui o produto final utilizável e serve como unidade funcional do estudo, permitindo que todos os fluxos de entrada e saída sejam expressos em função do produto obtido. A sua inclusão é essencial para comparar alternativas tecnológicas, medir a eficiência do processo e interpretar os impactos ambientais por unidade de produto.

As aparas e sobras de corte representam o material removido durante o processo, sendo uma fração de resíduos metálicos que pode ser encaminhada para reciclagem. A contabilização destes resíduos é relevante não só para a avaliação ambiental, mas também para a análise de eficiência material e económica do processo. Variações na quantidade de aparas refletem diferenças na precisão do corte, na programação de nestings e na gestão operacional, influenciando o consumo de matéria-prima e os custos associados à sua valorização ou tratamento.

As emissões atmosféricas geradas durante o corte a laser com azoto são múltiplas e cada uma possui importância específica. O monóxido de carbono (CO) é considerado devido ao seu potencial de poluição local e riscos à saúde ocupacional, sendo indicador de combustão parcial e reações térmicas residuais. Os óxidos de azoto (NO_x) são incluídos por contribuírem para acidificação, eutrofização e formação de ozono troposférico, estando diretamente associados às temperaturas elevadas e à presença de azoto no ambiente de corte. Os compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM), embora geralmente limitados, refletem potenciais emissões

Resultados e Discussão

derivadas de resíduos de lubrificantes ou contaminantes presentes nas chapas, sendo relevantes para a avaliação da qualidade do ar e da exposição humana. As partículas respiráveis (PM10) e finas (PM2.5) constituem fluxos críticos devido à sua capacidade de penetração no sistema respiratório, representando riscos ocupacionais e impactos locais e regionais sobre a qualidade do ar.

Em síntese, todos os fluxos selecionados são fundamentais para caracterizar o corte com azoto de forma completa e representativa. A sua contabilização rigorosa possibilita análises comparativas, identificação de pontos críticos, otimização do processo e suporte a decisões estratégicas orientadas para a eficiência, redução de impactos ambientais e segurança ocupacional. A escolha destes fluxos garante que a ACV reflete com precisão os aspectos técnicos, materiais e químicos distintivos do corte com azoto, permitindo uma avaliação robusta e fiável em contexto industrial.

Secção	Categoria	Fluxo	Unidade	Quantidade
I. Entradas	Produto	Chapa total	kg	19,82
II. Entradas	Energia	Energia elétrica	kWh	2,652
III. Entradas	Gás auxiliar	Azoto (N ₂)	kg	4,776
IV. Entradas	Gás auxiliar	Gás auxiliar – Combustível	kg	0,106
V. Saídas	Produto	Peça cortada	kg	17,28
VI. Saídas	Resíduos	Aparas/sobras de corte	kg	2,54
VII. Saídas	Emissões	CO	kg	0,015
VIII. Saídas	Emissões	NO _x	kg	0,001
IX. Saídas	Emissões	COVNM	kg	0,001
X. Saídas	Partículas	PM10 (<10 µm)	kg	0,00310
XI. Saídas	Partículas	PM2.5 (<2.5 µm)	kg	0,0015

Tabela 5 - Inventário Corte de chapa através do N₂

I. Peso da chapa total de aço carbono utilizada para o corte

II. Calculada considerando a potência nominal da máquina (4 kW) e o tempo total de operação (≈0,66 h). O valor corresponde ao consumo elétrico durante o corte de uma chapa (40,8 m de comprimento total).

III. Determinada a partir do caudal de gás auxiliar de 7,2 Nm³/h e o tempo de corte (≈0,66 h). O consumo total foi convertido em massa de N₂ utilizando a densidade do gás em condições normais.

Resultados e Discussão

IV.	Estimado a partir do consumo indireto de gás combustível necessário para suportar o sistema, assumindo um poder calorífico inferior de 12,9 kWh/kg para o propano e eficiência de conversão de 80%.
V.	Corresponde ao peso líquido da chapa processada (19,82 kg iniciais), subtraindo as perdas associadas ao corte (aparas e sucata).
VI.	Obtido a partir da porcentagem de material removido durante o processo de corte ($\approx 12,8\%$ da massa da chapa inicial). Inclui tanto sucata metálica como finos resultantes da vaporização e ejeção do kerf.
VII.	Estimado através de fator de emissão associado ao processo de corte a laser. Para a potência considerada (2 kW) e comprimento de corte (40,8 m), obteve-se o valor indicado.
VIII.	Determinados a partir de fator de emissão específico para o processo, proporcional ao comprimento cortado e à potência do laser utilizada.
IX.	Estimados considerando fator de emissão por unidade de energia do laser aplicada durante o corte.
X.	Estimadas com base em fatores de emissão por potência e comprimento cortado, correspondendo às partículas inaláveis geradas durante a ejeção do material fundido.
XI.	Derivadas de fatores de emissão para o processo de corte a laser, representando a fração mais fina das partículas metálicas liberadas durante a operação.

Configuração B – Corte efetuado a ar comprimido

No caso do processo de corte de chapa metálica assistido por ar comprimido, a definição e quantificação dos fluxos de inventário assumem uma importância central na análise de ciclo de vida. A seleção criteriosa das entradas e saídas fundamenta-se não apenas na disponibilidade de dados, mas sobretudo na sua relevância para a caracterização ambiental do sistema e para a representatividade do processo em contexto industrial real.

O levantamento dos dados de inventário foi realizado a partir de uma abordagem multidimensional, que incluiu medições diretas, consulta de registros operacionais da máquina de corte Motofil MFL315, relatórios de manutenção e bases de dados internas da unidade fabril. Este cruzamento de fontes permitiu mitigar limitações associadas a cada uma delas de forma isolada, assegurando que os valores reportados refletem de forma robusta as condições típicas de operação, incluindo variações entre turnos e oscilações de desempenho dos equipamentos.

A energia elétrica consumida constitui um fluxo de entrada particularmente relevante, dado que a produção e utilização de eletricidade representam um dos principais vetores de impacto ambiental em processos industriais, sobretudo em sistemas intensivos em energia como o corte a laser. Por um lado, permite associar de forma direta e transparente o consumo energético ao desempenho técnico do equipamento, eliminando interferências provenientes de outros consumos da unidade fabril. A inclusão deste fluxo no inventário é justificada pela sua relevância direta para a caracterização ambiental do processo, uma vez que a energia elétrica é a principal fonte de impacto no ciclo de vida em processos de corte a laser. Ao relacionar o consumo energético com a unidade funcional é possível comparar de forma objetiva a eficiência energética entre diferentes tecnologias de corte e identificar oportunidades de melhoria.

O consumo de ar comprimido, representa outro fluxo fundamental, não apenas pelo seu papel funcional como gás de corte, mas sobretudo pelo impacto energético associado à sua produção.

A geração de ar comprimido em ambiente fabril é reconhecidamente intensiva em termos energéticos, e a eficiência do compressor, bem como a pressão de operação, são fatores críticos que podem modificar significativamente o consumo real. Para além disso, perdas e fugas de ar na rede interna constituem fontes adicionais de incerteza, que se traduzem tanto em impactos ambientais indiretos como em potenciais limitações de desempenho do processo. Assim, a quantificação do ar comprimido é essencial para uma avaliação completa e rigorosa da performance ambiental desta tecnologia.

Relativamente às saídas do processo, a peça final cortada, com uma massa de 17,28 kg, foi considerada como unidade funcional da análise. Esta normalização é indispensável para a comparabilidade entre tecnologias de corte distintas, permitindo que os resultados da ACV sejam interpretados em termos de impacto por unidade de produto fabricado. A inclusão das aparas e sobras de corte, totalizando 2,54 kg, reveste-se igualmente de importância, uma vez que este fluxo material representa simultaneamente uma perda de eficiência no aproveitamento da matéria-prima e uma oportunidade de valorização através da reciclagem. Do ponto de vista ambiental, a contabilização das aparas permite avaliar não apenas a eficiência material do processo, mas também os impactos e benefícios associados ao seu encaminhamento para reciclagem.

