

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DO  
*CAMPUS* SOROCABA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUIZ ARTHUR PALUCH SOARES

**ACV COMPARATIVA ENTRE PROCESSOS DE FRESAMENTO DE  
ENGRENAGENS AUTOMOTIVAS COM LUBRIFICAÇÃO  
CONVENCIONAL E MQL**

Sorocaba

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DO  
*CAMPUS* SOROCABA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUIZ ARTHUR PALUCH SOARES

**ACV COMPARATIVA ENTRE PROCESSOS DE FRESAMENTO DE  
ENGRENAGENS AUTOMOTIVAS COM LUBRIFICAÇÃO  
CONVENCIONAL E MQL**

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do *campus* Sorocaba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dra. Virgínia Aparecida Silva Moris

Coorientação: Prof. Dra. Yovana María Barrera Saavedra

Sorocaba

2021

Soares, Luiz Arthur Paluch

ACV Comparativa entre Processos de Fresamento de Engrenagens Automotivas com Lubrificação Convencional e MQL / Luiz Arthur Paluch Soares -- 2021. 104f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Virgínia Aparecida da Silva Moris  
Banca Examinadora: José Augusto de Oliveira, Diogo Aparecido Lopes Silva  
Bibliografia

1. Fresamento de Engrenagens. 2. Avaliação do Ciclo de Vida. I. Soares, Luiz Arthur Paluch. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luiz Arthur Paluch Soares, realizada em 30/04/2021.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Virgínia Aparecida da Silva Moris (UFSCar)

Prof. Dr. José Augusto de Oliveira (UNESP)

Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Dedico este trabalho à minha esposa Gabriele e meus filhos, Enrico, Angelo e Leticia, que abriram mão de nosso convívio em vários momentos, para que eu pudesse me dedicar a esta pesquisa.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa, Gabriele Boldrini Soares, pelo seu apoio, interesse e perguntas, que fizeram esta longa jornada menos solitária.

Agradeço a minha mãe, Elenir Paluch Soares, pelo seu incentivo e conselhos nestes meus primeiros passos rumo à carreira acadêmica.

As professoras Virgínia Aparecida da Silva Moris e Yovana María Barrera Saavedra que me orientaram durante todo este projeto e, sem as quais, não seria possível completar esta caminhada. Agradeço pela atenção e paciência fundamentais para dar sentido e aperfeiçoar os detalhes deste trabalho.

Ao colega mestre egresso do PPGEP-So, Alessandro Firmino, que compartilhou seus conhecimentos e experiência acumulada em nosso grupo de pesquisa.

A empresa que disponibilizou os dados para que este trabalho pudesse ser realizado, em especial agradeço aos colegas que me auxiliaram na coleta de dados.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade de fazer parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Campus-Sorocaba (PPGEP-So).

Ao CNPq Projeto Universal processo 406017/2018-2, por fomentar a pesquisa no âmbito de Engenharia de Ciclo de Vida, apoiando projetos de pesquisa específicos em Avaliação do Ciclo de Vida de Processos de Manufatura.

A todos o meu mais sincero muito obrigado.

## RESUMO

SOARES, Luiz A. P. **ACV Comparativa Entre Processos de Fresamento de Engrenagens Automotivas com Lubrificação Convencional e MQL**. 104f. – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2021.

Dados de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), fundamentais para a realização de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), são disponibilizados globalmente, tanto, para produtos, quanto para processos. Contudo, há uma carência de dados de inventário para processos de manufatura, o qual este trabalho visa explorar por meio da condução de uma ACV comparativa entre processos de fresamento de engrenagens automotivas com emprego da lubri-refrigeração convencional e da tecnologia *Minimum Quantity Lubrication* (MQL). Previamente à ACV, a pesquisa bibliográfica e bibliométrica resultaram na identificação de 12 metodologias de ICV para processos de manufatura, com destaque para a metodologia *UPLCI*, a qual retrata processos elementares de manufatura. Tal metodologia foi empregada na condução de um estudo de caso de ICV de fresamento de engrenagens. Os resultados do ICV revelaram que, 76,5% da energia consumida durante o ciclo de fresamento de uma engrenagem, ocorreu no estado “em processamento” da máquina-ferramenta e o restante da energia foi consumida em estados não-produtivos. A introdução da tecnologia *MQL* reduziu o consumo de fluido de corte em 98,4%. Em seguida, foi realizada a ACV, explorando 4 cenários da operação de fresamento, onde se modificou o consumo de fluido de corte e energia elétrica. Os resultados da AICV apontaram que 4 de 11 categorias de impacto ambiental normalizadas somaram 80% do montante agregado de impactos: depleção de recursos fósseis (43%), mudanças climáticas (19%), acidificação terrestre (11%) e consumo de água (8%). O *hotspot* identificado no estudo de caso foi o fluxo de entrada de matéria-prima no sistema “Fresadora de Dentes”, associado à mais de 75% do montante total dos impactos ambientais potenciais. Uma vez que o fluxo de matéria-prima depende de mudanças no projeto das engrenagens, a análise de sensibilidade foi direcionada aos aspectos ambientais de consumo de energia e fluídos de corte, cujo ajuste dependia dos parâmetros de fresamento. A introdução do *MQL* proporcionou até 70,77% de redução nos impactos ambientais, enquanto as estratégias de redução do consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta totalizaram apenas 3,74%. Esta pesquisa contribuiu com a elaboração de ICV de processos de usinagem, e, revelou por meio da realização de ACV do processo de fresamento de engrenagens automotivas, a contribuição dos fluxos de matéria-prima, energia elétrica e lubrificantes na geração de impactos ambientais potenciais.

Palavras-chaves: ICV. MQL. UPLCI. fresamento de engrenagens.

## ABSTRACT

SOARES, Luiz A. P. **Comparative LCA of Automotive Gear Hobbing Processes with Flood Lubrication and MQL**. 104p. – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2021.

Life Cycle Inventory (LCI) data are fundamental for the Life Cycle Analysis (LCA) of products and processes. Nevertheless, there is a lack of inventory data for manufacturing processes, which this research work intends to exploit by means of carrying out a comparative LCA between automotive gear hobbing processes assisted by conventional and Minimum Quantity Lubrication (MQL). Prior to the LCA, bibliographic and bibliometric researches resulted in the identification of 12 methodologies for LCI of manufacturing processes, notably the methodology Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI). Such methodology was employed to conduct one case study for collecting LCI data on automotive gear hobbing process. The LCI results showed that, 76,5% of the energy consumed over the hobbing cycle of one gear, took place under the machine-tool state “Processing”, and the remaining consumed energy was associated to non-productive machine-tool states. The introduction of *MQL* reduced the cutting fluid consumption by 98,4%. Afterwards, a LCA was carried out for 4 gear hobbing operation scenarios, ranging the consumption parameters of cutting fluid and electric energy. The results of the LCIA pointed out four among eleven normalized environmental impact categories totalized more than 80% of the accumulated impacts: fossil depletion (43%), climate changes (19%), terrestrial acidification (11%) and freshwater consumption (8%). The identified hotspot in the case study was the input flow of raw material for the system “Hobbing Machine”, which is linked to more than 75% of the total amount of normalized potential environmental impacts. Once, any change on the raw material input flow depends on the automotive gear design, the sensitivity analysis was aimed at the environmental aspects of energy and cutting fluid consumption, whose setup depended directly on the parameters of the hobbing process. The introduction of MQL provided reduction of 70.77% on the total amount of normalized potential environmental impacts, while the strategies to reduce electric energy consumption by the machine tool accounted only for 3.74%. This research contributed to setting up new LCI of machining processes, and, revealed by means of a LCA of automotive gear hobbing process, the contribution of raw material, electric energy and lubricant flows to the generation of potential environmental impacts.

Keywords: LCI. MQL. UPLCI. gear hobbing.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Registros obtidos das combinações dos termos “LCA” e “Machining” .....   | 19 |
| Figura 2 - Vista esquemática da zona de corte e formação do cavaco .....  | 24 |
| Figura 3 - Comparativo entre tecnologias de lubri-refrigeração do corte em usinagem .....   | 26 |
| Figura 4 - Vista em corte de fresa com canal interno para mistura ar-óleo.....  | 27 |
| Figura 5 - Perfil do gume de corte de uma ferramenta para fresamento de dentes .....  | 30 |
| Figura 6 - Citações sobre metodologias de ICV.....  | 33 |
| Figura 7 - Publicações por país.....  | 34 |
| Figura 8 - Categorias de pesquisa detectadas nos artigos selecionados .....   | 35 |
| Figura 9 - Visão geral da metodologia <i>UPLCI</i> pelo modelo <i>CO2PE!</i> .....  | 44 |
| Figura 10 - Fronteiras do sistema de uma unidade de processo .....  | 46 |
| Figura 11 - Abordagem In-Depth .....  | 47 |
| Figura 12 - Estágios e fases de uma revisão sistemática .....   | 52 |
| Figura 13 - Seleção de artigos relevantes após emprego dos critérios de exclusão .....  | 55 |
| Figura 14 - Imagens da máquina-ferramenta e peça do estudo de caso .....  | 57 |
| Figura 15 - Diagrama esquemático da máquina fresamento de dentes .....  | 58 |
| Figura 16 - Correlação entre estados de operação e ativação das subunidades da fresadora ...  | 60 |
| Figura 17 - Fronteiras do sistema “Fresadora de Dentes” .....   | 61 |
| Figura 18 - Duração dos modos de uso no fresamento da engrenagem .....  | 67 |
| Figura 19 - Potência Ativa ao longo de um ciclo de fresamento da engrenagem de estudo ....  | 69 |
| Figura 20 – Impactos ambientais normalizados pelo método ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H).....  | 76 |
| Figura 21 – Análises de Contribuições de Fluxos de Entrada no Sistema “Fresadora de Dentes” – Cenário A.....  | 77 |
| Figura 22 – Análise de Contribuições de Fluxos de Entrada no Sistema “Fresadora de Dentes” – Cenário D.....   | 78 |
| Figura 23 – Impactos ambientais normalizados pelo método ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H), exceto matéria-prima.....  | 80 |
| Figura 24 - Contribuições de Fluxos de Entrada no Sistema “Fresadora de Dentes” – Cenário D, exceto matéria-prima .....   | 81 |
| Figura 25 – Efeito da redução do consumo de fluido de corte no fresamento de dentes sobre os Impactos Ambientais normalizados por ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H)..... | 83 |

Figura 26 – Efeito da redução do consumo de energia elétrica no fresamento de dentes sobre os Impactos Ambientais normalizados por ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H)..... 84

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Periódicos de publicação dos artigos selecionados .....   | 33 |
| Tabela 2 – Citações principais dos artigos pesquisados .....   | 34 |
| Tabela 3 - Métodos de AICV utilizados em ACV de processos de manufatura .....                                  | 49 |
| Tabela 4 - Consumo de Energia por Estado de Operação da Máquina-ferramenta .....                               | 70 |
| Tabela 5 - Energia consumida em kW.h no estado “ <i>Processing</i> ” para diferentes Parâmetros de Corte ..... | 70 |
| Tabela 6 - Consumo de Energia no Estado “em processamento” da máquina-ferramenta .....                         | 71 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Artigos sobre ACV em processos de usinagem .....   | 21 |
| Quadro 2 - Vantagens e desvantagens técnicas dos tipos convencionais de fluido de corte.....                  | 24 |
| Quadro 3 - Matriz comparativa entre 12 artigos proponentes de Metodologias de<br>Desenvolvimento de ICV ..... | 36 |
| Quadro 4 - Definição dos termos de busca e resultados em metodologias de ICV.....                             | 54 |
| Quadro 5 - Cenários desenvolvidos na AICV do processo de fresamento de dentes.....                            | 73 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |  |
|-------------|--|
| ABNT        | Associação Brasileira de Normas Técnicas                   |
| ACV         | Avaliação do Ciclo de Vida                                 |
| AICV        | Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida                      |
| ASCV        | Avaliação Social do Ciclo de Vida                          |
| CCV         | Custo do Ciclo de Vida                                     |
| CNC         | Comando Numérico Computadorizado                           |
| CO2PE!      | <i>Cooperative Effort on Process Emissions</i>             |
| DIN         | <i>Deutsches Institut für Normung</i>                      |
| DFM         | <i>Design for Manufacturing</i>                            |
| GCV         | Gestão do Ciclo de Vida                                    |
| IBICT       | Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia |
| IEA         | International Energy Agency                                |
| ICV         | Inventário do Ciclo de Vida                                |
| IES         | Institute for Environmental and Sustainability             |
| US LCI      | <i>Life Cycle Inventory Database of United States</i>      |
| ILCD        | International Reference <i>Life Cycle Data System</i>      |
| ISO         | <i>International Organization for Standardization</i>      |
| LCA         | <i>Life Cycle Assessment</i>                               |
| LCI         | <i>Life Cycle Inventory</i>                                |
| LCIA        | <i>Life Cycle Impact Analysis</i>                          |
| MQL         | <i>Minimum Quantity Lubrication</i>                        |
| NBR         | Norma Brasileira   |
| PNUMA       | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente            |
| SICV Brasil | Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida – Brasil    |
| UNEP        | <i>United Nations Environment Programme</i>                |
| UPLCI       | <i>Unit Process Life Cycle Inventory</i>                   |

## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>15</b>  |
| 1.1 Contextualização e justificativa .....                                   | 15         |
| 1.2 Objetivos.....   | 18         |
| 1.2.1 Objetivo geral .....   | 18         |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....  | 18         |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>19</b>  |
| 2.1 ACV em Processos de Usinagem .....                                       | 19         |
| 2.1.1 ACV em processo de usinagem com emprego de MQL .....                   | 23         |
| 2.1.2 ACV em processo de fresamento de engrenagens.....                      | 28         |
| 2.2 ICV em Processos de Manufatura .....                                     | 32         |
| 2.2.1 A Metodologia <i>Unit Process Lifecycle Inventory (UPLCI)</i> .....    | 43         |
| 2.2.2 Etapas da Metodologia UPLCI para geração de dados de inventário .....  | 45         |
| 2.3 AICV e Interpretação da ACV em Processos de Manufatura .....             | 48         |
| 2.4 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica.....                  | 50         |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>  | <b>51</b>  |
| 3.1 Revisão Sistemática de Literatura .....                                  | 51         |
| 3.2 Estudo de Caso .....   | 55         |
| 3.2.1 Materiais .....  | 56         |
| 3.2.2 Métodos .....  | 60         |
| 3.2.2.1 Unidade funcional, fluxo de referência e fronteiras do sistema ..... | 60         |
| 3.2.2.2 Considerações e Premissas sobre o ICV.....                           | 62         |
| 3.2.2.3 Considerações e Premissas sobre a AICV .....                         | 66         |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>   | <b>67</b>  |
| 4.1 ICV .....  | 67         |
| 4.1.1 Dados do estudo dos tempos de operação .....                           | 67         |
| 4.1.2 Dados do estudo de potência ativa empregada no fresamento .....        | 68         |
| 4.1.3 Dados do estudo de consumíveis.....                                    | 71         |
| 4.1.4 Dados do estudo de emissões .....                                      | 72         |
| 4.2 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação.....        | 72         |
| 4.2.1 Análise de Sensibilidade.....  | 73         |
| 4.3. Considerações finais sobre os resultados da ACV .....                   | 85         |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>  | <b>86</b>  |
| <b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                             | <b>88</b>  |
| <b>7. REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>89</b>  |
| <b>APÊNDICE A .....</b>  | <b>102</b> |
| <b>APÊNDICE B.....</b>   | <b>103</b> |
| <b>APÊNDICE C .....</b>  | <b>104</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização e justificativa

O setor industrial consome cerca de 29% do total de energia fornecida no planeta dentre os segmentos de usuários finais (IEA, 2020). Wegener *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2015) destacam que uma considerável parcela deste consumo energético se deve aos processos de usinagem na indústria de manufatura, os quais podem desencadear impactos ambientais como depleção de combustíveis fósseis e mudanças climáticas (CAMPOSECO-NEGRETE e CALDERÓN-NÁJERA, 2019). Além disso, o intenso emprego de fluídos de corte na usinagem pode gerar impactos ambientais como a toxicidade humana, que resulta em doenças ocupacionais, em um espectro que inclui desde irritações de pele até cânceres (PASHMFOROUGH e BAGHERINIA, 2018).

Assim, o estudo dos diversos aspectos ambientais associados à usinagem se mostra relevante na Gestão do Ciclo de Vida em ambientes industriais. Neste sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se tornou um instrumento reconhecido para avaliação de impactos ambientais, em conexão ao ciclo de vida completo de produtos, processos e atividades econômicas (SONNEMANN e MARGNI, 2015).

À respeito da fase de fabricação na ACV de um sistema de produto, Silva *et al.* (2016b) identificam, que dentre os tópicos publicados na área de Manufatura Sustentável, destacam-se propostas de metodologias para avaliação do consumo de energia; a prática da ACV em si, e, projetos dos processos de usinagem. Campitelli *et al.* (2019) esclarecem que os projetos de processos de usinagem podem empregar a técnica de Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL), cujos impactos ambientais decorrentes de seu uso são expressivamente menores que aqueles resultantes do uso de lubri-refrigeração convencional.

Embora a ACV encontre aplicação direta em estudos sobre usinagem na indústria, Arena *et al.* (2012) argumentam que a sua prática é dificultada, pois requer dados dos vários componentes constituintes do produto final montado, e da coleta sistemática e interpretação de fluxos de materiais e energia, em todas as atividades relevantes ao longo do ciclo de vida daquele produto. Os autores ainda destacam, como obstáculo à realização da ACV, a falta de dados de ICV, que conduz à definição de fronteiras incompletas, excluindo certos processos, e, por consequência, conduzindo à impactos ambientais subestimados.

Suh *et al.* (2016) esclarecem que banco de dados de ICV são valiosos recursos para condução de ACV, pois ajudam a reduzir o tempo e recursos necessários para tais avaliações, visto que permitem aos usuários realizar ACV inicial para identificação de *hotspots* antes da condução da ampla coleta de dados primários. Adicionalmente, os bancos de dados de ICV podem melhorar a comparabilidade entre estudos de ACV.