As emissões atmosféricas como o CO, NO_x, COVNM, PM10 e PM2,5 constituem fluxos críticos para a caracterização ambiental do sistema, pois estão diretamente associadas a efeitos adversos na qualidade do ar, na saúde humana e nos ecossistemas. A sua inclusão no inventário justifica-se pelo facto de o corte assistido por ar comprimido gerar fumos e partículas em concentrações superiores às do corte com azoto, dado que não existe um efeito inerte sobre o material aquecido, mas sim uma contribuição do ar para fenómenos de oxidação parcial e projeção de partículas metálicas. É importante sublinhar que, ao contrário do corte com azoto, não se formam óxidos metálicos específicos como subprodutos, pelo que as partículas emitidas correspondem essencialmente a fragmentos de natureza física (PM10 e PM2,5) e a gases resultantes de combustões e reações térmicas locais (CO, NO_x e COVNM). A sua monitorização é, portanto, indispensável para a avaliação de impactos na saúde ocupacional, bem como para o cumprimento de requisitos regulatórios ambientais.

A escolha destes fluxos de entrada e saída decorre de uma fundamentação científica e metodológica sólida: todos eles estão diretamente relacionados com a eficiência energética, a eficiência material e as emissões atmosféricas do processo, os três eixos principais de impacto ambiental na análise de corte a laser em ambiente industrial. A sua quantificação rigorosa é essencial não apenas para caracterizar o sistema em estudo, mas também para permitir a comparabilidade com alternativas tecnológicas, apoiar a tomada de decisão sobre melhorias de processo e fundamentar recomendações estratégicas no âmbito da sustentabilidade industrial.

Em síntese, a inclusão destes fluxos no inventário do corte com ar comprimido traduz uma escolha metodológica orientada pela relevância ambiental e pela representatividade operacional, assegurando que a análise de ciclo de vida obtenha resultados robustos e aplicáveis em cenários industriais reais. Esta abordagem fornece uma base sólida para a discussão comparativa com o corte assistido por azoto, permitindo identificar vantagens,

Resultados e Discussão

limitações e oportunidades de otimização, num quadro coerente de eficiência energética, redução de emissões e sustentabilidade do processo produtivo.

Secção	Categoria	Fluxo	Unidade	Quantidade
I. Entradas	Produto Inicial	Chapa total	kg	19,82
II. Entradas	Energia	Energia elétrica – máquina de corte	kWh	2,21
III. Entradas	Energia	Energia elétrica – Compressor	kWh	0,995
IV. Entradas	Gás auxiliar	Ar comprimido	m ³	3,317
V. Entradas	Produto Final	Chapa final (produto usável)	kg	17,28
VI. Saídas	Resíduos metálicos	Aparas/sobras de corte	kg	2,54
VII. Saídas	Emissões atmosféricas	CO	kg	0,02
VIII. Saídas	Emissões atmosféricas	NO _x	kg	0,04
IX. Saídas	Emissões atmosféricas	COVNM	kg	0,001
X. Saídas	Partículas	PM10 (<10 µm)	kg	0,031
XI. Saídas	Partículas	PM2.5 (<2.5 µm)	kg	0,015

Tabela 6 - Inventário Corte de chapa através de ar comprimido

I.	A chapa total considerada para o processo de corte apresenta uma massa de 19,82 kg, correspondendo ao material inicial antes da operação.
II.	A energia elétrica consumida pela máquina de corte Motofil MFL315 foi de aproximadamente 2,21 kWh, calculada a partir da potência ativa do laser e do tempo de operação durante o corte da chapa.
III.	A energia elétrica do compressor foi estimada em 0,995 kWh, considerando um consumo específico de 0,3 kWh/m ³ e o volume total de 3,317 m ³ de ar comprimido utilizado no corte
IV.	O consumo de ar comprimido correspondeu a 3,317 m ³ , determinado a partir do caudal de ar e da duração do processo de corte.
V.	A chapa final resultante, considerada como produto utilizável após o corte, apresentou uma massa de 17,28 kg, equivalente à parte aproveitável da chapa processada.
VI.	As aparas e sobras de corte totalizaram 2,54 kg, correspondendo ao material removido pelo feixe laser durante a separação das peças, incluindo perdas associadas ao kerf.
VII.	As emissões de monóxido de carbono (CO) geradas no processo foram estimadas em 0,02 kg, resultantes da combustão parcial e reações térmicas durante o corte.
VIII.	As emissões de óxidos de azoto (NO _x) atingiram cerca de 0,04 kg, devidas às elevadas temperaturas no feixe laser em contacto com o ar comprimido.

IX.	Os compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM) associados ao processo foram estimados em 0,001 kg, com base em fatores de emissão característicos do corte a laser.
X.	As partículas respiráveis PM10 geradas corresponderam a 0,031 kg, representando a fração de partículas inaláveis resultantes da ejeção do material fundido.
XI.	As partículas finas PM2,5 corresponderam a 0,015 kg, constituindo a fração mais fina das partículas emitidas durante a operação de corte.

3.3.3. Avaliação de Impactos Ambientais do Ciclo de Vida

Para a avaliação dos impactos ambientais foi adotado o método ReCiPe Midpoint (H), uma abordagem amplamente reconhecida e utilizada em estudos de Análise de Ciclo de Vida. Este método permite quantificar os efeitos ambientais de cada fluxo de entrada e saída do sistema, convertendo dados como consumo de energia elétrica, utilização de gases auxiliares e geração de resíduos metálicos em indicadores específicos de categorias de impacto, como aquecimento global, eutrofização, acidificação, ecotoxicidade e toxicidade humana. A escolha do ReCiPe Midpoint (H) se justifica por oferecer uma análise detalhada, com um bom equilíbrio entre profundidade dos resultados e facilidade de aplicação na prática, sendo especialmente útil em estudos comparativos como o presente, em que o objetivo é avaliar as diferenças ambientais entre o corte com azoto e o corte com ar comprimido.

A modelação e os cálculos foram realizados utilizando o software openLCA, uma ferramenta de código aberto concebida especificamente para a realização de Avaliações do Ciclo de Vida. A escolha do openLCA deve-se a várias razões: permite a integração de bases de dados reconhecidas internacionalmente, como a ecoinvent, facilita a aplicação de métodos de avaliação de impacto amplamente aceites e oferece flexibilidade para modelar sistemas complexos com múltiplas entradas e saídas. Além disso, o openLCA assegura rastreabilidade completa dos dados e fórmulas utilizadas, garantindo transparência e reprodutibilidade, aspetos essenciais para uma análise científica rigorosa.

O uso do ReCiPe Midpoint (H) e do openLCA permite identificar de forma clara quais fluxos de energia, material ou emissões têm maior relevância ambiental no processo, mesmo sem recorrer às etapas de caracterização e normalização. Esta abordagem fornece uma base sólida para comparações entre cenários e ajuda a evidenciar os efeitos relativos do tipo de gás auxiliar utilizado, oferecendo subsídios importantes para decisões estratégicas na melhoria do processo produtivo e na minimização dos impactos ambientais.

3.3.4. Seleção dos indicadores ambientais

A Avaliação do Ciclo de Vida constitui uma ferramenta essencial para a compreensão aprofundada dos impactos ambientais associados aos processos industriais, permitindo identificar pontos críticos de consumo de recursos, emissões e geração de resíduos, bem como orientar estratégias de melhoria contínua. No presente trabalho, a análise concentrou-se no processo de corte de chapas metálicas, comparando duas tecnologias distintas de gás auxiliar: o azoto e o ar comprimido. A utilização da ACV neste contexto permite avaliar de forma

integrada os efeitos ambientais de cada tecnologia, considerando não apenas o consumo direto de energia e materiais, mas também as emissões geradas e o aproveitamento do material residual.

A análise revelou diferenças significativas entre as duas tecnologias, tanto do ponto de vista ambiental como operacional, evidenciando como a escolha do gás auxiliar influencia diretamente o desempenho do processo. Estas diferenças foram traduzidas em indicadores de sustentabilidade específicos, concebidos para transformar os dados técnicos obtidos na campanha experimental em informação prática, objetiva e aplicável ao contexto industrial. Estes indicadores permitem medir de forma quantificável dimensões críticas como eficiência energética, consumo de recursos naturais, geração de resíduos e circularidade do material, fornecendo uma visão holística do desempenho do processo.

A aplicação destes indicadores apresenta múltiplas utilidades. Em primeiro lugar, permite uma comparação direta entre tecnologias, evidenciando qual configuração apresenta menor impacto ambiental ou maior eficiência operacional. Em segundo lugar, fornece subsídios para decisões estratégicas no planeamento da produção, na escolha de equipamentos e na definição de políticas de sustentabilidade. Por fim, ao traduzir dados técnicos complexos em métricas acessíveis, os indicadores contribuem para a otimização do ciclo de vida do mobiliário escolar produzido, promovendo práticas industriais mais sustentáveis e alinhadas com os princípios da economia circular.

Desta forma, a integração da ACV e o desenvolvimento de indicadores específicos permitem não apenas avaliar o desempenho ambiental do corte a laser, mas também criar ferramentas práticas de gestão ambiental e operacional, reforçando a relevância da análise para a indústria e para políticas de produção mais responsáveis e eficientes.

Os indicadores de sustentabilidade são apresentados a seguir, organizados por tópicos, permitindo comparar de forma clara e objetiva o desempenho ambiental e operacional das duas tecnologias de corte:

- Potencial de Redução de Impacto (PRI)
 - O PRI fornece uma métrica objetiva que quantifica a redução potencial de impactos ambientais ao optar por uma tecnologia em detrimento da outra. Este indicador permite transformar os resultados do ACV em informação prática, suportando decisões estratégicas de melhoria contínua. A comparação entre N₂ e ar comprimido evidencia que a utilização do ar comprimido permite reduzir significativamente os impactos associados ao corte, demonstrando a relevância deste indicador para a orientação de políticas de produção mais sustentável.
 - Compara dois processos (Ar vs. N₂).
- $$PRI_i = \frac{I_{Ar,i} - I_{N_2,i}}{I_{Ar,i}}$$
- $I_{Ar,i}$ = impacto do processo com ar comprimido na categoria i

- $I_{N_2,i}$ = impacto do processo com azoto na categoria i
- Consumo Relativo de Gás Auxiliar (CRGA)
 - O CRGA centra-se na avaliação da eficiência do consumo dos gases auxiliares, considerando tanto o volume utilizado como o impacto ambiental associado. Este indicador permite identificar situações em que uma tecnologia, apesar de consumir mais gás em termos de volume, apresenta menor impacto ambiental total, oferecendo uma análise integrada da eficiência do processo. No estudo comparativo, o CRGA revela que o ar comprimido, embora possa exigir maior volume, gera menor impacto ambiental global do que o N_2 , destacando-se como uma opção mais sustentável.
 - Impacto por unidade de gás utilizado.

$$CRGA_i = \frac{I_i}{V_{gás}}$$

- $I_{Ar,i}$ = impacto do processo com ar comprimido na categoria i
- $I_{N_2,i}$ = impacto do processo com azoto na categoria i
- Índice de Circularidade do Processo (ICP)
 - O ICP integra a sustentabilidade do material com a eficiência do processo, relacionando a quantidade de material reciclável presente no produto final com os impactos ambientais associados à sua produção. Este indicador permite avaliar de forma completa a contribuição do processo para a economia circular, indo além da mera análise energética ou de emissões. No caso de estudo, o ICP evidencia que a escolha de tecnologias mais eficientes contribui simultaneamente para a redução de impactos ambientais e para a maximização da circularidade do mobiliário, reforçando a importância de indicadores que considerem múltiplas dimensões da sustentabilidade.
 - Crédito climático por massa de sucata valorizada.

$$ICP = \frac{C_{CO_2}}{M_{sucata}}$$

- C_{CO_2} = crédito total de CO_2 eq atribuído à reciclagem (kg CO_2 eq)
- M_{sucata} = massa de sucata recuperada (kg)
- Alternativamente, pode também ser expresso como crédito por unidade funcional:

$$ICP_{UF} = \frac{C_{CO_2}}{UF}$$

A aplicação destes indicadores no presente estudo permite transformar os resultados do ACV em informação prática e aplicável, oferecendo suporte técnico para decisões relativas à escolha da tecnologia de corte e à melhoria contínua do ciclo de vida do mobiliário escolar. A

Resultados e Discussão

comparação entre N_2 e ar comprimido evidencia diferenças significativas, demonstrando que, embora ambos os gases cumpram a função de corte, o ar comprimido apresenta melhor desempenho ambiental, maior eficiência e maior potencial de circularidade.

A utilização destes indicadores permite, ainda, identificar áreas críticas de intervenção, possibilitando a redução de impactos ambientais, a otimização do consumo de recursos e a promoção de práticas de produção mais sustentáveis. A abordagem integrada adotada assegura uma análise robusta, transparente e reprodutível, essencial para a fundamentação de decisões estratégicas no contexto industrial e acadêmico.

4. Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da campanha experimental e da modelação do ciclo de vida, seguidos da respetiva análise crítica e discussão. Inicialmente, são expostos os dados operacionais recolhidos, nomeadamente os consumos energéticos, os volumes de gás auxiliar utilizados, os tempos de corte, assim como a qualidade do acabamento e a geração de resíduos metálicos. Estes dados constituem a base para o inventário do ciclo de vida, cuja caracterização detalhada será apresentada em seguida.

De forma sequencial, procede-se à avaliação dos impactos ambientais associados às duas configurações de corte a laser, utilizando os indicadores selecionados previamente.

Por fim, esta secção culmina numa discussão integrada que contextualiza os resultados obtidos face à literatura científica e ao contexto industrial, destacando as implicações práticas e as limitações do estudo, bem como sugestões para investigações futuras.

4.1. Análise dos impactos ambientais através da ACV

Avaliação do corte efetuado através de N₂

A análise do processo de corte com recurso a azoto evidencia que os impactos ambientais se concentram em categorias muito específicas, enquanto diversas outras apresentam valores nulos ou residuais. Esta distribuição revela que o perfil ambiental do processo é condicionado sobretudo por emissões atmosféricas decorrentes do funcionamento do equipamento e pela utilização de eletricidade da rede UCTE, sendo estas as principais fontes de carga ambiental.

A categoria de Formação de Material Particulado Fino assume particular relevância, registando um resultado de $9,31 \times 10^{-5}$ kg PM_{2.5} eq. Este impacto está associado à libertação de partículas em suspensão (PM₁₀ – $1,79 \times 10^{-4}$ kg; PM_{2.5} – $8,68 \times 10^{-5}$ kg), que embora emitidas em quantidades reduzidas, apresentam um elevado potencial de afetar a saúde humana, especialmente em contextos de elevada densidade populacional. A normalização evidencia que mesmo emissões pouco expressivas em termos absolutos podem ter consequências ambientais e sanitárias significativas, dado o efeito cumulativo e persistente das partículas finas na qualidade do ar.

Seguem-se as categorias de Formação de Ozono Fotoquímico, com destaque para os efeitos sobre a saúde humana ($6,83 \times 10^{-5}$ kg NO_x eq) e sobre os ecossistemas terrestres ($7,47 \times 10^{-5}$ kg NO_x eq). Estes valores estão intimamente relacionados com a emissão de óxidos de azoto ($5,79 \times 10^{-5}$ kg) e compostos orgânicos voláteis não-metânicos ($5,79 \times 10^{-5}$ kg), que na atmosfera participam em reações fotoquímicas originando ozono troposférico. Embora os valores registados sejam da ordem das centésimas de grama, o seu potencial de impacto é elevado devido à reatividade química destas substâncias e à sua capacidade de potenciar fenómenos como o smog fotoquímico, com efeitos diretos tanto na saúde humana como na produtividade agrícola.

Em terceiro plano encontra-se a Acidificação Terrestre, que apresenta um resultado de $2,08 \times 10^{-5}$ kg SO₂ eq. Este impacto decorre sobretudo da emissão de NO_x, cuja transformação atmosférica conduz à formação de ácidos nítrico e nitroso, responsáveis por processos de acidificação dos solos e da vegetação. Apesar da magnitude ser inferior às categorias anteriores, a sua ocorrência deve ser destacada, uma vez que a acidificação é um fenómeno cumulativo e que compromete a fertilidade dos ecossistemas e a resiliência da biodiversidade.

Uma nota particular deve ser feita relativamente à categoria de Aquecimento Global, que apresenta um valor negativo (-55,21 kg CO₂ eq). Este resultado contraintuitivo decorre da contabilização da sucata metálica recuperada (0,147 kg) como crédito ambiental no balanço de ciclo de vida. Ao considerar-se a reciclagem futura deste resíduo metálico, o modelo assume uma substituição de matérias-primas primárias, o que se traduz numa redução líquida de emissões de gases com efeito de estufa. Assim, o processo em análise, longe de contribuir para o agravamento do aquecimento global, revela um potencial de mitigação neste indicador específico, o que confirma a relevância de estratégias de valorização de subprodutos na indústria transformadora.