Contudo, há uma carência de dados de inventário de processos de usinagem. Silva *et al.* (2016b) explicam que os estudos de ACV estão mais concentrados em produtos, e não em processos de fabricação. Brundage *et al.* (2019) afirmam que a precisão dos dados de ICV é crítica para a qualidade da ACV, porém os dados de ICV são frequentemente insuficientes para os quesitos de tipos e variedades de processos de manufatura existentes. Gamage *et al.* (2015) observam que a falta de dados de ICV em processos de usinagem são mais evidentes para processos não convencionais, tais como: usinagem eletroquímica, por eletroerosão, feixe de laser ou elétrons, jato d'água e outros processos híbridos de usinagem.

A adaptação de dados existentes de ICV de uma região global para outra poderia ser uma solução alternativa para a escassez de dados, contudo Henriksen, Astrup e Damgaard (2017) alertam que a não-representatividade de dados de ICV pode ocorrer quando se seleciona uma tecnologia específica para representar uma combinação delas, ou, quando se emprega a média de dados regionais para se representar um local específico.

No Brasil, o desenvolvimento dos inventários de ciclo de vida é mais recente, se comparado principalmente às iniciativas europeias e norte-americanas. O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida – SICV Brasil foi publicado em 2016 (SOUZA *et al.*, 2018), e conta com apenas 22 inventários publicados (SICV, 2021). Todavia, nenhum desses inventários foi desenvolvido com foco nos processos de fabricação, mas sim, em sistemas agregados do tipo *black-box* ou agroflorestais.

Diante do panorama apresentado, as pesquisas em ICV criam valor para os principais atores envolvidos na viabilização da sustentabilidade em nossa sociedade – administração pública, academia e iniciativa privada, pois promovem o aumento da acurácia dos resultados de ACV. Aplicando esse argumento ao contexto brasileiro, as pesquisas em ICV contribuem para a criação de dados genuinamente nacionais, que capturem os aspectos reais da atividade econômica local, e, incentivem ainda mais estudos de ACV. A geração de dados de ICV do processo de manufatura pretendido com esta pesquisa pode vir a compor o banco de dados SICV Brasil, em conformidade com o Guia Qualidata (IBICT, 2017). Assim, esta pesquisa pode



colaborar diretamente para cobrir a lacuna de baixa disponibilidade de inventários para o Brasil e menos ainda, ao se referir ao caso dos processos elementares de manufatura.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é efetuar uma ACV comparativa entre os processos de fresamento de engrenagens automotivas com emprego da lubri-refrigeração convencional e da técnica MQL.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Revisar a literatura sobre metodologias de ICV para a escolha da melhor abordagem visando a condução de um estudo de caso de fresamento de engrenagens;
- Avaliar os impactos ambientais potenciais com e sem o emprego da técnica MQL decorrentes deste processo de usinagem;
- Propor melhorias no processo de fabricação e/ou uso da máquina-ferramenta a partir da análise de desempenho ambiental do processo estudado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

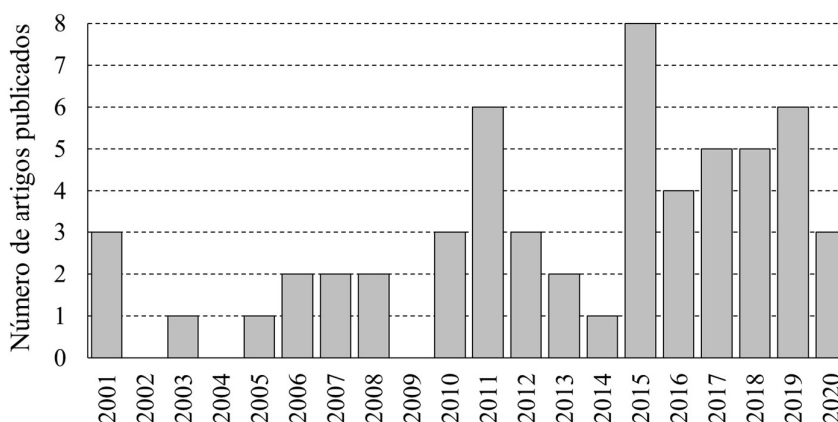
### 2.1 ACV em Processos de Usinagem

As organizações têm percebido que o emprego da ACV pode promover a criação de valor, se implementada como parte de sistemas de gestão. Baitz *et al.* (2014) destacam que organizações bem-sucedidas conseguem criar valor para o negócio: obtendo acesso à mercados com produtos qualificados e inovadores; reduzindo custos e aumentando a eficiência operacional; mitigando riscos operacionais e regulatórios, e, fortalecendo suas marcas pela construção de reputação no mercado e atração de talentos.

Nessa conjuntura, Sharma *et al.* (2020) e Bevilacqua *et al.* (2017) argumentam que a ACV é capaz de projetar os impactos ambientais relacionados aos níveis de consumo de energia e recursos em processos elementares de manufatura, e assim, mensurar o duplo benefício de iniciativas que aumentem a eficiência do processo, e, simultaneamente reduzam os impactos ambientais derivados destes processos.

Uma pesquisa na base de dados *Web of Science* auxiliou na compreensão mais ampla sobre a extensão das aplicações de ACV em processos de manufatura, especificamente em usinagem. A busca realizada por meio das palavras-chave “*lifecycle assessment*” ou seu acrônimo em inglês “*LCA*”, e, o termo “*machining*”, que significa usinagem, identificou 58 artigos, sendo o primeiro artigo datado no ano de 2001, e mais de 50% das publicações concentradas entre os anos 2015 e 2020 (Figura 1), sugerindo um interesse maior por este tema de pesquisa, na atualidade.

Figura 1 - Registros obtidos das combinações dos termos “LCA” e “Machining”



Fonte: Base de dados *Web of Science*

Tornar a economia sustentável têm sido objetivo de vários países, tanto que diversos deles vêm implementando medidas de precificação dos impactos ambientais, como uma maneira de promover atividades econômicas sustentáveis, à exemplo do significado atual da produtividade para a economia global. Awad e Hassan (2018) exemplificam tais medidas com a iniciativa do congresso dos Estados Unidos. O poder legislativo daquele país promoveu políticas para redução de emissões decorrentes do consumo de energia na produção industrial. Por meio destas políticas, companhias devem observar limites de emissões, pagar taxas por exceder tais limites, e, também comprar ou vender créditos de redução de emissões de carbono. Desta maneira, as companhias conseguem equacionar produtividade e mitigação de impactos ambientais em uma base comum, a monetária.

O consumo de energia elétrica durante a fase de uso das máquinas-ferramentas é, também, um dos aspectos ambientais mais relevantes quando se desenvolve estratégias de manufatura ambientalmente sustentáveis. Schipper (2011) reporta que as atividades de manufatura lideram o consumo de energia elétrica na indústria, totalizando 90%. Desta grande parcela, 84% pode ser associada à impactos ambientais por emissão de CO<sub>2</sub>.

Pusavec *et al.* (2010) argumentam, que nos processos de usinagem, economizar dinheiro e ter desempenho sustentável pode ser alcançado pela redução no consumo de energia. O autor destaca que: cerca de 10% da energia consumida na indústria é atribuída ao uso de ar comprimido; 50% corresponde aos acionamentos elétricos, e os 40% restantes é atribuído à aquecimento e iluminação. Segundo, Stehlík (2009), o custo da energia consumida em um período de 10 anos é aproximadamente 100 vezes maior que o custo inicial de aquisição da própria máquina-ferramenta.

O esforço de conversão dos impactos ambientais revelados pela ACV em bases monetárias é uma entre outras abordagens recentes de pesquisa de ACV em usinagem. A análise dos artigos científicos que compõem a Figura 1, publicados nos últimos cinco anos, entre janeiro de 2016 e junho de 2020, evidencia outras aplicações de ACV em usinagem.

O Quadro 1 sumariza um referencial teórico composto pelos 24 artigos, ao todo, publicados no intervalo de tempo acima mencionado. A maioria destes trabalhos de pesquisa lança mão de estudos de caso, por vezes, complementares à desenvolvimentos metodológicos e modelamento.

Quadro 1 - Artigos sobre ACV em processos de usinagem

| Nº | Título do Artigo   | Autores / Ano de publicação | Método de Pesquisa                            | Propósito   |
|----|--|-----------------------------|---|---|
| 1  | Sustainability in manufacturing processes: Finding the environmental impacts of friction stir processing of pure magnesium.  | Sharma et al. (2020)        | Estudo de caso                                | ACV do processo de solda por fricção para magnésio em implantes médicos.  |
| 2  | Evaluation of an environment-friendly turning process of Inconel 601 in dry conditions   | Vukelic et al. (2020)       | Estudo de caso                                | Otimização de níveis de qualidade da peça, durabilidade de ferramenta, produtividade do processo e redução de impactos ambientais em torneamento da liga de níquel-cromo (Inconel 601). |
| 3  | Machining characteristics based life cycle assessment in eco-benign turning of pure titanium alloy   | Gupta et al. (2020)         | Estudo de caso                                | Otimização de níveis de qualidade da peça, produtividade do processo e redução de impactos ambientais em torneamento em liga de titânio puro.   |
| 4  | Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades  | Torres-Carrillo (2020)      | Estudo de caso                                | ACV comparativa de dois processos de microfusão / fusão à laser e usinagem de precisão de lâminas de turbina de aeronaves.  |
| 5  | Understanding the sustainability potential of part consolidation design supported by additive manufacturing  | Yang et al. (2019)          | Estudo de caso                                | ACV comparativa de projeto de montagem convencional e consolidação de peças via manufatura aditiva.   |
| 6  | Emergy-based life-cycle assessment (Em-LCA) for sustainability assessment: a case study of laser additive manufacturing versus CNC machining                       | Jiang et al. (2019)         | Estudo de caso                                | ACV comparativa de fabricação de engrenagens por usinagem CNC e manufatura aditiva à laser.   |
| 7  | Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining processes using life cycle assessment methodology   | Campitelli et al. (2019)    | Estudo de caso                                | ACV comparativa de usinagem de alumínio, aço e ferro fundido utilizando lubrificação convencional e corte e MQL.  |
| 8  | A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit-part II: manufacturing processes   | Nordelof (2019)             | Modelamento                                   | Modelo de Inventário de Ciclo de Vida escalável para composição de massa e manufatura de um inversor de frequência para veículos elétricos.   |
| 9  | Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N-2 assisted turning of Ti-6Al-4V   | Mia et al. (2019)           | Estudo de caso                                | Otimização de níveis de qualidade da peça e otimização de parâmetros de processo de usinagem de liga de titânio com auxílio de refrigeração de corte por injeção de nitrogênio líquido. |
| 10 | Environmental impacts-based milling process planning using a life cycle assessment tool  | Zanuto et al. (2019)        | Estudo de caso                                | ACV do processo de fresamento plano considerando porte da máquina-ferramenta, ferramentas de corte e velocidades corte.   |
| 11 | Development of LCA Module Integrated with CAD for Eco-Assessment Of Machined Products  | Tao et al. (2018)           | Desenvolvimento metodológico e estudo de caso | Desenvolvimento de um módulo de LCA integrado à plataforma CAD para projetos de manufatura de produtos usinados.  |
| 12 | A life cycle assessment-based approach for evaluating the influence of total build height and batch size on the environmental performance of electron beam melting | Van Thao et al. (2018)      | Estudo de caso                                | ACV comparativa de componentes automotivos e biomédicos fabricados por manufatura aditiva à laser e usinagem mecânica.  |

| Nº | Título do Artigo  | Autores / Ano de publicação | Método de Pesquisa                            | Propósito  |
|----|---|-----------------------------|---|--|
| 13 | Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting   | Kamps et al. (2018)         | Modelamento e estudo de caso                  | Modelo integrado para avaliação de custos e ACV de engrenagens produzidas pelos processos manufatura aditiva à laser e usinagem.   |
| 14 | Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production   | Silva et al. (2018)         | Estudo de caso                                | ACV para o processo de produção, uso e descarte de válvulas de admissão de motores à combustão interna.  |
| 15 | Joint decisions of machining process parameters setting and lot-size determination with environmental and quality cost consideration  | Awad et al. (2018)          | Modelamento e estudo de caso                  | Modelo matemática para cálculo econômico de produção de peças torneadas, incluindo ACV para a precificação dos créditos de redução de emissão de carbono.  |
| 16 | Tuning Decision Support Tools for Environmentally Friendly Manufacturing Approach Selection   | Ingarao et al. (2017)       | Estudo de caso                                | ACV comparativa de componentes em alumínio fabricados por usinagem ou conformação mecânica.  |
| 17 | Evaluating Eco-Efficiency of 3D Printing in the Aeronautic Industry   | Mami et al. (2017)          | Desenvolvimento metodológico e estudo de caso | Método de decisão baseado em custos e ACV comparativa de componentes aeronáuticos fabricados por manufatura aditiva e usinagem convencional.   |
| 18 | Assessment of environmental performance of shaped tube electrolytic machining (STEM) and capillary drilling (CD) of superalloys   | Silva et al. (2017)         | Estudo de caso                                | ACV comparativa da fabricação de furos de lubrificação em lâminas de turbinas produzidos por furação capilar e usinagem eletrolítica.  |
| 19 | Productive and environmental performance indicators analysis by a combined LCA hybrid model and real-time manufacturing process monitoring: A grinding unit process application | Filleti et al. (2017)       | Desenvolvimento metodológico e estudo de caso | Otimização de níveis de qualidade da peça, durabilidade de ferramenta, e redução de impactos ambientais relacionados ao consumo de energia e emprego de fluidos de corte em processo de retificação de peças em aço.                                   |
| 20 | Process-oriented Life Cycle Assessment framework for environmentally conscious manufacturing  | Shin et al. (2017)          | Desenvolvimento metodológico e estudo de caso | Estrutura chamada ACV orientada à processo para avaliar a produtividade e manufatura ambientalmente eficiente em processo de torneamento.  |
| 21 | Method to assess the Environmental Profile of In-House Machining Processes  | Germani et al. (2016)       | Modelamento e estudo de caso                  | Desenvolvimento de modelo matemático com emprego de simulação 3D para se determinar consumo de energia elétrica em operações de usinagem de diversos processos e ACV para derminação dos impactos ambientais.  |
| 22 | Process level environmental performance of electrodischarge machining of aluminium (3003) and steel (AISI P20)  | Gamage et al. (2016)        | Estudo de caso                                | ACV do processo eletroerosão de matrizes e à fio de ligas de aço e alumínio em estudos de caso industriais, com recomendações de melhorias para o design da máquina-ferramenta e parâmetros de processos, a partir da análise dos impactos ambientais. |
| 23 | Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies  | Paris et al. (2016)         | Estudo de caso                                | ACV comparativa de turbinas aeronáuticas fabricadas por manufatura aditiva e usinagem, constituindo a ACV um fator adimensional na tomada de decisão acerca da estratégia de manufatura a ser adotada.   |
| 24 | A Methodology for Optimal Lightweight Design of Moulds and Dies - A Case Study  | Nie at al. (2016)           | Estudo de caso                                | ACV comparativa para o processo de design e fabricação de moldes de extrusão conforme métodos convencionais e técnicas de otimização morfológica.  |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir das bases de dados *Web of Science*

Dentre os temas desenvolvidos nestes artigos, têm destaque:

- o levantamento de *hotspots* ambientais decorrentes de diferentes aspectos ambientais presentes em variados processos de usinagem;
- a comparação entre desempenho ambiental de processos de usinagem alternativos para tomada de decisão acerca da estratégia de produção, especialmente das tecnologias de manufatura aditiva;
- a otimização de parâmetros de processo visando melhorias combinadas de produtividade, qualidade e desempenho ambiental, por meio da realização de experimentos;
- a integração da ACV de processos de manufatura em outros sistemas, métodos e ferramentas de desenvolvimento de produtos e processos tais como: CAD, modelamento matemático de consumo de energia e custeio de produção.

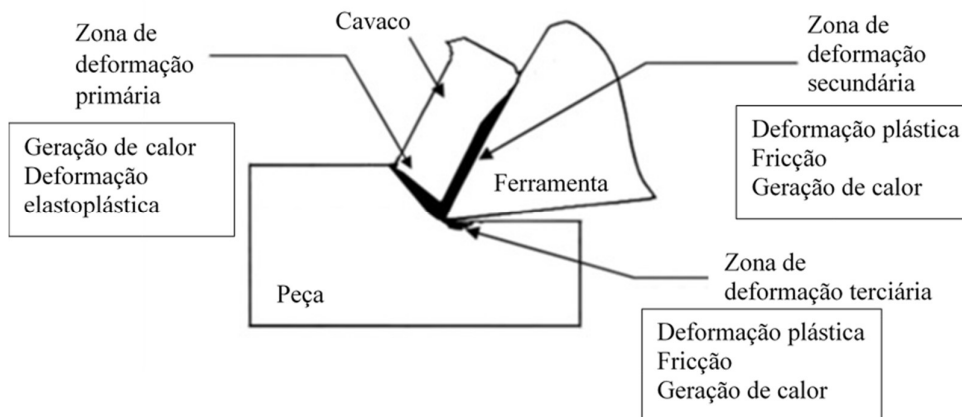
Campitelli *et al.* (2019) e Jiang *et al.* (2019) abordam, respectivamente, a técnica MQL e o fresamento de engrenagens no contexto da ACV, contudo, os estudos diferem da presente pesquisa nos aspectos de materiais e porte da engrenagens utilizadas. Deste modo, comparações diretas de impactos ambientais obtidos entre as pesquisas citadas não seria adequada.

A maioria dos trabalhos científicos apresentados neste referencial teórico aborda os aspectos ambientais de consumo de energia e emprego de fluídos de corte durante a usinagem, os quais são influenciados diretamente pelas tecnologias de fabricação adotadas. Neste sentido, as tecnologias de fresamento de dentes de engrenagens e lubri-refrigeração de corte são examinados nas seções seguintes deste trabalho, e correlacionadas com as pesquisas atuais em ACV.