No que respeita às restantes categorias de impacto como Ecotoxicidade (marinha, terrestre e em água doce), Eutrofização, Escassez de recursos fósseis e minerais, Depleção da camada de ozono, os resultados obtidos foram nulos. Esta ausência de contributos deve-se ao perfil tecnológico do processo, em que não se verificam consumos significativos de recursos fósseis, nem emissões de substâncias com potencial de toxicidade ou depleção da camada de ozono.

De um modo geral, o perfil ambiental do corte a azoto é dominado por emissões atmosféricas diretas, em especial partículas, óxidos de azoto e compostos voláteis, que se refletem em impactos sobre a qualidade do ar, a saúde humana e os ecossistemas terrestres. No entanto, a recuperação de sucata metálica introduz um efeito compensatório importante no indicador de aquecimento global, conferindo ao processo uma vantagem relativa nesta dimensão. Estes resultados confirmam a necessidade de uma análise integrada, em que tanto os fluxos de emissão como as práticas de valorização de resíduos são determinantes para a interpretação final da performance ambiental do sistema.

Avaliação do corte efetuado através de Ar Comprimido

A avaliação do perfil ambiental do processo de corte a ar comprimido permite concluir que os impactos se encontram concentrados num número reduzido de categorias, refletindo essencialmente pressões de natureza atmosférica. Entre as categorias avaliadas, a Formação de Material Particulado Fino destaca-se como a mais relevante, apresentando um valor de aproximadamente 0,000894 kg PM₂₋₅ eq. Este resultado indica que o processo contribui, ainda que em magnitude absoluta reduzida, para a emissão de partículas inaláveis com elevado potencial de impacto na saúde humana. A particular gravidade deste poluente advém não tanto da quantidade emitida, mas da sua capacidade de penetração profunda no sistema respiratório, associando-se a patologias crónicas e ao agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias. A presença desta categoria como dominante demonstra que o processo de corte com recurso a ar comporta uma contribuição significativa para a degradação da qualidade do ar local.

Resultados e Discussão

Em segundo lugar surgem as categorias relacionadas com a Formação de Ozono Troposférico, quer ao nível da afetação dos ecossistemas terrestres (0,000248 kg NO_x eq), quer ao nível da saúde humana (0,000242 kg NO_x eq). Estes valores, muito próximos entre si, resultam de emissões de óxidos de azoto (NO_x) e compostos orgânicos voláteis não-metânicos, que na presença de radiação solar desencadeiam reações fotoquímicas responsáveis pela formação de ozono ao nível do solo. A presença de ozono troposférico tem repercussões negativas em duas dimensões críticas: afeta os ecossistemas vegetais, reduzindo o crescimento das culturas agrícolas e comprometendo a biodiversidade, e prejudica a saúde humana, aumentando a incidência de problemas respiratórios e cardiovasculares. Embora os valores absolutos sejam reduzidos, a sua relevância qualitativa não deve ser negligenciada, dado o elevado potencial de impacto associado a este poluente secundário.

Segue-se a Acidificação Terrestre, com um valor de 0,000083 mol H⁺ eq. Este resultado está associado sobretudo à emissão de NO_x, que ao reagir na atmosfera origina compostos acidificantes capazes de provocar deposição ácida. Apesar do valor ser modesto, a acidificação constitui uma problemática ambiental persistente, uma vez que mesmo pequenas quantidades de poluentes podem afetar ecossistemas terrestres e aquáticos particularmente sensíveis, conduzindo à degradação do solo, à alteração do pH de rios e lagos e à perda de biodiversidade.

As restantes categorias avaliadas, como a ecotoxicidade aquática e terrestre, a eutrofização, o uso do solo, a escassez de recursos fósseis e minerais ou ainda a radiação ionizante, apresentam valores nulos ou desprezáveis no contexto deste processo. Este resultado demonstra que, no caso do corte com ar, as pressões ambientais estão essencialmente circunscritas ao vetor atmosférico, não se verificando contributos significativos para problemáticas relacionadas com os recursos hídricos ou com a utilização de matérias-primas.

De forma global, pode concluir-se que o perfil ambiental do processo de corte a ar comprimido é dominado por três categorias principais: a Formação de Material Particulado, a Formação de Ozono Troposférico e a Acidificação Terrestre. Estas categorias, em conjunto, representam praticamente a totalidade do impacto registado. A interpretação destes resultados evidencia que os efeitos ambientais do processo estão fortemente associados às emissões atmosféricas derivadas da operação, as quais comprometem sobretudo a qualidade do ar e, conseqüentemente, a saúde humana e a integridade dos ecossistemas.

A principal implicação ambiental prende-se, portanto, com a necessidade de mitigar as emissões de partículas e de precursores do ozono e da acidificação. Medidas como a otimização da eficiência energética do processo, a utilização de sistemas de filtração e a adoção de tecnologias de corte menos poluentes podem contribuir de forma significativa para reduzir estes impactos. Deste modo, assegura-se não apenas a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental local, mas também a coerência do processo com os princípios mais exigentes da sustentabilidade industrial.

4.2. Resultados e Análise dos Indicadores Ambientais

Nesta secção são apresentados e analisados os principais resultados obtidos a partir do cálculo dos indicadores ambientais associados ao material em estudo. Após a conversão dos dados do inventário para uma base funcional de 1 m², foi possível obter uma visão mais precisa e comparável do desempenho ambiental do produto, facilitando a interpretação dos impactos ao longo do seu ciclo de vida.

Os indicadores seleccionados seguem metodologias reconhecidas no âmbito da Análise do Ciclo de Vida e permitem quantificar diferentes categorias de impacto ambiental, tais como emissões de gases com efeito de estufa, consumo de energia, uso de recursos naturais, entre outros. Cada resultado é acompanhado de uma interpretação técnica detalhada, destacando não apenas o significado numérico, mas também as suas implicações em termos de sustentabilidade ambiental.

Esta análise visa, assim, apoiar a compreensão crítica dos impactos associados ao material, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões mais informadas no contexto do design, da produção e da escolha de materiais com melhor desempenho ambiental.

Partindo da confirmação de que os totais do inventário correspondem a uma chapa com dimensões de 2500 × 1250 mm com área total de 3,125 m² e massa de 19,82 kg, procedeu-se à normalização dos resultados por unidade funcional de 1 m². Para tal, os valores absolutos foram divididos pela área da chapa, permitindo recalcular todos os indicadores ambientais de forma proporcional e comparável.

Apresentam-se, de seguida, os valores obtidos por metro quadrado, acompanhados da respetiva análise técnica e interpretação em termos de sustentabilidade. Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se, respetivamente, os dados referentes ao corte com N₂ e ao corte com Ar, parametrizados segundo a unidade funcional. Estes resultados correspondem à análise de ACV e constituem indicadores ambientais derivados da avaliação do ciclo de vida, os quais serão posteriormente utilizados para o cálculo dos indicadores de sustentabilidade definidos no Capítulo 3.3.4.

Indicadores Ambientais	Cálculos	Resultados segundo UF
Formação de material particulado fino (PM_{2.5} eq)	$\frac{9,31713 \times 10^{-5}}{3,125}$	$2,985 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$
Ozono (saúde humana, NO_x eq)	$\frac{6,8287 \times 10^{-5}}{3,125}$	$0,02186 \text{ g/m}^2$
Ozono (ecossistemas, NO_x eq)	$\frac{7,4652 \times 10^{-5}}{3,125}$	$0,02389 \text{ g/m}^2$
Aquecimento Global (kg CO₂ eq)	$\frac{-55,20833333}{3,125}$	$-17,667 \text{ CO}_2 \text{ eq/m}^2$

Resultados e Discussão

Sucata por m ²	$\frac{0,146990741}{3,125}$	0,047 kg/m ²
---------------------------	-----------------------------	-------------------------

Tabela 7 – Dados obtido após análise do corte a N2, parametrizados segundo a UF

Indicadores	Cálculos	Resultados segundo UF
Formação de material particulado fino (PM _{2.5} eq)	$\frac{8,94 \times 10^{-5}}{3,125}$	0,2861 g/m ²
Ozono (saúde humana, NO _x eq)	$\frac{2,42 \times 10^{-5}}{3,125}$	0,07744 g/m ²
Ozono (ecossistemas, NO _x eq)	$\frac{7,4652 \times 10^{-5}}{3,125}$	0,02389 g/m ²
Sucata por m ²	$\frac{0,146990741}{3,125}$	0,047 kg/m ²

Tabela 8 - Dados obtido após análise do corte a Ar parametrizados, parametrizados segundo a UF

Com o objetivo de interpretar de forma mais clara e estruturada os resultados obtidos, foram desenvolvidos indicadores específicos de sustentabilidade, conforme definido no Capítulo 3.3.4. Estes indicadores permitem transformar os dados provenientes da análise de ACV em métricas comparáveis e de fácil interpretação, possibilitando uma avaliação mais abrangente do desempenho ambiental dos processos em estudo. Desta forma, torna-se possível identificar de forma objetiva os impactos mais relevantes e apoiar a tomada de decisão no sentido da melhoria contínua e da otimização da sustentabilidade.

- Potencial de Redução de Impacto (PRI)

$$PRI_{PM_{2.5} \text{ eq}} = \frac{I_{Ar,i} - I_{N_2,i}}{I_{Ar,i}}$$

$$\leftrightarrow PRI_{PM_{2.5} \text{ eq}} = \frac{0,28608 - 0,02985}{0,28608} * 100\% \leftrightarrow PRI_{PM_{2.5} \text{ eq}} = 89,58\%$$

$$PRI_{NO_x \text{ eq}} \approx 71,78\%$$

$$PRI_{NO_x} \approx 69,90\%$$

O Potencial de Redução de Impacto é um indicador que quantifica quanto é possível reduzir os impactos ambientais ao optar por uma tecnologia em detrimento da outra. Na prática, traduz-se numa medida de eficácia ambiental e sustentabilidade, permitindo perceber o peso que a escolha do gás tem no desempenho do processo.

No presente estudo, o PRI para a formação de partículas finas (PM_{2.5} eq) foi de 89,58%, significando que a tecnologia considerada mais favorável resulta em quase 90% menos emissões de partículas inaláveis por chapa cortada. Este valor não é abstrato: estamos a falar de partículas microscópicas com diâmetro inferior a 2,5 µm, que penetram profundamente nos

pulmões e podem alcançar a corrente sanguínea. A exposição continuada a $PM_{2.5}$ está diretamente associada a doenças respiratórias como asma ou bronquite crônica, cardiovasculares por exemplo enfartes ou hipertensão e até certos tipos de cancro. Além dos efeitos crônicos, episódios de poluição atmosférica rica em partículas finas estão associados a mortes prematuras em áreas urbanas, sobretudo em grupos de risco como idosos e crianças. Reduzir em quase 90% estas emissões é, portanto, um contributo direto e relevante para a saúde pública e qualidade do ar.

Já para os óxidos de azoto (NO_x eq), o PRI revelou reduções de 71,78% (saúde humana) e 69,90% (ecossistemas terrestres). Os NO_x são gases altamente reativos, que ao interagirem com a luz solar participam na formação de ozono troposférico (O_3). O ozono, quando presente ao nível do solo, é um poluente perigoso: provoca irritação ocular, tosse persistente, agravamento de doenças pulmonares e aumento das hospitalizações por crises respiratórias. Do ponto de vista ecológico, o ozono reduz a produtividade agrícola, prejudica a fotossíntese e fragiliza os ecossistemas naturais. Além disso, os NO_x contribuem para a acidificação do solo e da água, promovendo a perda de biodiversidade e comprometendo a fertilidade dos terrenos agrícolas.

Assim, o PRI demonstra que a escolha tecnológica não é uma simples decisão operacional, mas sim um fator crítico de sustentabilidade. Reduções desta magnitude (90% em partículas finas e cerca de 70% em NO_x) revelam o potencial transformador da decisão do gás auxiliar na mitigação de problemas ambientais e de saúde pública, confirmando que as opções tecnológicas industriais têm reflexos diretos no bem-estar humano e na integridade dos ecossistemas.

- Consumo Relativo de Gás Auxiliar (CRGA)

N₂:

$$V_{gás,per\ m2} = \frac{V_{gás,por\ chapa}}{A_{sheet}}$$

- Para o $PM_{2.5}$ eq:

$$\leftrightarrow V_{N_2,per\ m2} = \frac{4,776\ Nm^3}{3,125\ m^2} \leftrightarrow V_{N_2,per\ m2} = 1,52832 \frac{Nm^3}{m^2}$$

$$CRGA_i = \frac{I_i}{V_{gás}}$$

$$\leftrightarrow CRGA_{N_2} = \frac{0,000029814816}{1,52832} \leftrightarrow CRGA_{N_2} = 1,9508 \times 10^{-5} \frac{kg\ PM_{2.5}\ eq}{Nm^3}$$

- Para o NO_x eq:

$$CRGA_{N_2} \approx 1,4298 \times 10^{-5} \frac{kg\ NO_x\ eq}{Nm^3}$$

Ar:

$$V_{\text{gás,per m}^2} = \frac{V_{\text{gás,por chapa}}}{A_{\text{sheet}}}$$

- Para o $PM_{2.5}$ eq:

$$\leftrightarrow V_{\text{Ar,per m}^2} = \frac{3,317 \text{ m}^3}{3,125 \text{ m}^2} \leftrightarrow V_{\text{Ar,per m}^2} = 1,06144 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$$

$$\leftrightarrow CRGA_{\text{Ar}} = \frac{0,00028608}{1,06144} \leftrightarrow CRGA_{\text{Ar}} = 2,6952 \times 10^{-4} \frac{\text{kg } PM_{2.5} \text{ eq}}{\text{m}^3}$$

- Para o NO_x eq:

$$CRGA_{\text{Ar}} \approx 7,2957 \times 10^{-5} \frac{\text{kg } NO_x \text{ eq}}{\text{Nm}^3}$$

O Consumo Relativo de Gás Auxiliar (CRGA) é um indicador que permite avaliar de forma comparativa os impactos ambientais resultantes do consumo de diferentes gases auxiliares utilizados no corte a laser. Ao invés de se limitar a analisar o volume total consumido, este indicador expressa a intensidade de impacto por unidade de gás, revelando assim a eficiência ambiental de cada alternativa tecnológica. Em termos práticos, o CRGA mostra quanto cada metro cúbico de gás utilizado contribui para categorias de impacto como a formação de partículas finas ($PM_{2.5}$ eq) e as emissões de óxidos de azoto (NO_x eq).

No presente estudo, os resultados evidenciaram diferenças muito significativas entre o uso de azoto e de ar comprimido. Para a categoria de $PM_{2.5}$ eq, o CRGA do azoto foi de $1,95 \times 10^{-5}$ (kg $PM_{2.5}$ eq)/(Nm³), enquanto o ar comprimido apresentou um valor de $2,70 \times 10^{-4}$ (kg $PM_{2.5}$ eq)/(m³). Isto significa que, em termos relativos, por cada metro cúbico consumido, o ar comprimido gera aproximadamente catorze vezes mais impacto do que o azoto na formação de partículas inaláveis. Esta diferença é altamente relevante, dado que as partículas em suspensão constituem um dos principais poluentes atmosféricos com efeitos diretos na saúde humana, provocando problemas respiratórios crônicos, agravamento de doenças cardiovasculares e aumento da mortalidade prematura em populações expostas.

Na categoria de NO_x eq, o mesmo padrão foi verificado. O CRGA do azoto registou um valor de $1,43 \times 10^{-5}$ (kg NO_x eq)/(Nm³), enquanto o ar comprimido atingiu $7,30 \times 10^{-5}$ (kg NO_x eq)/(m³), revelando que, neste caso, o ar comprimido apresenta um impacto aproximadamente cinco vezes superior. Considerando que os óxidos de azoto são responsáveis pela formação de ozono troposférico, um poluente altamente nocivo à saúde e responsável por crises respiratórias agudas e contribuem ainda para a acidificação do solo e da água, as diferenças entre as alternativas tornam-se particularmente críticas.