### **2.1.1 ACV em processo de usinagem com emprego de MQL**

A usinagem se caracteriza pela remoção de material da peça, comumente denominado cavaco ou apra, que desliza na face da ferramenta de corte e se separa do material da peça, submetendo a ferramenta à elevadas tensões de compressão e cisalhamento (AGGARWAL *et al.*, 2008). A vista esquemática da Figura 2 ilustra uma operação típica de corte e os mecanismos de deformação de material e geração de calor, os quais causam desgaste das faces e arestas de corte da ferramenta, e, conseqüente dificuldades na usinagem (CHILDS *et al.*, 2000) e (AGGARWAL *et al.*, 2008).

Figura 2 - Vista esquemática da zona de corte e formação do cavaco



Fonte: Adaptado de Abukhshim (2006)

Como contramedida à dificuldade de usinagem, a indústria tem utilizado por décadas os fluídos de corte, pois estes insumos reduzem a fricção e a temperatura alcançadas no processo (NOUARI, 2003). Os fluídos de corte atuam na refrigeração, lubrificação e evacuação de cavacos das zonas de corte, sendo tradicionalmente aplicados em alto volume, inundando a zona de corte e adjacências por meio de um fluxo líquido contínuo. Dentre os fluídos de corte tradicionalmente empregados na indústria, Kuram *et al.* (2013a,b), destacam na Quadro 2 as principais vantagens e desvantagens técnicas de cada um dos tipos.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens técnicas dos tipos convencionais de fluído de corte

| Tipo de fluído de corte | Vantagens  | Desvantagens  |
|-------------------------|--|---|
| Óleos minerais          | Excelente lubricidade e controle da corrosão   | Baixa refrigeração, risco de incêndio, formação de névoa ou fumo, bom à baixas velocidade e altas potência de corte |
| Óleos solúveis          | Boa lubricidade e refrigeração   | Problemas de controle da corrosão, crescimento bacteriano, perdas por evaporação                                    |
| Óleos semissintéticos   | Boa refrigeração, controle de corrosão e microbiano  | Forma espuma facilmente, estabilidade sensível à dureza da água, contaminável por outros fluídos da máquina         |
| Óleos sintéticos        | Refrigeração ótima, controle microbiano e corrosão, não-inflamável, não formador de fumo, espuma e névoa | Baixa lubricidade e facilmente contaminável por outros fluídos da máquina   |

Fonte: Adaptado de Kuram *et al.* (2013a, b)



Contudo, há desvantagens adicionais associadas ao uso de fluídos de corte, tais como: custo, segurança e impacto ambiental (KLOCKE e EISENBLÄTTER, 1997; KURGIN *et al.*, 2012). Segundo Carou *et al.* (2015), estes inconvenientes encorajam a pesquisa no desenvolvimento de novos fluídos de corte como os biodegradáveis e novas alternativas para a refrigeração e lubrificação das operações de usinagem.

Há pouco mais de 20 anos, Klocke e Eisenblätter (1997) estimaram que os custos com lubrificantes estavam entre 5 e 16% do custo total de manufatura, ou seja, até quatro vezes mais que os 4% representados pelos custos com ferramentas. Esta parcela significativa de custos de produção resulta do somatório de custos que englobam a aquisição, a preparação, a manutenção e o descarte destes insumos ao fim de sua vida útil.

Outras desvantagens relevantes no emprego de fluídos de corte convencionais são os riscos ambientais, especialmente aqueles relacionados à saúde ocupacional. Shokrani *et al.* (2012) argumentam que os fluídos de corte requerem manutenção regular para o controle de suas características ótimas, pois constituem ótimo meio para o crescimento de bactérias e fungos, que, além de separar a emulsão e reduzir o poder lubrificante dos fluídos, aumentam o risco de corrosão da máquina-ferramenta e da peça por variações de pH.

Hong *et al.* (2000) ressaltam que as bactérias podem ser especialmente perigosas para os trabalhadores do chão de fábrica, e são combatidas pela adição de bactericidas, germicidas e outros aditivos químicos. Todavia, tais biocidas também são prejudiciais ao meio ambiente e saúde ocupacional. Alguns deles, inclusive, liberam formaldeídos, considerados cancerígenos para humanos pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC).

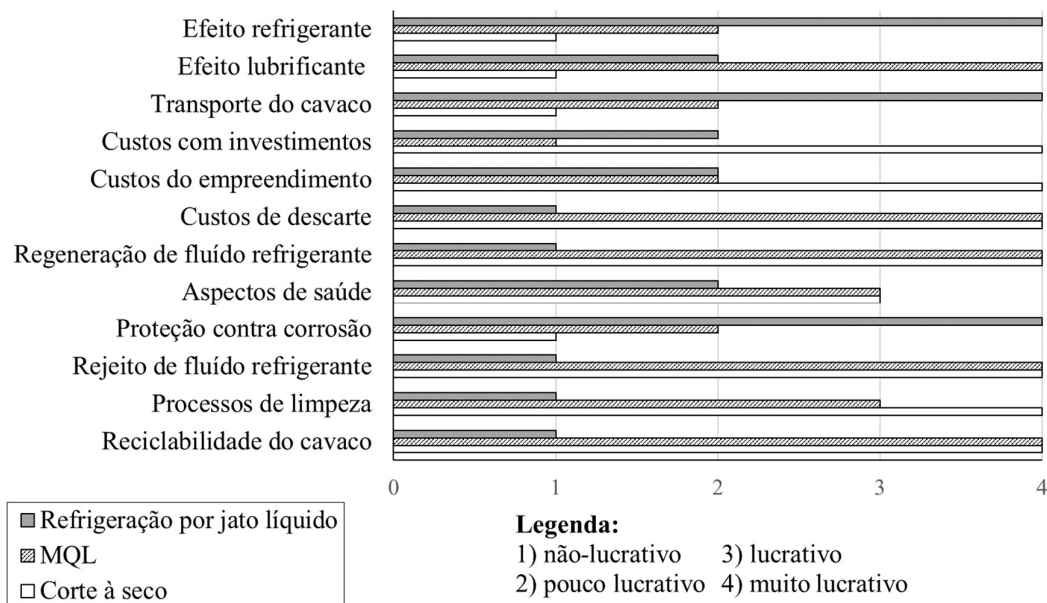
Shokrani *et al.* (2012) alertam, que partículas dos fluídos de corte dispersas no ar podem ser facilmente inaladas pelos operadores causando diferentes tipos de doenças pulmonares, desde asma à cânceres de pulmão, e outros órgãos, tais como, esôfago, estômago, pâncreas, próstata, colón e reto. Além disso, Shashidhara e Jayaram (2010) esclarecem, que 80% de todas as infecções ocupacionais sofridas por operadores de máquina se devem ao contato da pele com os fluídos de corte.

Uma resposta da indústria aos impactos ambientais derivados do uso de fluídos de corte convencionais é a redução de seu consumo e até a sua eliminação dos processos de usinagem. As tecnologias que exemplificam isto são: o corte à seco, a MQL e a usinagem com nitrogênio líquido (HAAPALA *et al.*, 2013). Segundo estes autores, cada opção deve ser considerada

dentro de um contexto de ciclo de vida total. A usinagem à seco, por exemplo, requer meios alternativos ao controle de corrosão, extração de cavacos, controle da poeira metálica, e controle do desgaste da ferramenta e aquecimento, devido à falta de fluidos refrigerantes. Em contrapartida, as estratégias de uso do MQL são desafiadoras quanto ao desempenho de refrigeração, enquanto as técnicas com nitrogênio líquido são desafiadoras para o aspecto de desempenho em lubrificação.

Grzesik (2008) realizou uma comparação entre as tecnologias de lubrificação e refrigeração do corte em usinagem: abordagem convencional por jato líquido de fluido de corte, corte à seco e MQL. A Figura 3 mostra o desempenho destas tecnologias sob aspectos de reciclabilidade dos cavacos, processo de limpeza, resíduos do fluido de corte, proteção contra a corrosão, aspectos de saúde ocupacional, regeneração do fluido de corte, custos de descarte, custos de operação, investimentos na implantação, transporte de cavacos, efeito lubrificante e refrigerante. Na maioria dos aspectos analisados, o corte à seco e o MQL tem melhor desempenho que a lubrificação e refrigeração convencionais.

Figura 3 - Comparativo entre tecnologias de lubri-refrigeração do corte em usinagem



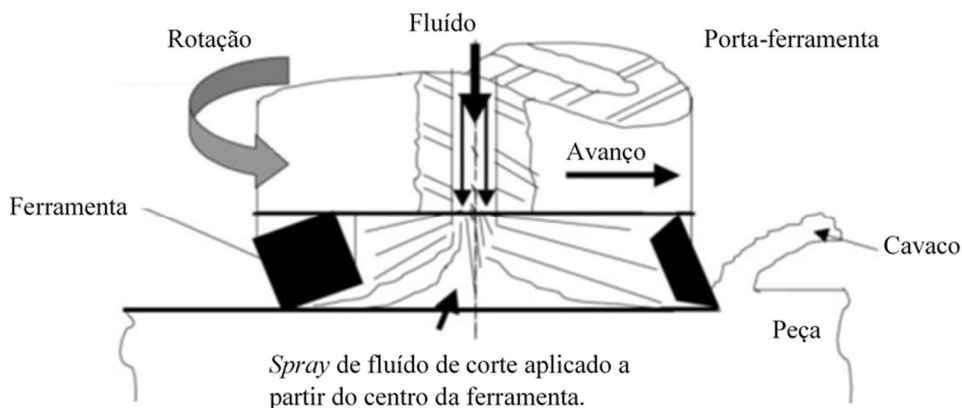
Fonte: Adaptado de Grzesik, 2008

À despeito dos desenvolvimentos tecnológicos produzidos nas duas últimas décadas, a usinagem à seco não é adequada para todos os processos de usinagem e materiais empregados

pela indústria (GOINDI e SARKAR, 2017), pois tende a acelerar o desgaste das ferramentas de corte, e, conseqüentemente, resultar em baixa qualidade superficial das peças produzidas. Weinert *et al.* (2004) destacam também, que o emprego de MQL é recomendado para se evitar fadiga térmica de peça e ferramenta, bem como o empastamento de cavaco nas superfícies da peça e da ferramenta.

A tecnologia MQL se refere à aplicação de pequenas quantidades de fluídos de corte, entre 10 e 100 ml por hora, misturadas com ar comprimido, na forma de aerossol, diretamente na zona de corte (SHARMA *et al.*, 2009). A Figura 4 ilustra este mecanismo em um exemplo de usinagem por fresamento plano. Embora, o MQL ainda empregue os fluídos de corte tradicionais, o consumo de fluído de corte é reduzido drasticamente, na ordem de 10.000 vezes menor comparado ao volume usado nos métodos de refrigeração e lubrificação convencionais (WEINERT *et al.*, 2004; SHARMA *et al.*, 2009).

Figura 4 - Vista em corte de fresa com canal interno para mistura ar-óleo



Fonte: Adaptado de Sales *et al.* (2009)

Por conta da pequena quantidade de óleo empregada, Benes (2007) afirma, que a operação de usinagem produz cavacos quase secos, prontos para a reciclagem, eliminando, assim, a necessidade de operações posteriores de separação do fluído de corte, outrora impregnado nos cavacos.

Clarens *et al.* (2008) apresentam ACV comparativa para a usinagem de materiais metálicos em máquinas-ferramenta, considerando quatro diferentes tecnologias de lubrificação e refrigeração: por jato líquido, em base aquosa com óleo mineral e vegetal; MQL e óleo vegetal dissolvido em CO<sub>2</sub>. Neste estudo se concluiu, que o fornecimento do fluído de corte na zona de

contato entre peça e ferramenta, pela técnica MQL ao invés de jato líquido, pode reduzir a geração de resíduos sólidos em 60%, o consumo de água em 90%, a toxicidade aquática em 80%, além de mitigar em grande parte os riscos à saúde ocupacional, devido à ausência de bactérias, surfactantes, biocidas e antiespumantes, presentes nas soluções aquosas.

Campitelli *et al.* (2019) realizaram uma ACV “*Gate-to-Gate*” dos processos de furação e fresamento plano para ligas de alumínio, aço e ferro fundido, sob lubrificação convencional por jatos líquido e MQL, com o intuito de determinar a estratégia de lubrificação mais eficiente do ponto de vista de uso de recursos. Dentre as 14 categorias de impacto incluídas no estudo, os autores concluíram que o emprego do MQL é amplamente favorável em comparação à lubrificação tradicional, pelo potencial de redução apresentado nos impactos ambientais avaliados: mudança climática (44%), depleção de recursos abióticos (31,5%) e uso do solo (70,3%). Somente em situações específicas, como fresamento de ligas de ferro fundido e furação de alumínio, os impactos são equivalentes aos causados pelo emprego da lubrificação tradicional. Em média, os impactos ambientais associados ao consumo de fluídos de corte e outros lubrificantes são de 27%, enquanto a maior parcela dos impactos, em torno de 70%, se deve ao consumo de energia elétrica e ar comprimido.

Por fim, o estudo indicou que a lubrificação tradicional por jato líquido contínuo ocasiona maior grau de impacto ambiental, comparado aos efeitos causados pela técnica MQL. Isto se deve ao elevado consumo de fluído de corte e de energia requerida para o bombeamento do mesmo de maneira contínua, durante a operação de usinagem.

### **2.1.2 ACV em processo de fresamento de engrenagens**

O processo de fresamento de engrenagens com ferramenta de corte do tipo fresa-caracol ou *gear hobbing*, em inglês, é o mais utilizado para usinagem de todos os tipos de engrenagens, especialmente aquelas de dentes retos e helicoidais, por ser mais barato e preciso que outros métodos de usinagem (BLACK e KOHSER, 2019).

Entretanto, Tapoglou *et al.* (2014) explicam que o processo de fresamento de dentes, ao contrário de torneamento e fresamento plano, é uma tecnologia sofisticada de usinagem, por conta da geometria complexa da fresa-caracol, cinemática avançada do processo e mecanismo de formação de cavacos diferenciados, de forma que até simulações com softwares de elementos finitos são tarefas difíceis. Estes autores reportam que diversos métodos analítico-

experimentais têm sido formulados a fim de se calcular as forças de corte desenvolvidas durante o processo, assim como estimativas do progresso de desgaste das ferramentas.

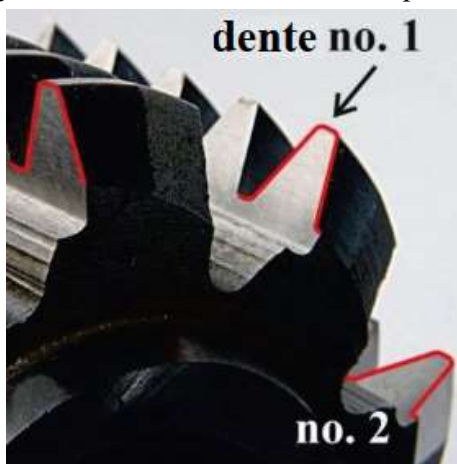
Xiao *et al.* (2019) propõem uma formulação empírica para o cálculo analítico do esforço de corte em fresamento de dentes de engrenagem, o qual emprega doze variáveis, sendo 5 coeficientes do esforço de corte obtidos por meio da realização de experimentos ortogonais, e, 7 variáveis associadas às características geométricas de peça e ferramenta, e, parâmetros de corte, tais como velocidade angular da ferramenta e mesa, avanço axial da ferramenta.

Brecher *et al.* (2015) argumentam que os projetos de processos de fresamento de engrenagens dependem de parâmetros como a coloração e a espessura máxima do cavaco, cuja determinação pelo método empírico de Hoffmeister (1970) é reconhecido nos meios industriais e acadêmicos.

Ao contrário de processos convencionais de usinagem, tais como, furação, torneamento e fresamento plano, Stachurski e Kruszyński (2020) afirmam que o impacto da tecnologia de MQL sobre o processo de fresamento de denteado ainda não foi investigado de forma ampla. Destacam ainda que, diferentemente de outros processos de usinagem, o sobremetal para usinagem é removido simultaneamente por vários dentes da ferramenta de corte (Figura 5), cada qual extraindo diferentes volumes de material da peça. Isto resulta em desgaste não-uniforme dos gumes de corte da ferramenta (BOUZAKIS *et al.*, 2008).

Investigações prévias conduzidas por Stachurski e Słupik (1997) provaram, que a velocidade de corte tem a maior influência sobre o desgaste da ferramenta, entre outros parâmetros de corte pertencentes ao fresamento de dentes. A razão é que a velocidade de corte influencia significativamente as temperaturas desenvolvidas na zona de corte, que, por sua vez, influenciam desfavoravelmente o desgaste da ferramenta (AZIZPOUR e MAJD, 2010).

Figura 5 - Perfil do gume de corte de uma ferramenta para fresamento de dentes



Fonte: Adaptado Stachurski e Kruszyński (2020)

Stachurski e Kruszyński (2020) testaram quatro velocidades de corte: 33,4; 44,2; 54,0 e 69,9 metros por minuto para ferramentas de aço rápido, e, concluíram, que o aumento gradual da velocidade de corte gera um aumento proporcional do nível de desgaste da ferramenta. Para velocidades de corte de até 54 m/min, a lubrificação na zona de corte por meio da tecnologia MQL é apropriada, pois não houve constatação de aumento excessivo no desgaste da ferramenta.

Baseando-se nos resultados do experimento supracitado, os pesquisadores afirmam, que o suprimento de fluido de corte segundo a tecnologia MQL, assegura, dentro de certa faixa de velocidades de corte, uma lubrificação suficiente durante toda a vida útil da ferramenta. Em razão disto, o MQL pode ser considerado uma alternativa viável para o fresamento de dentes de engrenagens, segundo a perspectiva de processo de manufatura sustentável.