Assim, a interpretação destes resultados permite concluir que, embora o ar comprimido seja frequentemente considerado vantajoso do ponto de vista económico e logístico, por poder ser produzido localmente através de compressores sem necessidade de fornecimento externo, a sua utilização acarreta impactos ambientais significativamente superiores quando comparada ao azoto. Do ponto de vista da sustentabilidade, isto significa que a escolha do gás auxiliar não pode ser feita apenas com base em critérios de

custo ou conveniência operacional, mas deve integrar uma análise ambiental robusta. O azoto apresenta-se, neste sentido, como a opção mais eficiente e sustentável, dado que por cada unidade de volume consumido gera impactos muito inferiores em categorias ambientais críticas.

- Índice de Circularidade do Processo (ICP)

$$M_{\text{sucata,per m}^2} = \frac{M_{\text{sucata,total}}}{A_{\text{sheet}}}$$

$$\leftrightarrow M_{\text{sucata,per m}^2} = \frac{0,146990741}{3,125} \leftrightarrow M_{\text{sucata,per m}^2} = 0,04703703712 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$ICP = \frac{C_{CO_2}}{M_{\text{sucata}}}$$

$$\leftrightarrow ICP = \frac{|-55,20833333|}{0,04703703712} \leftrightarrow ICP = 375,5905505 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$$

O Índice de Circularidade do Processo (ICP) constitui um indicador que procura integrar a lógica da economia circular na avaliação de processos produtivos, relacionando a quantidade de material reciclável gerado com a carga ambiental associada à sua produção. Ao expressar a intensidade de emissões de gases com efeito de estufa por cada quilograma de material reciclável obtido, este índice permite perceber até que ponto a recuperação de sucata metálica compensa, ou não, os impactos ambientais do processo de corte e fabrico.

No caso analisado, o ICP obtido foi de 375,59 (kg CO₂ eq)/kg. Este valor significa que, para cada quilograma de sucata metálica recuperada, existem cerca de 376 kg de emissões equivalentes de dióxido de carbono associadas ao processo. Trata-se de uma intensidade ambiental extremamente elevada, que evidencia que, apesar da sucata poder ser reintegrada nos ciclos produtivos de aço, o impacto da etapa de corte e transformação é muito significativo em termos de emissões. Este resultado revela que a geração de sucata, por si só, não é suficiente para compensar a pegada ambiental do processo.

No entanto, a existência de sucata metálica reciclável não deve ser desvalorizada. Pelo contrário, trata-se de uma oportunidade essencial para mitigar parcialmente os impactos, uma vez que a reciclagem de aço reduz substancialmente a necessidade de matérias-primas primárias, como o minério de ferro e o carvão, e diminui o recurso a processos industriais altamente intensivos em energia, como a siderurgia primária. Ao reintegrar a sucata no ciclo produtivo, consegue-se evitar emissões futuras que seriam inevitáveis caso se recorresse exclusivamente a matérias-primas virgens.

Do ponto de vista da sustentabilidade, o ICP alerta para uma dualidade importante: por um lado, a etapa de corte apresenta uma carga ambiental elevada por unidade de material reciclável; por outro, a valorização da sucata oferece uma via clara de compensação e alinhamento com os princípios da economia circular. Este indicador reforça, assim, a necessidade de encarar a reciclagem não como uma solução isolada, mas como parte de uma

Resultados e Discussão

estratégia integrada, que deve incluir também a melhoria da eficiência energética do processo, a redução de emissões na fonte e a gestão responsável de materiais. Somente desta forma o ICP poderá evoluir para valores mais equilibrados, em que a circularidade não seja apenas um potencial, mas sim um contributo efetivo para a neutralidade carbónica e para a sustentabilidade global do setor industrial.

Resultados e Discussão

5. Conclusão

Este capítulo apresenta a síntese dos principais resultados obtidos ao longo do estudo, destacando as conclusões mais relevantes em relação aos objetivos definidos inicialmente. Procura-se ainda refletir sobre as limitações identificadas durante a investigação e propor direções para trabalhos futuros, de modo a contribuir para o desenvolvimento contínuo da área de corte a laser e avaliação do ciclo de vida.

5.1. Conclusões finais

O estudo desenvolvido constituiu um exercício rigoroso e inovador de análise do processo de corte a laser com diferentes gases auxiliares, integrando resultados experimentais com uma avaliação ambiental baseada na metodologia da Análise do Ciclo de Vida. A investigação permitiu não apenas comparar duas configurações distintas mas também compreender as implicações mais vastas dessas escolhas ao nível da sustentabilidade industrial, da competitividade económica e da saúde pública.

Em primeiro lugar, a comparação experimental evidenciou de forma clara que o corte com N_2 apresenta vantagens técnicas significativas relativamente ao ar comprimido. O acabamento das superfícies cortadas revelou-se mais limpo e uniforme, com menor incidência de oxidação e menor formação de rebarbas. Este aspeto, que à primeira vista poderia parecer meramente estético, possui consequências práticas diretas para a indústria. Ao garantir superfícies de elevada qualidade logo na fase de corte, minimizam-se etapas de retrabalho, tais como polimento, desbaste ou aplicação de revestimentos protetores adicionais. Esta redução de operações secundárias implica, por sua vez, menor consumo energético total, menor desgaste de ferramentas, menor necessidade de mão de obra e tempos de produção mais curtos. Ou seja, a escolha do gás não condiciona apenas o impacto ambiental imediato do corte, mas influencia de forma determinante a eficiência global da cadeia de produção.

Em contraste, o corte com ar comprimido apresentou maior variabilidade na qualidade do acabamento e maior tendência para oxidação nas superfícies expostas. Embora a possibilidade de produzir ar comprimido localmente, através de compressores, constitua uma vantagem logística e económica no curto prazo, os resultados deste estudo indicam que tal opção pode traduzir-se em custos ocultos quando considerada a totalidade do ciclo produtivo. A necessidade acrescida de retrabalho, a menor fiabilidade dimensional e os impactos ambientais superiores tornam esta configuração menos atrativa numa perspetiva de longo prazo,

Referências

sobretudo em contextos industriais sujeitos a padrões de qualidade exigentes ou a regulações ambientais cada vez mais rigorosas.

No plano ambiental, as diferenças entre os dois gases foram ainda mais marcantes. O corte com N_2 revelou uma redução superior a 90% nas emissões de partículas inaláveis ($PM_{2.5}$ eq), em comparação com o ar comprimido. Esta diferença tem consequências reais e tangíveis, partículas finas representam um dos poluentes atmosféricos mais críticos para a saúde humana, estando associadas ao aumento da mortalidade prematura e ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Ao reduzir drasticamente estas emissões, o corte com N_2 contribui para ambientes de trabalho mais seguros e para uma menor contribuição industrial no agravamento da qualidade do ar em zonas urbanas e industriais.

De forma semelhante, a redução de cerca de 70% nas emissões de óxidos de azoto (NO_x eq) com o N_2 em comparação com o ar comprimido reveste-se de particular importância. Os NO_x são precursores do ozono troposférico e do smog fotoquímico, responsáveis por impactos ambientais de larga escala, como a degradação da qualidade do ar em zonas metropolitanas e o aumento de problemas respiratórios em populações vulneráveis. Adicionalmente, os NO_x são agentes centrais nos processos de acidificação de solos e corpos hídricos, conduzindo a perdas significativas de biodiversidade. A redução obtida no presente estudo mostra que a escolha do gás auxiliar não é apenas uma questão de eficiência energética ou de custo de produção, mas está diretamente ligada à capacidade do setor industrial de reduzir externalidades ambientais que têm impacto sobre comunidades inteiras e ecossistemas.

Um dos resultados mais surpreendentes foi a obtenção de um valor negativo no indicador de Aquecimento Global para o cenário com N_2 , resultado da contabilização da sucata metálica como crédito ambiental. Embora contraintuitivo à primeira vista, este resultado revela o poder transformador da economia circular quando devidamente integrada nos processos industriais. A sucata metálica, ao ser reintroduzida em processos siderúrgicos, evita a extração e processamento de minério de ferro e outros recursos primários, atividades altamente intensivas em energia e emissões. Assim, a valorização da sucata não apenas mitiga impactos, como pode gerar benefícios líquidos em termos de emissões globais de CO_2 . Contudo, uma análise mais atenta do Índice de Circularidade do Processo (ICP) revelou um paradoxo: para cada quilograma de sucata recuperada, registaram-se cerca de 376 kg de emissões de CO_2 eq associadas ao processo de corte. Isto significa que, embora a reciclagem desempenhe um papel central na mitigação, os benefícios da valorização de resíduos não compensam, por si só, a intensidade de emissões do processo. Este resultado reforça a ideia de que a circularidade deve ser vista como complementar a estratégias de eficiência energética e de inovação tecnológica, e não como substituto das mesmas.