De acordo com dados divulgados pela Organização Internacional de Fabricantes de Veículos Automotores (OICA), foram fabricados em torno de 92 milhões de veículos automotores no planeta em 2019 (OICA, 2019). Uma vez que cada um deles é equipado com um sistema de transmissão com mais de uma dezena de engrenagens, é razoável estimar que a cada ano se produz mais de um bilhão de engrenagens por meio de fresamento com fresa-caracol. Neste contexto, a compreensão dos impactos ambientais associados ao processo de fresamento de engrenagens se mostra um tema promissor para pesquisas.

Uma busca na base de dados *Web of Science* direcionada aos temas ACV e fresamento de engrenagens, empregando os termos combinados “LCA” e “*gear hobbing*” ou “*gear milling*”

ou “*gear manufacturing*”, resultou na seleção de apenas três artigos publicados nos anos de 2010, 2018 e 2019.

Fratila (2010) apresentou um estudo comparativo de fresamento de engrenagens em liga de aço 16MnCr5 efetuadas lubrificação e refrigeração de corte por tecnologia MQL e convencional – jato líquido de fluido de corte. O autor constatou que o nível de energia requerido na usinagem é 45% menor que a energia total consumida pela máquina-ferramenta, e, que o fresamento assistido pela tecnologia MQL consumiu aproximadamente 9% menos que aquele por lubrificação e refrigeração convencional, devido ao uso constante de bomba para manutenção do fluxo líquido de fluido de corte.

Em termos de mensuração de impactos ambientais, foi empregado o método Eco-indicator99, cujos resultados foram agrupados em três categorias: saúde humana, qualidade do ecossistema e consumo de recursos. Os resultados agregados destas categorias mostraram que o emprego da tecnologia MQL proporcionou redução de 8% nos impactos ambientais comparativamente ao uso da lubrificação e refrigeração convencionais.

Zeng *et al.* (2018) propõem uma metodologia baseada em ACV para tomada de decisões em projetos de máquinas-ferramenta sob enfoque do *Ecodesign*, visando a redução do consumo de energia ao longo da fase de uso deste equipamento. Os autores justificam que o estudo é relevante pelo fato de as máquinas-ferramentas consumirem 75% do total de energia elétrica demandada por atividades em manufatura industrial, que, por sua vez, responde por cerca de um terço do consumo global de energia elétrica e mais de 20% das decorrentes emissões globais de CO<sub>2</sub>.

No desenvolvimento do estudo de caso com uma máquina fresadora de dentes, os autores concluíram, em estudo de ICV da máquina, que a percentagem do tempo de uso da máquina nos estado de processamento, de prontidão, e, estado de vigília – *Standby*, respectivamente, correspondiam à: 76%, 15% e 9%. Tais distribuições de utilização, forneceram os dados para a realização da ACV, por meio da qual se detalhou a pegada de carbono da máquina, quantificando cada fase do ciclo de vida na escala absoluta em “toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente”, e, em bases percentuais: consumo de energia elétrica na fase de uso (84%); consumo de insumos e ferramentas na fase de uso (10%); fase de extração de materiais (6%); fase de fabricação da máquina (3%); fase de transporte (1%) e fase de reciclagem (6%). O estudo demonstrou que os aspectos ambientais de consumo de energia elétrica e insumos de produção são os mais relevantes no ciclo de vida de máquinas-ferramenta, embora os

percentuais possam variar em função da tecnologia construtiva adotada para cada tipo e modelo de máquina.

No terceiro artigo selecionado, Jiang *et al.* (2019) comparam por meio de ACV o desempenho ambiental do processo de fabricação de pequenas engrenagens de 9.81g, em liga de aço DIN 42CrMo4, por meio de fresamento CNC e da tecnologia de manufatura aditiva LENS (*Laser Engineered Net Shaping*), onde a peça metálica é fabricada gradualmente em camadas, por meio da fusão de pó metálico e ação de feixe de raios *laser* de alta potência. Os autores utilizaram uma escala cumulativa de energia consumida ao longo de todo o ciclo de manufatura das engrenagens, e concluíram que o processo LENS apresenta um desempenho ambiental muito melhor que o fresamento CNC, pois consome menos energia e insumos. Todavia, os autores não investigam o aspecto importante de escalabilidade do processo.

Os aspectos ambientais potenciais decorrentes do consumo de energia e insumos em processos de usinagem são retratados na etapa de ICV, cuja estrutura e elementos são dispostos na norma ISO 14040:2009 (ISO, 2009a). Além da normatização do ICV, pesquisadores desenvolveram ao longo das duas últimas décadas diversas metodologias para aplicação do ICV em manufatura, as quais são detalhadas na próxima seção.

## 2.2 ICV em Processos de Manufatura

Kellens *et al.* (2012a,b) mencionam a existência de uma grande quantidade de dados de inventário disponíveis em diversos bancos de dados globais, mas também enfatizam que os processos de usinagem acumulam menos registros que os dados de inventários de materiais. Além disso, os dados de inventário de processos de usinagem existentes se referem, geralmente, à processos convencionais, tais como torneamento, furação e fresamento plano.

A operacionalização de novos inventários de processos de manufatura depende diretamente das metodologias de ICV adotadas pelas organizações ao longo dos anos. Uma vez que este trabalho de pesquisa também compreende um estudo de caso de ACV de fresamento de engrenagens, foi conduzida uma revisão sistemática de literatura complementada com uma pesquisa bibliométrica com o propósito de se construir um referencial teórico das metodologias mais empregadas na atualidade para obtenção de ICV em processos de usinagem.

A metodologia de revisão sistemática de literatura, que é detalhada no capítulo de “Métodos” deste trabalho, partiu de 249 artigos científicos relacionando os termos ICV, manufatura e metodologia, e resultou na seleção final de 33 artigos. Tal seleção foi publicada



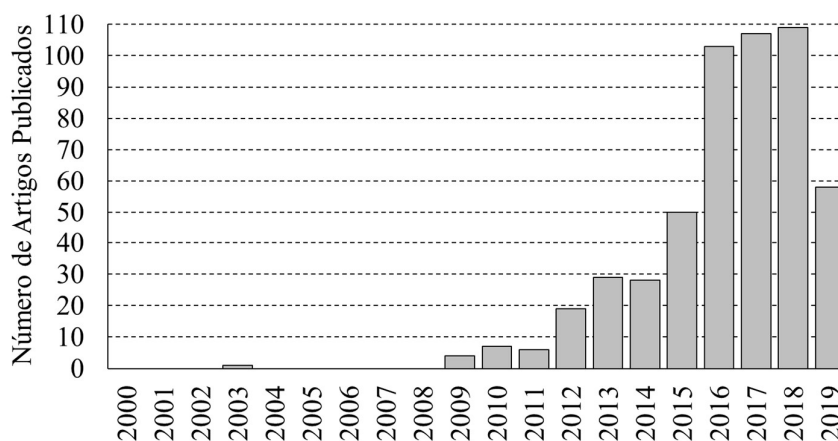
em 12 periódicos científicos revisados por pares (Tabela 1). Observou-se também que as citações sobre Metodologias de ICV de Processos de Manufatura cresceram significativamente nos últimos 5 anos (Figura 6), e, que os países europeus juntos contam com mais de 50% das publicações, enquanto, por país, os Estados Unidos contam por mais de 30% dos artigos publicados (Figura 7). Isto mostra que os estudos correlacionados estão fortemente concentrados na Europa e América do Norte, que são regiões cuja difusão da ACV ocorre há mais tempo.

Tabela 1 - Periódicos de publicação dos artigos selecionados

| Periódico Científico   | Frequência |
|--|------------|
| International Journal of Life Cycle Assessment   | 11         |
| Journal of Cleaner Production  | 8          |
| Production Engineering-Research and Development  | 2          |
| Journal of Industrial Ecology  | 2          |
| Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME              | 2          |
| Nordic Laser Materials Processing Conference   | 1          |
| International Journal of Advanced manufacturing Technology                             | 1          |
| Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference | 1          |
| Chemical Engineering Transactions  | 1          |
| CIRP Conference on Life Cycle Engineering  | 1          |
| Rapid Prototyping Journal  | 1          |
| Virtual and Physical Prototyping   | 1          |
| Proceedings of CIRP Conference in Manufacturing Systems                                | 1          |

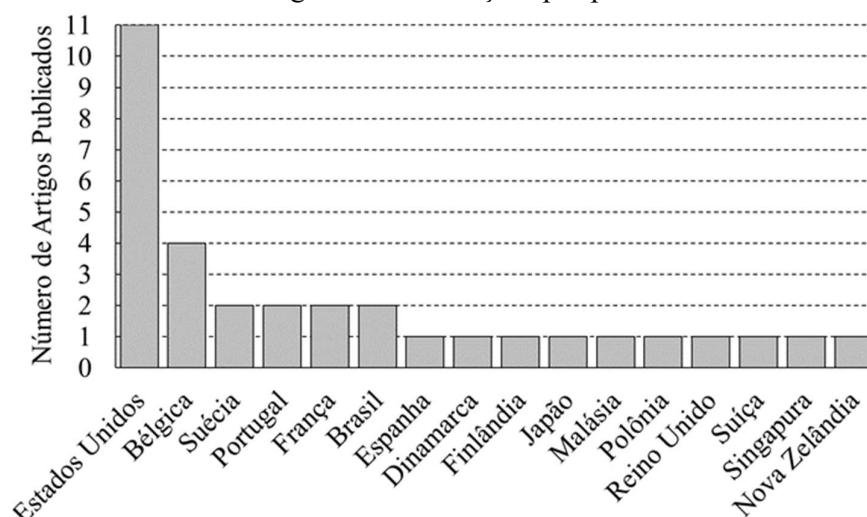
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 - Citações sobre metodologias de ICV



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das bases de dados *Web of Science* e *Scopus*

Figura 7 - Publicações por país



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma análise bibliométrica foi efetuada sobre uma base de 424 artigos não repetidos, citados a partir dos 33 artigos selecionados anteriormente. O resultado do arranjo de clusters revela que os 10 artigos mais citados (2.37%) representam 19% das 2.670 citações, quando se refere a metodologias de ICV para processo de manufatura. Portanto, aquela amostra representa a fonte principal para o desenvolvimento de novas pesquisas neste segmento de conhecimento particular. A Tabela 2 lista tais artigos, seus autores e a quantidade de citações.

Tabela 2 – Citações principais dos artigos pesquisados

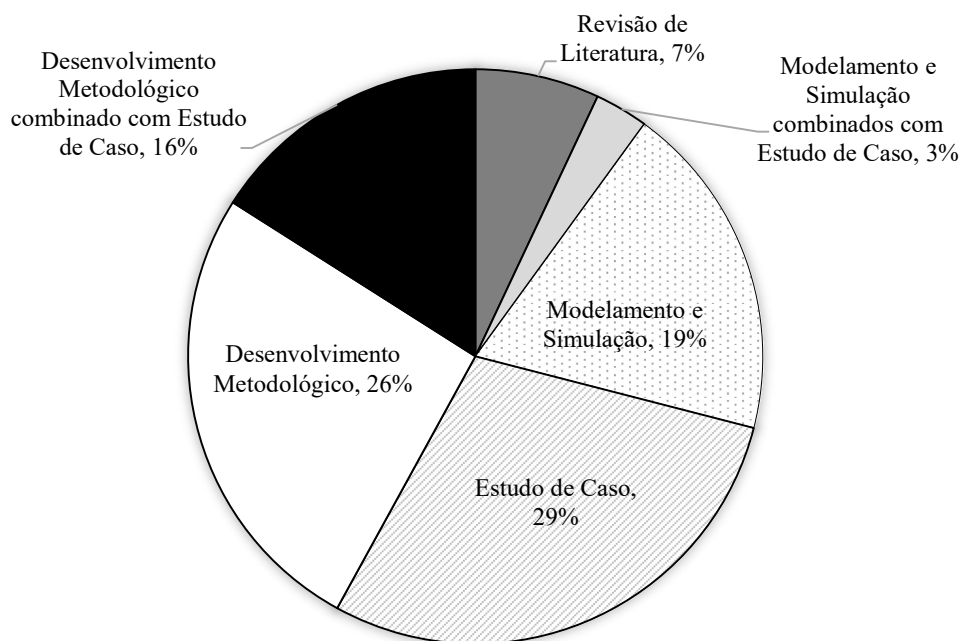
| Título do Artigo   | Autor e Ano de Publicação | Citações |
|--|---------------------------|----------|
| Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description | Kellens K.<br>2012        | 113      |
| Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies            | Kellens K.<br>2012        | 65       |
| Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach  | Duflou J.R.<br>2012       | 61       |
| Review of life cycle assessment towards sustainable product development  | Chang D.N.<br>2014        | 56       |
| ISO 14040:2009   | ISO                       | 44       |
| ISO 14044:2009   | ISO                       | 40       |
| Unit process energy consumption models for material removal processes  | Kara S.<br>2011           | 36       |
| Recent developments in Life Cycle Assessment   | Finnveden G.<br>2009      | 33       |
| A Review of Engineering Research in Sustainable Manufacturing  | Haapala K.R.<br>2013      | 30       |
| Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing   | Morrow W.R.<br>2007       | 30       |

Fonte: Elaborado pelo autor

Os 33 artigos se distribuem em 6 categorias de pesquisa, sendo Estudo de Caso (29%) e Desenvolvimento Metodológico (26%), as de maior percentagem individual (Figura 8). Ao todo, 12 artigos apresentam algum desenvolvimento metodológico para o ICV de diversos processos de manufatura, como furação de aço, usinagem com CNC, fundição de aço e manufatura aditiva de aços e polímeros convencional ou por laser.

O Quadro 3 apresenta um referencial teórico das Metodologias de ICV desenvolvidas nos doze artigos, e classificados por: título, autores, ano de publicação, categoria, propósitos, etapas metodológicas, fonte de dados, tipos de dados de entrada e saída e metodologia de referência.

Figura 8 - Categorias de pesquisa detectadas nos artigos selecionados



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 3 - Matriz comparativa entre 12 artigos proponentes de Metodologias de Desenvolvimento de ICV

| # | Título do Artigo   |            | Categoria   | Etapas metodológicas   | Dados de entrada (I) e saída (O)  |
|---|--|------------|---|--|---|
|   | Autores  | Publicação | Metodologia de Referência                                 | Propósitos do Artigo   |   |
| 1 | Additive manufacturing processes from an environmental point of view: a new methodology for combining technical, economic, and environmental predictive models |            | Desenvolvimento metodológico                              | 1. definição de fronteiras incluindo pré-processo e pós-processo; 2. coleta de dados (preparação de arquivos CAD, aquecimento, impressão, remoção de suportes); 3. criação de modelos para entradas de processos, dados técnicos e econômicos; 4. apresentação dos resultados.   | Entradas; matéria-prima; energia elétrica; água; ar comprimido. Saídas: emissões ao ar; peça usinada; cavacos; fluido de corte contaminado; |
|   | Yosofi, M.; Kerbrat, O.; Mognol, P.  | 2019       | (UPLCI)-CO2PE!  | Modelos matemáticos preditivos para avaliação conjunta de dados de inventário de processo, técnicos e econômicos.  |   |
| 2 | Toward Standards-Based Generation of Reusable Life Cycle Inventory Data Models for Manufacturing Processes   |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. identificar o processo unitário de manufatura (UPM), indicadores-chave do processo e funções de transformação conforme ASTM E3012-16; 2. obter a definição de UPM no formato de arquivo ASTM 3012 <i>xml</i> ; 3. Mapear o UPM no formato <i>Ecospold2</i> ; 4. ICV com arquivo intermediário no formato <i>EcoSpold2</i> ; 5. Realizar AICV. | Dados de entrada de materiais, recursos de manufatura e energia comuns para o formato UPM (ASTM E3012-16) e ISSO 14040:2009.                |
|   | Brundage, M. P.; Lechevalier, D.; Morris, K. C.  | 2019       | ISO 14040:2009; ASTM E3012-16.                            | Elaboração de dados de ICV a partir de dados de processo existentes em modelos formatados conforme norma ASTM E3012-16.  |   |
| 3 | Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes   |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. decomposição do processo de manufatura aditiva; 2. medições do consumo de energia elétrica; 3. cálculo da quantidade de material necessário; 4. processamento dos dados; 5. modelamento preditivo de inventário; 6. comparação entre dados de inventário medidos e calculados.  | Entradas: matéria-prima da peça e estrutura; energia elétrica; Saídas: material auxiliar.   |
|   | Yosofi, M.; Kerbrat, O.; Mognol, P.  | 2018       | UPLCI - CO2PE!  | Concepção de modelos de predição dependentes da geometria da peça, com o propósito de gerar dados de ICV de manufatura aditiva. Esta abordagem inclui a comparação entre medições realizadas no processo real e via cálculos.  |   |

| # | Título do Artigo   |            | Categoria   | Etapas metodológicas  | Dados de entrada (I) e saída (O)  |
|---|--|------------|---|---|---|
|   | Autores  | Publicação | Metodologia de Referência                                 | Propósitos do Artigo  |   |
| 4 | Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy                 |            | Desenvolvimento metodológico                              | 1. ICV de sucata de aço; 2. ICV de produtos novos de aço baseados em alocação de sucata de aço.   | Entradas: sucata de aço   |
|   | Broadbent, C.  | 2016       | Somente as normas ISO 14040/44:2009                       | Método de alocação para reuso e reciclagem de sucata de aço desenvolvido para aplicação em forno à arco elétrico e forno básico à oxigênio, emprega dados secundários e visa mostrar a contribuição da reciclagem para se diminuir a produção proporcional de aço primário. |   |
| 5 | Overview of sustainability studies of CNC machining and LAM of stainless steel                                     |            | Desenvolvimento metodológico                              | 1. estabelecer premissas para a cadeia de fornecimento do processo de manufatura à laser e usinagem CNC; 2. conduzir ICV baseada na metodologia escolhida.  | Entradas e saídas conforme (UPLCI)-CO2PE!   |
|   | Nyamekye, P.; Leino, M.; Piili, H.; Salminen, A.   | 2015       | Abordagem <i>In-depth</i> (UPLCI)-CO2PE!                  | ICV elaboradas a partir de dados primários e/ou secundários, retratando uma cadeia de suprimentos nas quais os processo de manufatura à laser e usinagem CNC estão inseridas.   |   |
| 6 | A unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. definição de meta e escopo da avaliação; 2. seleção e quantificar métricas; 3. definição de processo unitário chave de manufatura; 4. construção de modelos matemáticos; 5. aplicação de modelos e métricas agregadas; 6. análise e comparação resultados da avaliação.  | Entradas; matéria-prima; energia elétrica; água. Saídas: emissões; peça usinada; rejeitos para aterros. |
|   | Eastwood, M. D.; Haapala, K. R.  | 2015       | Abordagem <i>In-depth</i> (UPLCI)-CO2PE!                  | Desenvolvida para aumentar a precisão na identificação de impactos ambientais e auxiliar as tomadas de decisão nos processos de manufatura.   |   |