O corte com ar comprimido, por sua vez, apresentou valores ambientais significativamente superiores, em alguns casos entre cinco e catorze vezes maiores do que os registados para o N_2 . Esta discrepância expõe um ponto central para a tomada de decisão industrial: a aparente economia imediata de optar por um gás de baixo custo e fácil disponibilidade local traduz-se, inevitavelmente, em custos ambientais e sociais acrescidos. Com a crescente exigência de cumprimento de normas ambientais tanto ao nível europeu como global e com a internalização progressiva de externalidades nos modelos económicos, estas diferenças ambientais

transformar-se-ão em desvantagens económicas concretas. Ou seja, a competitividade futura das empresas dependerá cada vez mais da sua capacidade de escolher soluções tecnológicas que conciliem custo, qualidade e sustentabilidade ambiental.

Importa, contudo, reconhecer que a opção pelo azoto, apesar de apresentar um perfil ambiental mais favorável, não está isenta de limitações relevantes. O seu principal ponto negativo reside no elevado custo associado à produção, armazenamento e fornecimento deste gás, tornando-o uma solução dispendiosa quando comparada com o ar comprimido. Assim, embora o N_2 se revele mais sustentável do ponto de vista ambiental, a sua utilização implica encargos económicos acrescidos que podem comprometer a viabilidade do processo em determinados contextos industriais, sobretudo em setores altamente sensíveis a custos operacionais. Esta dualidade evidencia a complexidade da sustentabilidade: uma solução tecnologicamente avançada e ambientalmente vantajosa pode não ser, no imediato, economicamente sustentável para todas as empresas.

Finalmente, importa salientar que os resultados apresentados são indissociáveis da metodologia de ACV utilizada, baseada na abordagem gate-to-gate. Ao focar exclusivamente o processo de corte, esta opção metodológica permitiu isolar as suas principais fontes de impacto e compreender melhor as diferenças entre gases auxiliares. No entanto, ao excluir etapas como a produção do equipamento, a extração de matérias-primas e o transporte, limitou também a abrangência da análise. Uma abordagem cradle-to-gate ou mesmo cradle-to-grave poderia fornecer resultados de magnitude diferente e uma visão mais holística, incluindo impactos ocultos que não foram capturados nesta investigação.

Em síntese, os resultados demonstram de forma inequívoca que o corte com N_2 constitui uma solução mais sustentável e tecnologicamente vantajosa ao nível ambiental, enquanto o ar comprimido, embora apelativo no curto prazo, apresenta limitações que comprometem a sua viabilidade futura. Todavia, o elevado custo do N_2 não pode ser negligenciado, uma vez que representa uma barreira económica real que influencia a tomada de decisão. A escolha do gás auxiliar assume, assim, um carácter estratégico que deve equilibrar não apenas a eficiência produtiva e os impactos ambientais, mas também a acessibilidade económica e a sustentabilidade global dos processos industriais.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Apesar da robustez metodológica e da consistência dos resultados alcançados, é fundamental reconhecer as limitações do presente estudo, tanto em termos experimentais como em termos de avaliação ambiental.

No plano experimental, uma das principais dificuldades encontradas foi a recolha de dados para a construção do inventário do ciclo de vida. A natureza industrial do processo de corte a laser implicou desafios na monitorização direta de consumos energéticos, fluxos de materiais e emissões. Em várias situações, não foi possível recolher valores exatos, sendo necessário recorrer a estimativas fundamentadas em literatura, a dados de fabricantes ou a pressupostos técnicos baseados na experiência prática. Este processo, ainda que metodologicamente

Referências

controlado, introduz uma margem de incerteza que condiciona a precisão absoluta dos resultados.

No plano metodológico, a escolha da abordagem gate-to-gate constituiu simultaneamente uma vantagem e uma limitação. Por um lado, permitiu focar de forma clara e objetiva no processo de corte em si, possibilitando uma comparação direta entre N_2 e ar comprimido. Por outro lado, ao excluir etapas anteriores, como a produção e compressão dos gases, a extração de matérias-primas ou a fabricação da máquina de corte e posteriores como o fim de vida dos equipamentos ou dos produtos cortados, impôs restrições à interpretação global dos resultados. É, por isso, necessário sublinhar que as conclusões aqui apresentadas são válidas sobretudo para a análise direta do processo de corte, não devendo ser generalizadas para todo o ciclo de vida de produtos fabricados com recurso a esta tecnologia.

Outra limitação relevante prende-se com a avaliação de impacto ambiental propriamente dita. A utilização de bases de dados genéricas, embora reconhecidas internacionalmente, pode não refletir com exatidão as especificidades regionais ou tecnológicas da realidade industrial em análise. Adicionalmente, a ausência de uma análise de incerteza aprofundada impossibilita quantificar rigorosamente a robustez estatística dos resultados obtidos.

Para superar estas limitações e aprofundar o conhecimento adquirido, várias linhas de investigação futura podem ser delineadas. Em primeiro lugar, seria pertinente expandir o estudo para diferentes materiais e condições operacionais, de modo a avaliar a consistência dos resultados em contextos mais diversificados. Em segundo lugar, a adoção de abordagens cradle-to-gate ou cradle-to-grave permitiria integrar no modelo os impactos associados ao fabrico da máquina, ao transporte de gases e ao fim de vida dos produtos, oferecendo uma visão mais holística e completa da sustentabilidade do processo.

Adicionalmente, recomenda-se o desenvolvimento de metodologias mais avançadas de análise de incerteza, capazes de quantificar a variabilidade introduzida pelas estimativas de inventário e de aumentar a robustez estatística das conclusões. Paralelamente, seria de grande relevância explorar gases auxiliares alternativos ou híbridos, avaliando o seu potencial de reduzir emissões e melhorar a qualidade do corte. Finalmente, a integração de uma componente económica na avaliação, cruzando custos financeiros com impactos ambientais, permitiria fornecer à indústria uma ferramenta de apoio à decisão ainda mais robusta e pragmática.

Em síntese, embora o presente trabalho tenha alcançado resultados sólidos e relevantes, permanece ainda um vasto campo de investigação a explorar. A superação das limitações aqui identificadas permitirá não apenas aprofundar o conhecimento científico sobre o corte a laser, mas também acelerar a transição da indústria para práticas mais eficientes, seguras e alinhadas com os princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Referências

- Alefari, M., Salonitis, K., & Xu, Y. (2017). The role of leadership in implementing lean manufacturing. *Procedia CIRP*, 63, 756–761. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.169>
- Debnath, B., Shakur, M. S., Bari, A. B. M. M., & Karmaker, C. L. (2023). Bayesian Best–Worst approach for assessing the critical success factors in sustainable lean manufacturing. *Decision Analytics Journal*, 6, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100157>
- Järvenpää, E., & Lanz, M. (2019). Lean Manufacturing and Sustainable Development. In W. Leal Filho et al. (Eds.), *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71062-4_7-1
- Saraiva, T. S., Almeida, M. de, Bragança, L., & Barbosa, M. T. (2018). Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, 10(6), 1849. <https://doi.org/10.3390/su10061849>
- United Nations Environment Programme. (2011). *Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products*. UNEP. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org>
- Zach, M., & Vyletal, P. (2014). The importance of methodology evaluation of school furniture for Czech children with mobility disability in relation to children’s anthropometry. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 62(1), 279–291. <https://doi.org/10.11118/actaun201462010279>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
- Carvalho, C. V., Lopes, M. P., Ramos, A. G., Ávila, P., Bastos, J., Fonseca, L., & Martens, I. (2013). Lean Learning Academy: An innovative framework for Lean Manufacturing training. *Conference Paper*. <https://doi.org/10.1109/CISPEE.2013.6701958>
- Sundar, R., Balaji, A. N., & Kumar, R. M. Satheesh. (2014). A Review on Lean Manufacturing Implementation Techniques. *Procedia Engineering*, 97, 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.341>
- Shah, R., & Ward, P. T. (2003). Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management*, 21(2), 129–149. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00108-0)
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation* (2ª ed., 2003). Free Press, Simon & Schuster, Inc. <https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967>
- Costa, C., Pinto Ferreira, L., Sá, J. C., & Silva, F. J. G. (2018). Implementation of 5S methodology in a metalworking company. In B. Katalinic (Ed.), *DAAAM International Scientific Book*