| # | Título do Artigo  |            | Categoria   | Etapas metodológicas   | Dados de entrada (I) e saída (O)  |
|---|---|------------|---|--|---|
|   | Autores   | Publicação | Metodologia de Referência                                 | Propósitos do Artigo   |   |
| 7 | A specific method for the life cycle inventory of machine tools and its demonstration with two manufacturing case studies |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. descrição da máquina-ferramenta e ciclo de operação; 2. definição do cenário de uso da máquina e estados de operação; 3. monitoramento e medição dos fluxos de energia, materiais e substâncias; 4. cálculo do fluxo de consumo de recursos e resíduos.   | Entradas; matéria-prima; energia elétrica; ferramentas e fluídos de corte; ar comprimido. Saídas: emissões ao ar; peça usinada; cavacos; fluído de corte contaminado; fragmentos de ferramentas.                  |
|   | Zendoia, J.; Woy, U.; Ridgway, N.; Pajula, T.; Unamuno, G.; Olaizola, A.; Fysikopoulos, A.; Krain, R.                     | 2014       | ISO/DIS 14955-1: 2014; UPLCI.                             | Metodologia identifica os ciclos produtivos de máquinas-ferramentas e seus estados de operação, e, em seguida, efetua as medições de consumo de energia, materiais e emissões.   |   |
| 8 | Dynamic System for Life Cycle Inventory and Impact Assessment of Manufacturing Processes                                  |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. ICV; 2. transferência de dados por meio do protocolo MTConnect; 3. Agente de software armazena e compartilha arquivos *.xml com um aplicativo cliente, que os transfere a um servidor; 4. Servidor contendo banco de dados de ACV e AICV calcula os impactos ambientais; 5. Uma interface de usuário acessa os dados dinâmicos de ICV e AICV gerados pelo aplicativo cliente. | Entradas: matéria-prima; energia elétrica; ferramentas e fluídos de corte; ar comprimido. Saídas: emissões ao ar (névoas e ruído); peça usinada; cavacos; fluído de corte contaminado; fragmentos de ferramentas. |
|   | Filleti, R. A. P.; Silva, D. A. L.; Silva, E. J.; Ometto, A. R.   | 2014       | UPLCI   | Disponibilização de dados de ICV e AICV via Internet, a partir de coleta automática de dados primários em máquina-ferramenta, e, interconexão com banco de dados de ACV e AICV, por meio de aplicativo cliente.  |   |

| #  | Título do Artigo  |            | Categoria   | Etapas metodológicas  | Dados de entrada (I) e saída (O)   |
|----|---|------------|---|---|--|
|    | Autores   | Publicação | Metodologia de Referência                                 | Propósitos do Artigo  |  |
| 9  | Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory UPLCI-CO2PE!. Part 1: Methodology description. |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. classificação do processo de manufatura; 2. registro da pesquisa; 3. ICV; 4. revisão por pares; 5. publicação; 6. redução potencial de impactos ambientais; 7. guias para melhores práticas em P+L e Ecodesign.                    | Entradas; matéria-prima; energia elétrica; ferramentas e fluídos de corte; ar comprimido. Saídas: emissões ao ar; peça usinada; cavacos; fluído de corte contaminado; fragmentos de ferramentas. |
|    | Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M.; Duflou Z.; Joost R.   | 2012       | UPLCI   | Elaboração de ICV de processos unitário de manufatura discreta com emprego de dados primários e/ou secundários em duas abordagens: Screening - cálculos de engenharia e estimativas, e In Depth - medições do processo em tempo real. |  |
| 10 | Unit Process Life Cycle Inventory for Product Manufacturing Operations  |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. classificação do processo de manufatura de acordo com taxonomia;<br>2. descrição dos parâmetros do processo unitário;<br>3. cálculo dos parâmetros de entrada e saída do processo.   | Entradas; matéria-prima; energia elétrica; fluídos de corte. Saídas: peça usinada; cavacos; fluído de corte contaminado.   |
|    | Overcash, M.; Twomey, J.; Kalla, D.   | 2009       | UPLCI   | Geração de dados de ICV de processos a partir de dados secundários para os 50 à 70 processos mais usuais de manufatura. Ao final, um usuário será capaz de desenvolver o cálculo do ICV completo de uma planta de manufatura.         |  |

| #  | Título do Artigo   |            | Categoria   | Etapas metodológicas   | Dados de entrada (I) e saída (O)    |
|----|--|------------|---|--|-------------------------------------|
|    | Autores  | Publicação | Metodologia de Referência                                 | Propósitos do Artigo   |                                     |
| 11 | Life cycle of CO <sub>2</sub> -emissions from electric vehicles and gasoline vehicles utilizing a process-relational model |            | Desenvolvimento metodológico combinado com estudo de caso | 1. definição de condições de contorno para aplicação de modelos relacionados ao processos de manufatura; 2. estimativa do consumo de energia por carros elétricos e à motores de combustão interna; 3. estimativas das emissões de CO <sub>2</sub> por tipo de veículo pelo uso e manufatura; 4. cálculo do total de emissões de CO <sub>2</sub> . | Não especifica as entradas e saídas |
|    | Matsubishi, R; Kudoh, Y; Yoshida, Y; Ishitani, H; Yoshioka, M; Yoshioka, K   | 2002       | Modelos matemáticos dos processos de manufatura           | Metodologia utiliza modelos parametrizados aos processos de manufatura e consumo de combustíveis na fase de uso calcular emissões de CO <sub>2</sub> .   |                                     |
| 12 | Market aspects in product life cycle inventory methodology   |            | Desenvolvimento metodológico                              | 1. definir o produto a se analisar; 2. definir fronteiras do sistema geográfico e temporais (nível tecnológico disponível); 4. definir flutuação na fonte de matéria-prima; 5. definir critério de alocação se necessário.   | Não especifica as entradas e saídas |
|    | Weidema, B;  | 1993       | Sem referência anterior                                   | Um dos artigos mais antigos abordando ICV, destaca aspectos que devem ser observados durante a elaboração de ICV. O artigo precede as primeiras versões das normas ISO 14040 e 14044.  |                                     |

Elaborado pelo autor



O exame do Quadro 3 mostra, que 10 entre as 12 metodologias propostas, foram desenvolvidas a partir do ano de 2009, sempre ilustrando sua aplicação com casos práticos, a partir de bases teóricas de informação ou estudos de caso. Os contextos de aplicação destas metodologias de ICV são diversos apesar da conexão comum com a área de manufatura:

- corte à laser de chapas de liga de aço com baixa espessura;
- usinagem por processos convencionais de furação, fresamento e torneamento de peças em ligas de aço e alumínio;
- construção de interface informatizada para disponibilização de dados de ICV e AICV, e acesso via aplicativo *web*;
- fundição de aço com utilização de sucata em fornos à arco elétrico e básico à oxigênio;
- manufatura aditiva à laser de aço inoxidável inserida em uma cadeia de suprimentos fictícia;
- desenvolvimento de modelos preditivos para a manufatura aditiva por fusão e deposição de termoplásticos;
- conversão de dados de processos entre formatos *UPM - ASTM E3012-16* e *Ecospold2*;
- suporte ao desenvolvimento de produto com foco em projeto para manufatura (DFM);
- identificação dos ciclos produtivos de máquinas-ferramentas de acordo com a norma ISO 14955-1:2017 (ISO, 2017);
- catalogação de dados de inventário de mais de 50 processos de manufatura para permitir cálculo de ICV geral de uma planta produtiva.

As outras 2 metodologias identificadas no Quadro 3 foram publicados há mais tempo. No início deste século, Matsunashi *et al.*, (2002) propõem um modelo parametrizado teórico para cálculo do ICV com dados estimados de insumos empregados na produção de veículos automotores, bem como o consumo de combustíveis ao longo de seu ciclo de uso, visando contabilizar as emissões de CO<sub>2</sub> durante todas as fases citadas.

Em termos de etapa de aplicação destas 12 metodologias anteriormente citadas, pode-se destacar a taxonomia dos processos de manufatura observados nos estudos de caso ou exemplos teóricos; a decomposição do processo de manufatura observado até se identificar uma tecnologia de manufatura; o estabelecimento de um processo elementar; a definição de fronteiras deste sistema de manufatura com suas entradas e saídas e a realização da ICV.

Na maioria das 12 metodologias investigadas, as entradas e saídas identificadas se referem ao consumo de matérias-primas, energia elétrica, água, fluídos de corte, ar comprimido, ferramentas, e a geração de calor, névoas, fumaças, cavacos e sobras de matéria-prima e fluídos de corte contaminados.

Há dois artigos que descrevem o tratamento de dados primários de inventário a partir da etapa de coleta dos dados. Filleti *et al.* (2014) propõem a automatização de coleta de dados de inventário e da correspondente análise de impactos, para oferta posterior em aplicativo *web*. Brundage *et al.* (2019), por sua vez, elaboram um processo para a conversão de dados de processo de manufatura em formato *UMP* - ASTM E3012-16 (ASTM, 2016) em *Ecospold2*, cujo uso é mais difundido como conjunto de dados de ICV.

Cabe destacar, que 9 das 12 metodologias estudadas, empregam processos elementares de manufatura para o desenvolvimento da metodologia de ICV. Deste montante, sete artigos unem o *UPLCI* com outras funcionalidades, tais como: transferência da dados de ICV para aplicativos baseados na *web*, comparação de dados de ICV de diferentes tecnologias de manufatura, e, a construção de modelos preditivos para a produção de novos conjuntos de dados de ICV.

Com respeito aos dados de entrada na Tecnosfera e suas correspondentes saídas, o monitoramento do consumo de energia elétrica foi explicitamente mencionado em 8 artigos. De modo análogo, o mapeamento de recursos, resíduos e emissões nos processos elementares de manufatura é mencionado como uma etapa metodológica na maioria das metodologias examinadas em profundidade.

A análise bibliométrica também confirmou que a metodologia *UPLCI* recebeu a maior quantidade de citações entre os 33 artigos inicialmente selecionados, e, também foi tomada como referência para a elaboração de 8 dos 12 artigos proponentes de metodologias de ICV de processos de manufatura. O emprego de dados primários como método de coleta foi constatado também em 8 entre os 12 artigos analisados.

### 2.2.1 A Metodologia *Unit Process Lifecycle Inventory (UPLCI)*

Kellens *et al.* (2012a) declaram, que o objetivo desta metodologia é proporcionar procedimentos para a geração de inventários robustos e completos de unidades de processos elementares de manufatura, e, também contribuir na identificação de melhorias ambientais potenciais aplicáveis aos processos estudados.

A *UPLCI* coloca à disposição do praticante de ACV uma estrutura para a coleta de dados de ICV estratificados, tanto por nível de subunidade do equipamento/processo, quanto pelos seus modos de uso (FILLETI *et al.* 2017). Isto proporciona a criação de inventários individuais para cada subunidade do processo com maiores níveis de precisão, detalhes e completeza.

Kellens *et al.* (2012a) desenvolveram duas abordagens para a aplicação da *UPLCI*. A primeira é denominada *Screening approach*, baseada em modelos matemáticos e computacionais de engenharia e prática industrial, e, a segunda, denominada *In-depth approach*, mais aprofundada que a primeira abordagem, por empregar medições do processo em tempo real.

A abordagem “*screening*” é considerada a mais rápida entre as duas, pois não prevê coleta de dados do processo em tempo real. Ela fornece uma descrição inicial do processo e gera dados de inventário aproximados. Em contrapartida, a abordagem “*In-depth*” é mais trabalhosa devido ao método de coleta de dados, contudo fornece dados mais precisos e completos, propiciando a identificação de potenciais de melhorias baseado em *hotspots* ambientais levantados (KELLENS *et al.*, 2012a).

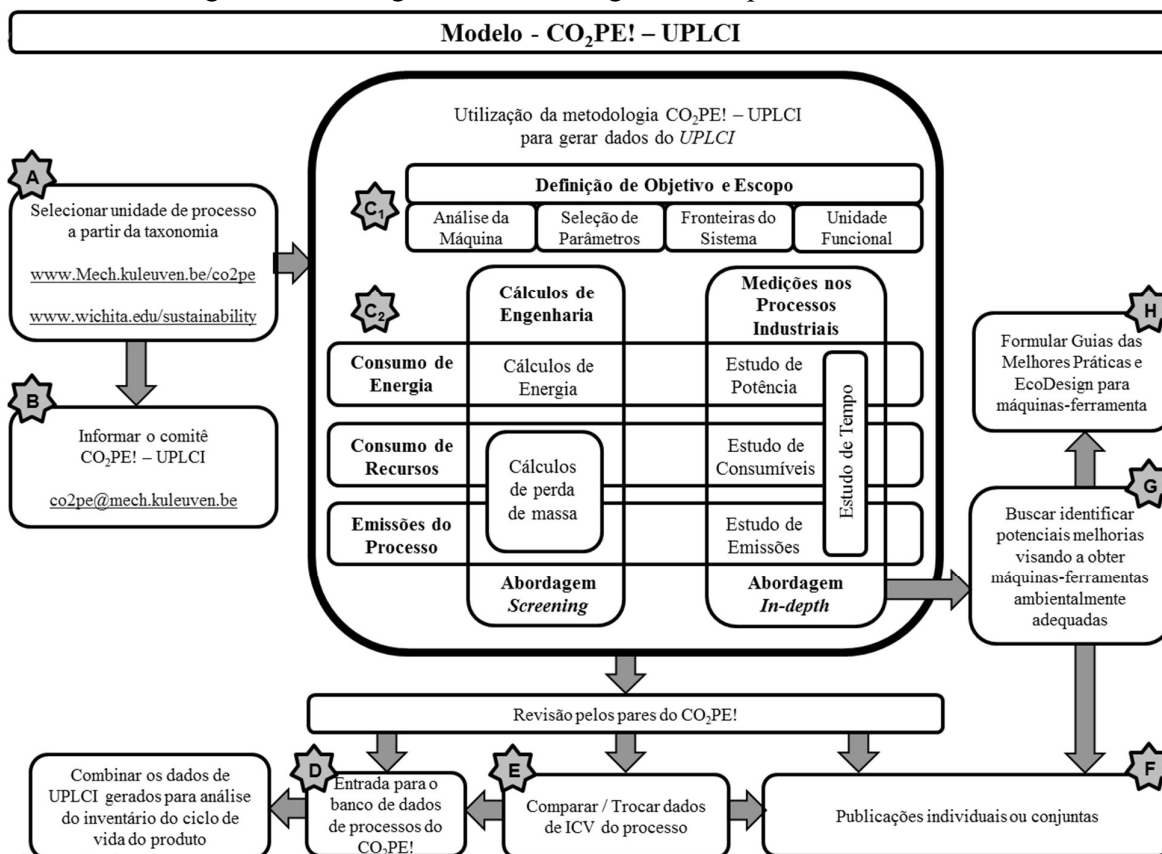
Os autores enfatizam ainda que a combinação das duas abordagens é possível, desde que cada etapa seja claramente documentada, de modo que a composição de dados estimados, calculados e medidos pode ser realizada em adequação à meta e escopo da ACV.

As etapas previstas na aplicação desta metodologia conforme Kellens *et al.* (2012a), apresentadas no modelo *CO2PE!* (Figura 9), consistem em:

- Localização da unidade de processo de manufatura pela classificação *CO2PE!*, baseada na norma DIN 8580:2003 (DIN, 2003) (etapa “A”);
- Registro da contribuição propositada para a área da classificação selecionada, a fim de permitir a comparação de resultados obtidos em estudos similares (etapa “B”);
- Seleção e emprego de uma das abordagens para geração e coleta de dados de ICV - *Screening* ou *In-depth*, ou mesmo a combinação entre ambas (etapa “C”);

- Fornecimento dos dados de ICV gerados ao *CO<sub>2</sub>PE!* para revisão por pares e possível inclusão na base de dados *UPLCI - CO<sub>2</sub>PE!* (etapa “D”).
- Compartilhamento de dados do ICV entre pesquisadores com objetivos mútuos (etapa “E”).
- Publicação conjunta do estudo, caso se complete a etapa de compartilhamento de dados (etapa “F”).
- Investigação dos potenciais de melhorias ambientais para o processo e máquina-ferramenta estudados (etapa “G”).
- Formulação de compêndio de melhores práticas e guias para Ecodesign para o processo e máquina-ferramenta estudados (etapa “H”).

Figura 9 - Visão geral da metodologia *UPLCI* pelo modelo *CO<sub>2</sub>PE!*



Fonte: Adaptado de Kellens et al. (2012a)

## 2.2.2 Etapas da Metodologia UPLCI para geração de dados de inventário

### *Definição de objetivo e escopo*

O objetivo e o escopo do estudo devem ser claramente definidos e pertinentes à unidade de processo de manufatura selecionada na etapa “A” da metodologia (KELLENS *et al.*, 2012a e DUFLOU *et al.*, 2012a). Kellens *et al.* (2012a,b) instruem o cumprimento das seguintes atividades nesta fase:

- (i) analisar a arquitetura do equipamento;
- (ii) selecionar os parâmetros de processo que serão analisados ao longo do estudo;
- (iii) identificar todas as subunidades e modos de uso da máquina-ferramenta;
- (iv) determinar as fronteiras do sistema; e
- (v) definir a unidade funcional, incluindo seu fluxo de referência.

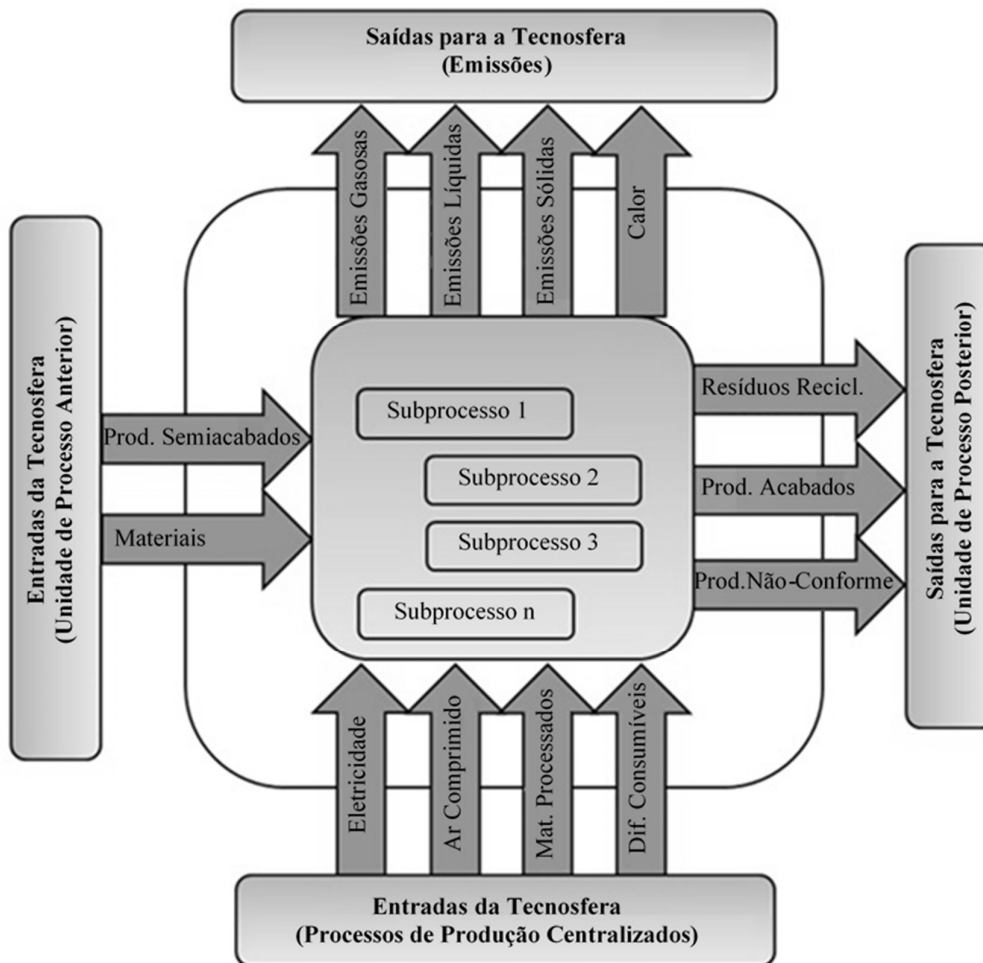
### *Fronteiras do sistema*

A definição das fronteiras do sistema deve declarar qual processo será estudado, bem como, quais subprocessos serão investigados, deixando claro os limites do estudo e as operações que ocorrem entre seu início e encerramento (KELLENS *et al.* 2012a). Os autores ainda indicam, que entradas ou saídas podem ser excluídas do estudo, caso se detecte baixa relevância para os objetivos da pesquisa, mediante adequada justificativa. (1) descrevem, ainda, que a operação da máquina não deve considerar a influência de elementos externos do processo, tal como a alimentação ou manuseio de materiais.

O próximo passo na delimitação das fronteiras do estudo é a seleção dos parâmetros relevantes para o desempenho do processo em relação à unidade funcional definida, e, que devem corresponder exclusivamente ao estágio de operação da unidade de processamento (KELLENS *et al.*, 2012a). Na Figura 10, são sugeridas as entradas advindas da Tecnosfera, oriundas de unidades de processo anterior e/ou de processos de produção centralizados; as saídas para a Ecosfera, por meio de emissões; e, as saídas para a Tecnosfera, enviadas para a(s) unidade(s) de processo posterior(es).

Dufloou *et al.* (2012) ressaltam, que consumíveis fornecidos de maneira centralizada, tais como, ar comprimido, gases, água, lubrificantes, entre outros, devem ser tomados por valores médios elementares, disponíveis em bancos de dados, como, por exemplo, o Ecoinvent.

Figura 10 - Fronteiras do sistema de uma unidade de processo



Fonte: Adaptado de Kellens *et al.* (2012a)

#### *Unidade funcional, seleção de parâmetros e análise da máquina*

A descrição da unidade funcional visa especificar quantitativa e qualitativamente a medida do desempenho das saídas funcionais do sistema estudado, servindo para definir um fluxo de referência, que irá mensurar a quantidade necessário do produto para desempenhar a função outrora definida, e, para o qual todas os outros fluxos de entrada e saídas estão relacionados (ISO 14040:2009, 2009a).

Kellens *et al.* (2012a) propõem a utilização de um fluxo de referência aplicável a 1 segundo de tempo de processamento de uma unidade de processo de manufatura, com base em um regime de trabalho de 2.000 horas anuais.

Os parâmetros do processo devem ser selecionados segundo sua relevância para o desempenho do processo correspondente à unidade funcional definida, baseados em

experiências de processos ou literatura disponíveis (KELLENS *et al.*, 2012a). Os autores ainda indicam que seja analisada a máquina-ferramenta do processo estudado, para ponderação dos cenários de uso dela, e, a identificação das subunidades consumidoras de energia e demais recursos, bem aquelas geradoras de emissões.

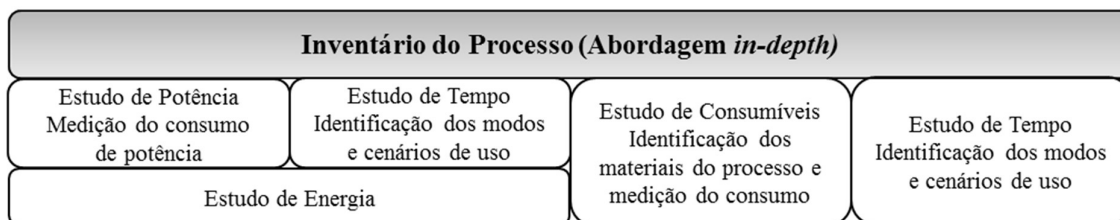
#### *Análise de inventário em processos de manufatura*

A fase de ICV, segundo a ISO 14040:2009 (ISO, 2009a), consiste na coleta de dados alusivos a todas as entradas e saídas do sistema relacionadas às categorias de impactos a serem avaliadas no estudo, e no estabelecimento de métodos para cálculos ou para quantificação dos fluxos de entrada e de saída, que pode ser conduzida pela abordagem “*Screening*” e “*In-Depth*”, segundo proposta de Kellens *et al.* (2012a).

A abordagem “*Screening*” prescreve cálculos de consumo de energia no sistema e de perda de massa, obtidos de descrições do processo em fontes de literatura, tais como, artigos revisados por pares, relatórios, dados do fabricante da máquina e consultas com especialista no processo de manufatura em análise.

A Figura 11 mostra as subdivisões dos estudos, segundo a abordagem “*In-Depth*”. Os cinco estudos viabilizam a mensuração e análise detalhada do processo, em termos dos fluxos de entrada e saída de materiais e energia, do tempo consumido na fabricação e dos parâmetros deste processo.

Figura 11 - Abordagem In-Depth



Fonte: Adaptado de Kellens *et al.* (2012a)

#### *Estudo de tempo, consumíveis, emissões, potência e energia*

Kellens *et al.* (2012a) explicam que os estudos de tempo são desenvolvidos para se identificar os diferentes modos de uso do processo estudado, seus respectivos parâmetros de processo, desde a inicialização até o seu desligamento, contemplando o tempo consumido por cada modo de uso e subunidade em relação ao tempo total do processo de fabricação.

No estudo de potência, se mede o consumo de energia elétrica utilizada pela unidade de processamento em cada modo de uso identificado durante a etapa de estudo de tempo. O consumo de energia é calculado pela multiplicação entre a potência fornecida e a duração de realização de cada modo de uso, tanto para o equipamento como um todo, quanto para cada subunidade ativa em cada modo de produção escolhido.

Em relação ao estudo de consumíveis, Kellens *et al.* (2012a) indicam a medição do consumo dos insumos (ar comprimido, lubrificantes, processo etc.) para cada material utilizado na unidade de processamento, em cada modo de produção, paralelamente às medições de tempo e potência. A quantidade gerada de resíduos de matéria-prima também deve ser incluída como consumível, pois é resultado da realização do processo.

Kellens *et al.* (2012a) instruem a medição dos consumíveis de modo direto (medição de volume ou massa) ou indireto (medidores de fluxo em relação ao tempo), sendo expressos em relação ao fluxo de referência, ou seja, em quantidade por segundo de processamento. Os resíduos criados pelo processo, por sua vez, devem ser relatados percentualmente sobre o fluxo de entrada do material processado.

As emissões gasosas, líquidas ou sólidas oriundas de um processo, em cada modo de uso, devem ser medidas nas subunidades em que tais emissões se demonstrem relevantes, e, expressas na unidade de medida pertinente por segundo de processamento.

### **2.3 AICV e Interpretação da ACV em Processos de Manufatura**

As etapas de AICV e de interpretação dos resultados não fazem parte da metodologia *UPLCI*. Contudo, elas são apresentadas neste estudo, pois compõem a ACV, sendo a AICV essencial para a interpretação de resultados em relação às questões colocadas na definição de objetivos da ACV (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

A norma ISO 14040:2009 (2009a) declara que o objetivo principal da AICV é classificar e conhecer a relevância dos impactos ambientais potenciais de cada fluxo inventariado na fase de ICV, e a norma ISO 14044:2009 (2009b) destaca que a seleção das categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização deve ser consistente como o objetivo do estudo e refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas a ele.

A norma ISO 14040:2009 (2009a) enumera ainda os elementos obrigatórios e opcionais para o desenvolvimento da AICV. Os elementos mandatórios são compreendem: a seleção das



categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização (etapa de seleção); a correlação de resultados do ICV (etapa de classificação); e o cálculo de resultados dos indicadores de categoria (etapa de caracterização). Os elementos opcionais incluem as fases de normalização, agrupamento e ponderação.

Hauschild e Huijbregts (2015) mencionam que a etapa de caracterização da AICV aplica modelos de mecanismo ambiental, desde os fluxos elementares identificados na ICV, através de uma sequência de impactos relacionados, até as áreas de proteção (saúde humana, ambiente natural e recursos naturais) relevantes para a categoria de impacto estudada, a qual pode ser avaliada em nível *Midpoint* ou *Endpoint*.

Mendes (2013) explica, que no nível *Midpoint*, a caracterização utiliza-se de indicadores situados ao longo do mecanismo ambiental, entre as emissões e o impacto final, em um ponto em que se considera não ser exequível uma modelação adicional (aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio, entre outros). Em nível *Endpoint*, a caracterização é realizada considerando-se o mecanismo ambiental por completo, até o seu ponto final, para a determinação de impactos nas áreas de proteção.

Firmino (2020) observa que os métodos de AICV mais utilizados nas ACV para processos de manufatura são: ReCiPe (GOEDKOOOP *et al.*, 2009); IMPACT 2002+ (JOLLIET *et al.*, 2003); Eco-Indicator 99 (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2001); e CML2001 (GUINÉE, 2001), conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Métodos de AICV utilizados em ACV de processos de manufatura

| Método de AICV   | Tipo de método             | %  |
|------------------|----------------------------|----|
| ReCiPe           | <i>Midpoint e Endpoint</i> | 60 |
| IMPACT 2002+     | <i>Midpoint</i>            | 40 |
| Eco-Indicator 99 | <i>Endpoint</i>            | 10 |
| CML2001          | <i>Midpoint</i>            | 10 |
| Outros           | -                          | 10 |

Fonte: Firmino (2020)

A interpretação do ciclo de vida é a etapa final de uma ACV, na qual se avaliam os resultados da ACV sob a perspectiva do objetivo declarado na parte inicial do estudo (ISO 14044:2009, 2009b) (2) menciona dois propósitos para a interpretação do ciclo de vida:

- durante as fases iterativas de uma ACV, a fase de interpretação serve para balizar o trabalho com vistas ao aprimoramento do modelo de ICV para alcance das necessidades derivadas da definição inicial de objetivo;

- em estudos comparativos de ACV, a interpretação serve para suportar decisões robustas e recomendações.

A ISO 14044:2009, (2009b) declara que a fase de interpretação dispõe os seguintes elementos:

- Identificação das questões significativas (*hotspots*) derivadas dos resultados obtidos nas ICV e AICV;
- Avaliação da ACV quanto à sua completeza, sensibilidade e consistência;
- Apresentação das conclusões, das limitações e das recomendações do estudo.

A aplicação da metodologia *UPLCI* conduz ao registro de inventários de ciclo de vida em processos de manufatura em uma base que permite comparações entre processos de usinagem com características distintas. Isto fica evidente nos estudos de caso de fresamento de engrenagens apresentados no capítulo seguinte deste trabalho.

## 2.4 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Vukelic et al. (2020), Campitelli et al. (2019), Mia et al. (2019), Zanuto et al. (2019), Kamps et al. (2018), e outras pesquisas menos recentes de ACV em processos de usinagem frequentemente destacam os aspectos ambientais de consumo de energia e emprego de fluídos de corte, e, os impactos ambientais derivados destas atividades de usinagem. O consumo de energia exerce contribuição direta sobre a categoria de impactos ambientais de mudanças climáticas, enquanto, o emprego de fluídos de corte em máquinas-ferramenta se associa diretamente à categoria de toxicidade humana.

Mais de uma dezena de metodologias de ICV foram desenvolvidas para processos de manufatura, incluindo a usinagem, com o intuito de auxiliar a prática da ACV. A revisão sistemática de bibliografia realizada nesta pesquisa identificou, que a metodologia de ICV de maior destaque atualmente é a *UPLCI*, denominada ICV de processo elementar de manufatura, a qual foi empregada no estudo de caso posteriormente apresentado nesta pesquisa.

Notou-se também que os estudos sobre ACV de processos de fresamento de dentes com emprego da técnica de lubri-refrigeração de corte MQL ainda são pouco frequentes na literatura científica.

### 3 METODOLOGIA

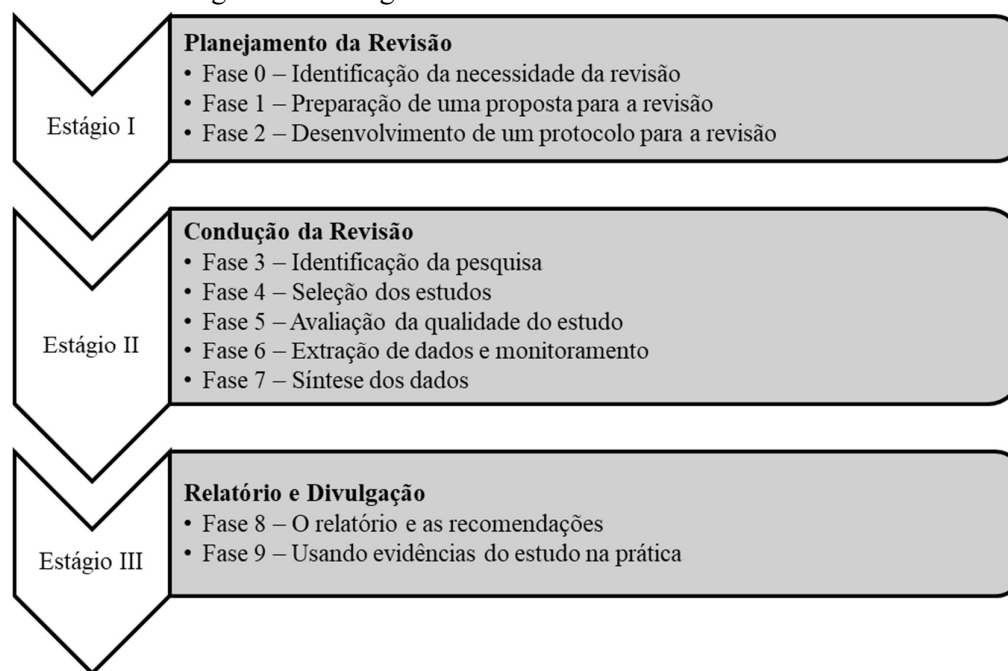
Os procedimentos técnicos de pesquisa empregados no trabalho foram a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. A pesquisa bibliográfica sobre metodologias sobre ICV em processos de manufatura auxiliou na seleção de uma metodologia para condução do estudo de caso sobre fresamento de engrenagens.

#### 3.1 Revisão Sistemática de Literatura

A revisão sistemática de literatura foi designada para responder à questão da pesquisa: “Como está a literatura sobre procedimentos e metodologias para apoiar a construção de ICV de processos de manufatura?”. Segundo Tranfield *et al.*, (2003), a revisão sistemática permite a seleção e avaliação das contribuições de pesquisas prévias, a análise e síntese de dados correspondentes, bem como o compartilhamento de tal investigação. Por fim, ela oferece ao pesquisador uma visão mais ampla do campo de conhecimento estudado.

Tranfield *et al.*, (2003), dividem a revisão sistemática em três estágios (Figura 12). O primeiro deles, planejamento, estabelece a questão de pesquisa e o protocolo de pesquisa. O segundo estágio, condução, gera os dados quantitativos a partir da extração e ordenamento de dados em categorias distintas conectadas ao ramo de conhecimento estudado. No terceiro e último estágio, uma análise descritiva do campo de conhecimento é feita de acordo com as categorias propostas, e as contribuições principais dos artigos são examinadas e interpretadas.