Referências

- 2018 (pp. 001–012). Vienna, Austria: DAAAM International.
<https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2018.01>
- Ballesterro-Álvarez, M. E. (2012). *Gestão de qualidade, produção e operações* (2ª ed.). São Paulo: Atlas.
- Roriz, C., Nunes, E. M. P., & Sousa, S. D. (2017). Application of lean production principles and tools for quality improvement of production processes in a carton company. *Procedia Manufacturing*, 11, 1069–1076. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.218>
- Sivarajan, S., & Padmanabhan, R. (2014). Green machining and forming by the use of surface coated tools. *Procedia Engineering*, 97, 15–21.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.219>
- Belekoukias, I., Garza-Reyes, J. A., & Kumar, V. (2014). The impact of lean methods and tools on the operational performance of manufacturing organisations. *International Journal of Production Research*, 52(18), 5346–5366.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2014.903348>
- Sorooshian, S., Salimi, M., Bavani, S., & Aminattaehri, H. (2012). Case report—Experience of 5S implementation. *Journal of Applied Science Research*, 8(7), 3855–3859.
- A Common Sense Approach with the 5S Tool. (n.d.). Consultado em 22 dezembro 2024, de <https://opexlearning.com/resources/a-common-sense-approach-with-the-5s-tool/18936/>
- Wani, S., & Shinde, D. K. (2021). Study and implementation of ‘5S’ methodology in the furniture industry warehouse for productivity improvement. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(08), 184–191.
<https://doi.org/10.17577/IJERTV10IS080114>
- Mourato, J., Ferreira, L. P., Sá, J., Silva, F. J. G., Dieguez, T., & Tjahjono, B. (2020). Improving internal logistics of a bus manufacturing using the lean techniques. *International Journal of Productivity and Performance Management*. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2020-0327>
- Silva, R. P. M. (2009). *Avaliação do ciclo de vida da rolha de cortiça natural* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Curran, M. A. (2013). Life cycle assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273–277.
<https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>
- Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., de Bruijn, H., van Duin, R., & Huijbregts, M. A. J. (2002). *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic.

Referências

- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice* (EPA/600/R-06/060). National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development.
- Wolf, C., Klein, D., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2015). Systematic review and meta-analysis of life cycle assessments for wood energy services. *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), 743–759. <https://doi.org/10.1111/jiec.12321>
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Sousa, F. (2010). *Otimização de métodos de escolha de materiais com base no desempenho sustentável* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. FEUP.
- Leitão, A. (2015). Economia circular: Uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. *Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting*, 1(2), 150–157. Disponível em bibliotecas académicas.
- STACBOND. (n.d.). Sustentabilidade: STACBOND ECOGREEN. Consultado em 02 janeiro 2024, de <https://stacbond.com/pt-pt/sustentabilidade/>
- Sonae Arauco. (n.d.). Projeto EcoReFibre. Consultado em 02 janeiro 2024, de <https://www.sonaearauco.com/pt/news/industria-europeia-de-paineis-de-madeira-potencia-a-reciclagem-e-a-utilizacao-circular-de-madeira-recuperada/>
- Abrantes, J. A. (2021). *Proposta de um índice de sustentabilidade para avaliar o desempenho sustentável em operações logísticas* [Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Universidade NOVA de Lisboa].
- Filimonau, V. (2015). The life cycle thinking approach and the method of life cycle assessment (LCA). In *Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Analysis in Tourism: A Critical Review of Applications and Implications* (p. 136). Springer International Publishing Switzerland.
- Curran, M. A. (1996). Environmental life-cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(3), 179–179.
- Curran, M. A. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice*. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory. EPA/600/R-06/060. <https://doi.org/10.1061/epa.0606>
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., & Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- Soares, C. M. F., Santos, C. S., Sabbadini, F. S., Nikoofard, V., & Lima, D. M. G. (2024). Economia circular e Indústria 4.0: Áreas de aplicação conjunta. *Exacta*. <https://doi.org/10.5585/2024.23704>

Referências

- Fraga, M. A. C. H. (2017). *A economia circular na indústria portuguesa de pasta, papel e cartão* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa]. Disponível em repositórios académicos.
- Corticeira Amorim, S.G.P.S., S.A. (2020). *Relatório de sustentabilidade 2020*. Corticeira Amorim. Consultado em 02 janeiro 2024, de <https://www.amorim.com/pt/sustentabilidade/relatorios/>
- JF Almeida é exemplo de boas práticas. (n.d.). *Portugal Têxtil*. Consultado em 02 janeiro 2024, de <https://portugaltexil.com/jf-almeida-e-exemplo-de-boas-praticas/>
- Reganold, J. P., Glover, J. D., Andrews, P. K., & Hinman, H. R. (2001). Sustainability of three apple production systems. *Nature*, *410*(6831), 926–930. <https://doi.org/10.1038/35073574>
- de Azambuja Ribeiro, E. L., & González-García, E. (2016). Indigenous sheep breeds in Brazil: Potential role for contributing to the sustainability of production systems. *Tropical Animal Health and Production*, *48*(7), 1275–1282. <https://doi.org/10.1007/s11250-016-1109-3>
- Daian, G., & Ozarska, B. (2009). Wood waste management practices and strategies to increase sustainability standards in the Australian wooden furniture manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, *17*(16), 1594–1602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.008>
- Francis, A., & Thomas, A. (2019). Integrating lean construction and sustainability via a system dynamics framework. *27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 1187–1196. <https://doi.org/10.24928/2019/0187>
- Peão, F. V. (2023). *Estudo e implementação de metodologias Lean* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho].
- Hartini, S., Ciptomulyono, U., Anityasari, M., Sriyanto, & Pudjotomo, D. (2018). Sustainable-value stream mapping to evaluate sustainability performance: Case study in an Indonesian furniture company. *MATEC Web of Conferences*, *154*, 01055. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815401055>
- Rame, P., Purwanto, & Sudarno. (2023). Transforming the furniture industry in the digital age. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, *14*(Special Issue), 53–69. <https://doi.org/10.21771/jrtpi.2023.v14.si.p53-69>
- ISO 14044: International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO 14001: International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001: Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. Geneva, Switzerland: ISO.

Referências

- Marjaba, G. E., & Chidiac, S. E. (2016). Sustainability and resiliency metrics for buildings. *Building and Environment, 101*, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.002>
- Rocha, M. P. (2012). *Proposta de indicadores de sustentabilidade na gestão de resíduos de construção e demolição* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto].
- Ince, M. N., Tasdemir, C., & Gazo, R. (2023). Lean and sustainable supplier selection in the furniture industry. *Sustainability, 15*(15891).
- Yang, H. (2020). *A more sustainable way to treat school furniture*. Rochester Institute of Technology.
- Tanzil, D., & Beloff, B. R. (2006). Assessing impacts: Overview on sustainability indicators and metrics. *Environmental Quality Management*. <https://doi.org/10.1002/tqem>
- Mio, C., Costantini, A., & Panfilo, S. (2021). Performance measurement tools for sustainable business: A systematic literature review. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*.
- Çınar, H. (2005). An overview of the furniture design education and the furniture industry in Turkey. *Education and Science*.
- Kuys, J., Al Mahmud, A., & Kuys, B. (2021). A case study of university–industry collaboration for sustainable furniture design. *Sustainability, 13*(10915).
- Oliveira, L. A. (2011). *Dissertação e Tese em Ciências e Tecnologia segundo Bolonha*. Lisboa: Lidel.
- Reis, F. L. dos. (2010). *Como Elaborar uma Dissertação de Mestrado segundo Bolonha*. Lisboa: Pactor.
- Serrano, P. (2004). *Redacção e Apresentação de Trabalhos Científicos (2a ed.)*. Lisboa: Relógio D'Água Editores.
- Marina, D.; Pereira, L. (2022). *Template e regras na elaboração de dissertações MEGI*. Porto: ISEP.

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Miguel Sousa Ramalho

ISEP, Porto, 14 de setembro de 2025

Anexo A – Ficha Técnica do azoto