Figura 12 - Estágios e fases de uma revisão sistemática



Fonte: Adaptado de Tranfield *et al.* (2003)

Na fase de planejamento foi estabelecida a questão da pesquisa, que orientou a revisão sistemática. O protocolo desta revisão incluiu: definição de termos de busca; seleção das bases de dados; período de busca, e, estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão.

O termo de buscas definido foi resultado da combinação de palavras-chave extraídas da questão de pesquisa: “*Life cycle inventory*” ou sua abreviação “*LCP*” simultaneamente com os termos “*manufacturing*” e “*methodology*”. A busca foi realizada no idioma inglês devido a quantidade vasta de publicações neste idioma, e com cobertura global.

*Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar* e *Scielo* foram escolhidas como as bases de dados, e o período pesquisado se estendeu até 1990 (Quadro 4). A intenção foi a de mapear a evolução do tema pesquisado ao longo dos anos. As duas primeiras bases de dados foram selecionadas devido à sua cobertura global no meio acadêmico. *Scielo* foi selecionada devido a sua cobertura de temas científicos no Brasil. Por outro lado, *Google Scholar* está integrado ao mais popular motor de busca na internet (ZIAKIS *et al.*, 2019).

A seleção de artigos para a revisão foi definida pelos critérios de inclusão e exclusão. Os critérios de inclusão usados foram: artigos que abordem o tema de metodologia de ICV para

processos de manufatura, e, que tenham sido publicados em periódicos revisado por pares, no idioma inglês, por ser largamente utilizado para publicações científicas. O critério de exclusão compreendeu livros, editoriais, notas, artigos de conferências não revisado por pares e artigos duplicados, ocasionalmente encontrados em mais de uma base de dados. Tal literatura foi excluída como tentativa de assegurar a qualidade dos artigos selecionados, por estas publicações não serem normalmente verificadas por pares. Isto poderia levar a significativa variabilidade de qualidade (ADAMS *et al.*, 2017).

Os artigos remanescentes foram avaliados para exclusão daqueles, em que não há relação simultâneo com metodologias e procedimentos de ICV nem com os seguintes processos de manufatura: conformação, transformação, separação ou junção, como descrito na norma DIN 8580:2003 (DIN, 2003). A extração de dados foi conduzida qualitativamente para a seleção final dos artigos, incluindo: título do artigo, periódico ou editor, ano de publicação, país onde se realizou a pesquisa, e setor da economia relacionado.

As referências bibliográficas da seleção final de artigos foram submetidas à análise bibliométrica por meio do software *Citespace*, a fim de complementar a extração de dados, capturando as tendências de pesquisa na área de metodologias para ICV de processo de manufatura, pela revelação dos artigos mais citados e dos seus respectivos autores.

A análise bibliométrica tem sido empregada durante os últimos 25 anos para se referir às análises matemáticas e estatísticas de padrões que surgem na publicação e uso de documentos (DIODATO, 2012). A variante do *Citespace* utilizado neste trabalho foi a versão livre, disponível em aplicação Java para visualização e análise de tendências e padrões na literatura científica (CITESPACE, 2019).

Concluindo o estágio de condução, a realização de uma síntese de dados desenvolveu a classificação dos artigos selecionados como: desenvolvimento tecnológico, estudo de caso, estudos combinados, modelamento e simulação, enquete survey, pesquisa-ação e revisão de literatura. Na sequência, os dados qualitativos foram extraídos.

Durante o estágio de condução, foi realizada a busca em junho de 2019 nas bases *Scopus*, *Web of Science*, *Scielo* e *Google Scholar*, a qual resultou em 249 artigos, sendo que a exclusão de artigos duplicados ou não revisados por pares reduziu a quantidade total para 127 documentos. Em seguida, pela leitura dos títulos e resumos dos artigos restantes, 94 documentos

foram eliminados devido à falta de conexão entre as palavras-chave “*life cycle inventory*”, “*methodology*” e “*manufacturing*”.

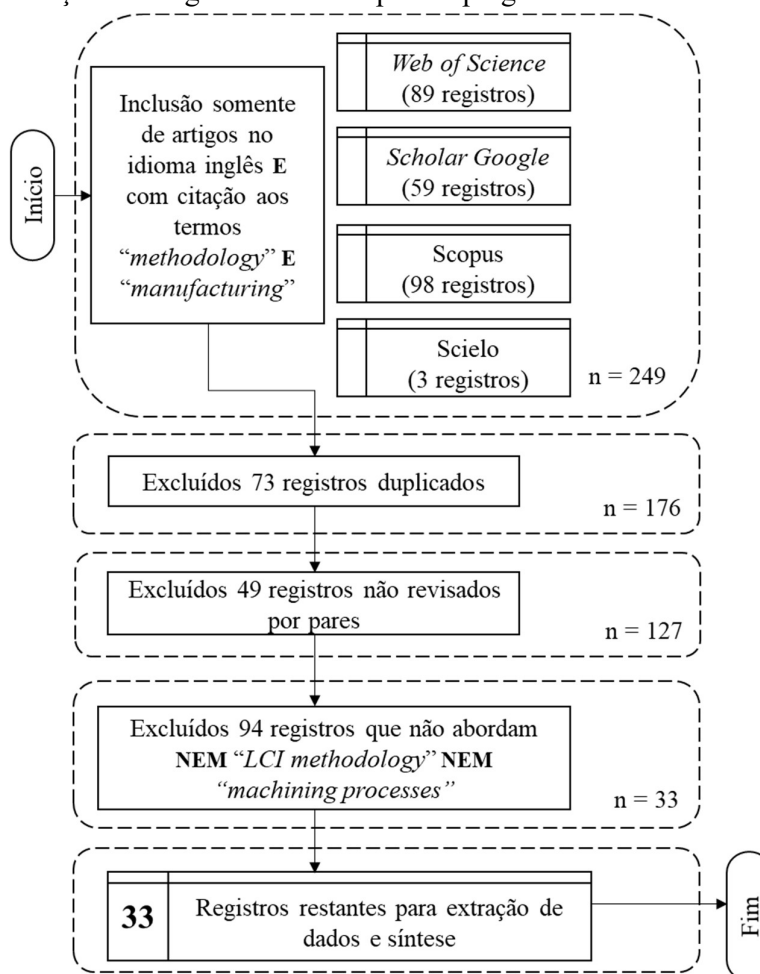
Quadro 4 - Definição dos termos de busca e resultados em metodologias de ICV

| Base de Dados  | Expressões de Busca   | Resultados da Busca |
|----------------|---|---------------------|
| Scopus         | ((TITLE-ABS-KEY ("life cycle inventory") OR TITLE-ABS-KEY ("lifecycle inventory") OR TITLE-ABS-KEY (lci) AND TITLE-ABS-KEY ( manufacturing ))) AND ((TITLE-ABS-KEY ("life cycle inventory") OR TITLE-ABS-KEY ("lifecycle inventory") OR TITLE-ABS-KEY (lci) AND TITLE-ABS-KEY ( methodology ))) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English" ))                                | 98 documentos       |
| Web of Science | ((TS=("life cycle inventory" OR "lci" OR "lifecycle inventory") AND TS=(manufacturing)) Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Timespan=All years) AND ((TS=("life cycle inventory" OR "lci" OR "lifecycle inventory") AND TS=(methodology)) Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Timespan=All years) AND LANGUAGE: (English) | 89 documentos       |
| Scielo         | (TS="life cycle inventory" OR TS="lifecycle inventory" OR TS="LCI" AND TS="methodology" AND TS="manufacturing") AND LANGUAGE: (English) Indexes=SCIELO Timespan=All years   | 3 documentos        |
| Google Scholar | (Find articles: with all of the words (methodology) AND with the exact phrase (life cycle inventory) AND where my words occur (In the title of the article))AND* (Find articles: with all of the words (manufacturing) AND with the exact phrase (life cycle inventory) AND where my words occur (In the title of the article))AND LANGUAGE: (English)                | 59 documentos       |

Fonte: Elaborado pelo autor

Desta maneira, 33 artigos passaram por todos os critérios de inclusão e exclusão pré-definidos, conforme procedimento de refinamento mostrado na Figura 13. Esta amostra refinada foi então organizada em categorias, e, interpretada em referência à questão da pesquisa, e os resultados forma apresentados na seção “2. Pesquisa Bibliográfica”.

Figura 13 - Seleção de artigos relevantes após emprego dos critérios de exclusão



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2 Estudo de Caso

O estudo de caso foi desenvolvido em uma empresa do setor de autopeças, localizada no estado de São Paulo, onde são produzidas transmissões e diversos componentes de seus trens de engrenagens. Estas transmissões são aplicadas em trens de força de veículos comerciais e de passeio do mercado Sul-americano.

A seguir são apresentados os materiais, procedimentos, premissas de trabalho e métodos empregados na elaboração do estudo de caso de fresamento de engrenagens automotivas com emprego da lubri-refrigeração convencional e MQL, de acordo com a estrutura proposta na metodologia *UPLCI*.

### 3.2.1 Materiais

A máquina-ferramenta, objeto deste estudo, encontra-se instalada na planta de fabricação de componentes desta empresa, conforme a descrição a seguir: fresadora de engrenagens, modelo S300, do fabricante Samputensili, construída em 2011, com alimentação elétrica 380 V, trifásico e, equipada com comando numérico Sinumerik, do fabricante Siemens (Figura 14-1). A escolha desta aplicação para o estudo de caso foi baseada nas seguintes premissas:

- (i) fresadora de dentes equipada com ferramenta fresa-caracol (Figura 14-3), amplamente utilizada pela empresa para a fabricação de engrenagens e eixos das transmissões aplicadas em veículos comerciais na América do Sul;
- (ii) sistema de lubrificação e refrigeração de corte MQL instalado e ativo na referida máquina-ferramenta desde julho de 2018;
- (iii) dados históricos do consumo de fluido de corte para esta máquina-ferramenta, antes da introdução da tecnologia MQL, entre janeiro de 2014 e junho de 2018;
- (iv) engrenagens está entre aquelas de maior dimensão e massa (14 kg), que é atualmente produzida na planta de manufatura da empresa, de forma que demanda elevadas potências de corte, e por consequência, consumo de energia elétrica e insumos de produção; além da elevada geração de resíduos sólidos (cavacos) decorrentes da usinagem (Figura 14-3).
- (v) Engrenagem cujas dimensões médias correspondem à produção de 80.000 unidades / ano para emprego na montagem de transmissões de 12 e 16 marchas para veículos comerciais pesados e semipesados.



Figura 14 - Imagens da máquina-ferramenta e peça do estudo de caso



**LEGENDA:**

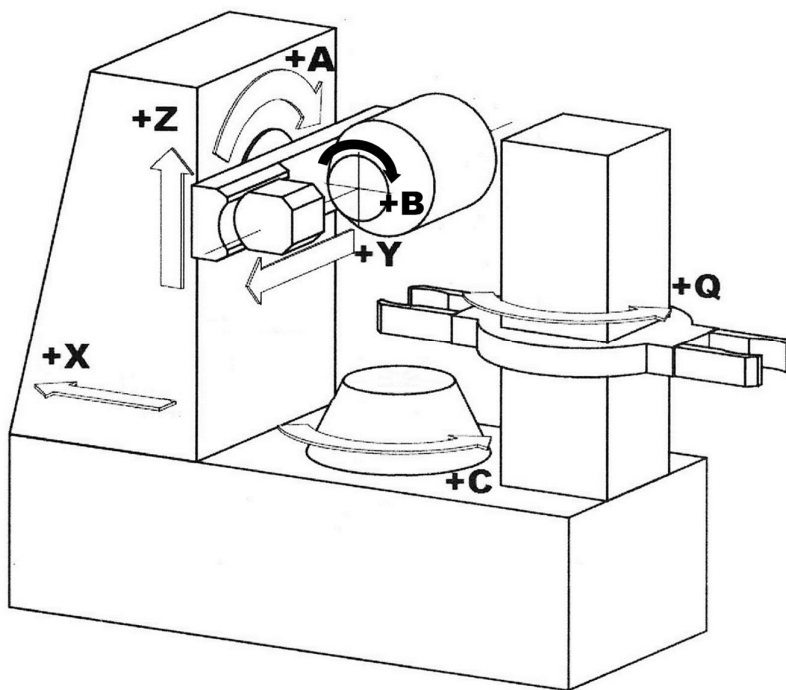
- 1 – Vista frontal da fresadora de dentes;
- 2 – Vista lateral da fresadora incluindo unidade de refrigeração (inferior) e exaustor de névoa (superior);
- 3 – Fresa caracol e engrenagem semi-acabada fixada na mesa;
- 4 – Painel frontal da unidade de refrigeração;
- 5 – Engrenagem com dentes fresados (pós-operação de usinagem);
- 6 – Sistema MQL instalado no painel traseiro da fresadora.

Fonte: Elaborado pelo autor

A máquina-ferramenta estudada possui três eixos lineares de deslocamento (X, Y e Z) e três eixos angulares (A, B, C) e um braço robotizado giratório para posicionamento da peça (Q) conforme diagrama esquemático apresentado na Figura 15. Durante o corte dos dentes da engrenagem, a ferramenta de corte gira em torno do eixo B, e o carro porta-ferramenta se move linearmente ao longo do eixo Z. Simultaneamente, a peça fixa na mesa gira em torno do eixo C. Ao fim da operação de fresamento dos dentes, o braço robótico apanha a peça usinada, e

executa um giro de 180°, posicionando uma peça semi-acabada na mesa, para que se inicie um novo ciclo de operação.

Figura 15 - Diagrama esquemático da máquina fresamento de dentes



Fonte: Elaborado pelo autor

A máquina-ferramenta estudada apresenta seis estados distintos de operação, de acordo com a norma ISO 14955-1:2017 (ISO, 2017), ordenados abaixo pela maior quantidade de subsistemas em operação até o estado de desligamento da máquina-ferramenta da rede de energia da planta industrial:

- **estado “PROCESSING”**: máquina energizada; unidade de controle, de movimentação (eixos lineares e rotativos) e de processamento (eixo porta-ferramenta) acionadas; unidades periféricas acionadas; com efetiva remoção de material da peça, e, ou, movimentação dos eixos lineares ou rotativos;
- **estado “WARM UP”**: máquina energizada; unidade de controle, de movimentação (eixos lineares e rotativos) e de processamento (eixo porta-ferramenta) acionadas; unidades periféricas acionadas; com movimentação dos eixos lineares ou rotativos, porém sem remoção de material da peça;

- **estado “*READY FOR PROCESSING*”**: máquina energizada; unidades periféricas habilitada para entrar em funcionamento; unidade de controle, de movimentação (eixos lineares e rotativos) e de processamento (eixo porta-ferramenta) em espera, pronta para iniciar a operação;
- **estado “*EXTENDED STANDBY*”**: máquina energizada; unidades periféricas habilitada para entrar em funcionamento; unidade de controle, de movimentação (eixos lineares e rotativos) e de processamento (eixo porta-ferramenta) em espera; período inicia logo após o término do trabalho de usinagem, no qual ocorre a retirada do produto acabado e inserção da matéria-prima para o início de um novo ciclo de usinagem;
- **estado “*STANDBY*”**: máquina energizada, e somente a unidade de controle acionada; modo ativo em paradas mais longas como intervalo para refeições e troca de turnos.
- **estado “*OFF*”**: máquina não-energizada.

Ao longo do ciclo de fresamento de uma engrenagem, a máquina-ferramenta comuta entre os estados: modo de processamento “*Processing*”, modo de aquecimento “*Warm-up*”, modo de prontidão “*Ready for Processing*”, e o modo “*Standby*” estendido, os quais atuam sobre as seguintes subunidades da fresadora de dentes:

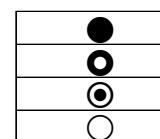
- Sistema primário (iluminação, unidade de controle e sensores);
- Central hidráulica da máquina;
- *Spindle* (porta-ferramenta);
- Eixo da mesa de posicionamento da peça;
- Eixos lineares e angular;
- Sistema de exaustão de névoa;
- Sistema de refrigeração da máquina;
- Sistema de ar comprimido ou bomba do sistema de lubrificação e refrigeração do corte;
- Transportador de cavaco.

A Figura 16 apresenta uma correlação entre os estados de operação e as subunidades da fresadora de dentes para indicar se a subunidade se encontra ativada; energizada; com ativação intermitente; energizada mas não ativada, e, desligada. Isto pode vir a facilitar a interpretação de dados e identificação das fontes de consumo de energia e de insumos necessários à realização do processo de fresamento.

Figura 16 - Correlação entre estados de operação e ativação das subunidades da fresadora

| Subunidades   | Estados de Operação |                |                             |                         |                |
|---|---------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|
|   | <i>PROCESSING</i>   | <i>WARM UP</i> | <i>READY FOR PROCESSING</i> | <i>EXTENDED STANDBY</i> | <i>STANDBY</i> |
| Sistema primário da máquina   | ●                   | ●              | ●                           | ●                       | ●              |
| Unidade de refrigeração da máquina  | ●                   | ●              | ●                           | ●                       | ○              |
| <i>Spindle</i> e eixos lineares e angulares                                 | ●                   | ●              | ◉                           | ◉                       | ○              |
| Exaustão de névoa   | ●                   | ●              | ◉                           | ○                       | ○              |
| Transportador de cavaco   | ●                   | ◉              | ◉                           | ○                       | ○              |
| Ar comprimido centralizado ou bomba de lubrificação e refrigeração do corte | ●                   | ◉              | ◉                           | ◉                       | ○              |

**Legenda:** Ativada  
 Energizada e ativação intermitente  
 Energizada e não ativada  
 Desligada



Fonte: Elaborado pelo autor

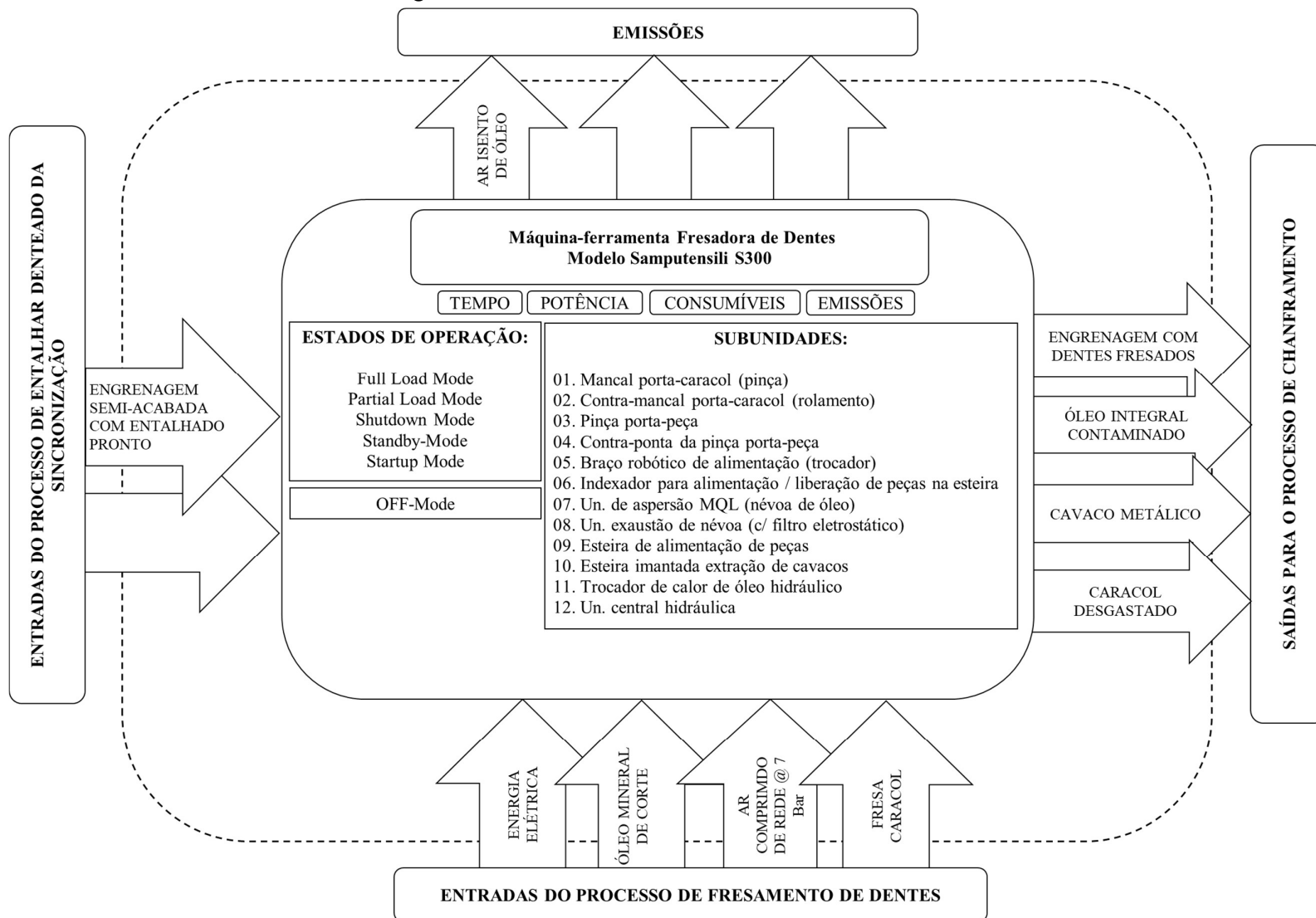
### 3.2.2 Métodos

#### 3.2.2.1 Unidade funcional, fluxo de referência e fronteiras do sistema

Tomando-se a recomendação oferecida pela metodologia *UPLCI* (KELLENS *et al.*, 2012a), o fluxo de referência foi expresso como: remoção, por meio de usinagem mecânica, de 0,67 cm<sup>3</sup>/segundo da liga de aço 20MnCr5 modificado, oriundo de peça semi-acabada, resultando em uma engrenagem com 32 dentes helicoidais, ainda considerada um produto semi-acabado dentro do processo produtivo, por ainda cumprir as operações de tratamento térmico e retífica de dentes. Neste caso, a unidade funcional foi definida exatamente igual ao fluxo de referência.

Na Figura 17 estão definidas as fronteiras do sistema, contendo: entradas e saídas do sistema estudado, seus estados de operação e suas subunidades, conforme as premissas estabelecidas pela metodologia *UPLCI*.

Figura 17 - Fronteiras do sistema “Fresadora de Dentes”



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.2.2 Considerações e Premissas sobre o ICV

A etapa de coleta de dados para o ICV foi desenvolvida de acordo com a abordagem aprofundada, denominada “*In Depth*”, conforme a metodologia *UPLCI*. Esta opção de abordagem foi selecionada por proporcionar dados de ICV mais precisos e completos, propiciando a identificação de potenciais de melhorias baseado em *hotspots* ambientais levantados (KELLENS *et al.*, 2012a). Esta abordagem tem a vantagem de reduzir potencialmente as incertezas em estudos de ACV, e na geração de inventários para emprego posterior, seja em estudos de ACV similares, ou em geração de *datasets* para bancos de dados de ACV voltados aos processos de manufatura.

Em seguida à caracterização das fronteiras do sistema estudado, estabeleceu-se o emprego de dados de *background* extraídos da base de dados do *software GaBi*, versão 9.2.1.68 - *Education Database 2020*, que é destinada ao uso em pesquisas acadêmicas. Dentre os fluxos de entrada do sistema apresentado, a matéria-prima na forma de lingotes do aço 16MnCr5, foi obtida por meio de processos siderúrgicos com uso de aço reciclado, na proporção de 95,3%.

Em contrapartida, os dados de *foreground* foram coletados por meio de medições *in loco*, no ambiente de produção, de acordo com as seguintes etapas:

- medição direta do tempo e do consumo de energia elétrica para cada estado de operação da máquina-ferramenta, em um ciclo completo de operação;
- medição indireta do consumo de aço-liga na forma da peça semi-acabada, fluído de corte, ferramenta de usinagem e ar comprimido para cada estado de operação da máquina-ferramenta, em diversos ciclos completos de operação;
- medição indireta da geração de cavacos decorrentes dos estados de operação da máquina-ferramenta, em diversos ciclos completos de operação;
- compilação dos dados de inventário coletados para se calcular e entrada e saída totais, e, posteriormente, o balanço de massa/energia do sistema do produto representado na Figura 17.

O Apêndice A exibe um formulário, que foi elaborado para a coleta de dados *in loco*, com o propósito de auxiliar as medições de tempo interrelacionadas pelos estados de operação da máquina ferramenta em um ciclo completo de fresamento da engrenagem, e também, para o registro dos consumíveis ao longo de uma sequência de vários ciclos de fresamento da mesma engrenagem, somando em torno de 1.000 horas.

### *Estudo de tempo*

Um ciclo completo de fresamento de uma engrenagem foi cronometrado, registrando-se, o intervalo de tempo no qual cada modo de uso esteve ativo, de maneira consecutiva, desde o instante em que o carro porta-ferramenta inicia o movimento de aproximação sobre a peça semi-acabada, até o instante em que uma nova peça semi-acabada é posicionada na mesa para início de um novo ciclo de fresamento. Este procedimento foi repetido cinco vezes, com o propósito de se detectar variações nos tempos parciais e total do ciclo de fresamento.

### *Estudo de potência*

A apuração do consumo de energia elétrica foi realizada de modo indireto, por meio da medição de potência consumida na máquina-ferramenta, por intermédio de um analisador de energia trifásico, modelo FLUKE 435. Este equipamento foi instalado no painel elétrico da fresadora para medição em tempo real da corrente elétrica e tensão em cada uma das três fases, bem como a potência ativa, conforme detalhes apresentados no Apêndice B.

Os dados das medições foram armazenados na memória interna do FLUKE 435, e, posteriormente, transferidos para aplicativo de planilha eletrônica, instalado em um *laptop*, sendo este um meio mais adequado para a subsequente compilação, manuseio e demais cálculos envolvidos na ICV.

As medições foram realizadas para sete condições de corte, as quais foram derivadas das combinações entre avanço axial da fresa-caracol e velocidade angular do *spindle*, limitadas a intervalos considerados adequados para este processo elementar de fresamento. O monitoramento da espessura, forma e coloração dos cavacos, em acordo com padrões próprios da empresa, asseguraram que os dados medidos de potência refletissem condições de contorno realistas do ambiente produtivo.

### *Estudo de consumíveis*

Além do consumo de energia elétrica, foi monitorado o consumo de insumos de produção empregados no fresamento da engrenagem, assim como de resíduos gerados nesta operação, por intermédio de um método indireto de contagem. Os consumíveis monitorados foram: (i) matéria-prima; (ii) fluido de corte; (iii) ferramenta denominada fresa caracol; e (iv) ar comprimido. Em relação aos resíduos gerados considerados no estudo, incluiu-se: (v) cavaco; (vi) fluido de corte sujo; e; (vii) fresa-caracol desgastada.

A apuração do consumo de matéria-prima (engrenagem semi-acabada torneada) e geração de resíduos sólidos (cavacos) foi realizada mediante medição da massa da engrenagem, antes e depois de passar pelo processo de fresamento. Assim, a diferença das massas medidas é, justamente, a massa de matéria prima convertida em cavaco.

A respeito do volume de cavaco gerado, adotou-se o resultado da multiplicação entre a massa de cavaco mensurada anteriormente e o volume específico da liga de aço 20MnCr5, que corresponde à  $7.895 \text{ Kg} / \text{m}^3$ , segundo levantamento do laboratório de materiais da empresa. A medição *in loco* foi avaliada como alternativa, todavia o método de cálculo apresentado é mais preciso, pois não há garantias que a esteira transportadora de cavacos extraia 100% do volume de cavaco gerado por ciclo de fresamento, uma vez que, algumas partículas caem fora da área de coleta da esteira, mesmo que em quantidades marginais, devido à alta velocidade com que são lançadas no momento em que se desprendem da peça sob usinagem.

Em relação ao consumo de fluido de corte, o reservatório do sistema de MQL da máquina-ferramenta é periodicamente monitorado e abastecido pela equipe de manutenção mecânica da empresa, de maneira que há registro do consumo específico para esta máquina-ferramenta, juntamente com o total de horas efetivas de operação ao longo de 1.000 horas. Diante da disponibilidade de dados confiáveis, optou-se por calcular uma média de consumo de fluido de corte, a partir do quociente entre o total de engrenagens produzidas no período e a quantidade total de fluido de corte consumida pelo sistema MQL da referida máquina.

Outro aspecto que corrobora a decisão de uso de dados coletados ao longo de 1.000 horas de operação da máquina-ferramenta é o baixo consumo de fluido de corte por peça, que oscila em torno de 500 ml a cada 120 peças, segundo dados históricos da empresa. Portanto, a medição do consumo de fluido de corte por peça se mostra inviável, pois demandaria a instalação de equipamento de medição com resolução de décimo de mililitro para se apurar o débito de óleo com razoável precisão.

A máquina-ferramenta deste estudo está equipada com o sistema MQL desde junho de 2018, assim como outras máquinas semelhantes, que realizam o fresamento de dentes de engrenagens. Desta maneira, a comparação de consumo de fluido de corte antes e depois da introdução do sistema MQL só foi possível por meio da consulta a dados históricos dos departamentos de manutenção e produção da empresa. Contudo, tais registros históricos totalizam mais de 5.000 horas de operação com o sistema de lubrificação tradicional, sendo esta



massa de dados suficiente para assegurar um cálculo do consumo real de fluido de corte por engrenagem.

O levantamento da quantidade de óleo contaminado, após a operação de fresamento, foi obtido pelas medições da massa de 1.030 g de cavacos úmidos, logo após sua extração da máquina pelo transportador de cavacos, e, posteriormente pela mesma massa de cavacos secos, após passagem por estufa. A diferença entre as massas medidas determina a quantidade percentual de fluido de corte consumida por este processo de fresamento. Em seguida, multiplica-se a massa de cavacos obtida em cada ciclo de fresamento pelo percentual obtido anteriormente. Este procedimento foi aplicado tanto para a operação assistida pelo sistema de lubrificação e refrigeração convencional quanto para a tecnologia MQL.

Em relação ao consumo de fresas-caracol por engrenagem fresada, foi apurada a quantidade de engrenagens usinadas por uma ferramenta, antes que ela fosse removida para subsequente processo externo de reafiação e recobrimento. Assim, o consumo de ferramenta por engrenagem usinada foi o quociente entre a quantidade unitária (1) e o número de engrenagens produzidas com uma ferramenta.

#### *Estudos de emissões*

A máquina-ferramenta objeto do estudo de caso é equipada com um filtro eletrostático para absorção de névoas e fumos de óleo de corte, que se formam devido às altas temperaturas originadas na zona da corte, características químicas do óleo de corte e sua pressão de bombeamento. Além disso, a operação de fresamento ocorre em um espaço enclausurado da máquina-ferramenta, de tal maneira que o ar exaurido da máquina se encontra à pressão atmosférica e abaixo do limite de  $5 \text{ mg/m}^3$ , que é o valor máximo permitido para a emissão de névoas e fumos de óleo de acordo com a Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15).

A máquina-ferramenta também conta com uma unidade externa de refrigeração, que opera com o fluido R134A, na faixa de temperatura entre  $15^\circ\text{C}$  e  $45^\circ\text{C}$ , e, que fornece 7.900 W de potência para resfriamento do óleo hidráulico de circulação interna da máquina. Durante a condução do estudo de caso, registrou-se que a temperatura média do ar dissipado ao ambiente da fábrica era de  $38^\circ\text{C}$ , em um raio de 50 cm em torno deste equipamento, não caracterizando condição de operação insalubre, de acordo com a Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15).

### 3.2.2.3 Considerações e Premissas sobre a AICV

A partir dos dados de inventário coletados *in loco* e levantados pelos registros históricos, foi realizada a AICV com o emprego do *software* GaBi, versão 9.2.1.68 - *Education Database* 2020.

O método de avaliação de impactos ambientais selecionado foi o ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H), por ser o método de AICV mais adotado na literatura, no que diz respeito à aplicação de ACV em processos de manufatura, de acordo com a análise apresentada na seção 2.1.7, do capítulo de revisão bibliográfica. Dentre as 15 categorias de impacto *Midpoint* do método ReCiPe, Firmino (2020) destaca aquelas mais utilizadas em estudos de ACV em processos de manufatura, as quais foram adotadas na AICV deste trabalho de pesquisa:

- (i) Mudanças climáticas [em, kg de CO<sub>2</sub> equivalente];
- (ii) Formação de particulado fino [em kg de PM<sub>2.5</sub> equiv.];
- (iii) Consumo de água [em m<sup>3</sup>];
- (iv) Eutrofização de corpos d'água [em kg de Fósforo equiv.];
- (v) Depleção de metais [em kg de Cobre equiv.];
- (vi) Acidificação terrestre [em kg de SO<sub>2</sub> equiv.];
- (vii) Ecotoxicidade terrestre [em kg de 1.4-Diclorobenzeno equiv.];
- (viii) Depleção de recursos fósseis [em, kg de petróleo equiv.];
- (ix) Ecotoxicidade aquática [em kg de 1.4-Diclorobenzeno equiv.];
- (x) Toxicidade humana à elementos cancerígenos [em kg de 1.4-Diclorobenzeno equiv.];
- (xi) Toxicidade humana à elementos não-cancerígenos [em kg de 1.4-Diclorobenzeno equiv.].

Em seguida, os resultados da AICV foram normalizados de acordo com os fatores de normalização “*ReCiPe 2016 v1.1 (H), Midpoint Normalization, World, excl. biogenic carbon (person equivalents)*”, apresentado por Huijbregts *et al.* (2016), disponibilizados via *software* GaBi, versão 9.2.1.68, conforme Apêndice C.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ICV

Os dados coletados no decurso do estudo de caso são apresentados nesta seção, tanto sobre o referencial de um ciclo completo de fresamento da engrenagem de estudo, quanto o fluxo de referência previamente definido, e dizem respeito à: consumo de energia combinado com os tempos de permanência da máquina-ferramenta em cada modo de uso; quantidade de consumíveis empregados e resíduos gerados.

#### 4.1.1 Dados do estudo dos tempos de operação

A Figura 18 ordena, em sequência cronológica, os tempos em cada modo de uso da máquina para o processo de fresamento de dentes da engrenagem do estudo, e, mostra também o somatório de tempos para cada modo de uso, em escala absoluta e percentual. Duração dos modos de uso no fresamento da engrenagem

Figura 18 - Duração dos modos de uso no fresamento da engrenagem

| Intervalo de tempo transcorrido [em segundos] | Modo de Uso                 | Atividade   |
|---|-----------------------------|---|
| 0-1   | <i>READY FOR PROCESSING</i> | Máquina ligada para início de operação  |
| 1-5   | <i>WARM UP</i>              | Aproximação dos eixos e ajuste de velocidade da mesa porta-peça e da fresa-caracol                                |
| 5-135   | <i>PROCESSING</i>           | Passe de desbaste   |
| 135-140                                       | <i>WARM UP</i>              | Reposicionamento dos eixos e ajuste de velocidade da mesa porta-peça e da fresa-caracol                           |
| 140-175                                       | <i>PROCESSING</i>           | Passe de acabamento   |
| 175-195                                       | <i>WARM UP</i>              | Posicionamento dos eixos no referencial 0, e troca da peça finalizada por peça semi-acabada pelo braço robotizado |
| 195-200                                       | <i>READY FOR PROCESSING</i> | Máquina à espera de novo ciclo de fresamento  |

|  |     |       |
|--|-----|-------|
| Tempo Total Estado " <i>PROCESSING</i> ", em [s] e [%]           | 165 | 82.5% |
| Tempo Total Estado " <i>WARM UP</i> ", em [s] e [%]              | 29  | 14.5% |
| Tempo Total Estado " <i>READY FOR PROCESSING</i> ", em [s] e [%] | 6   | 3.0%  |

Fonte: Elaborado pelo autor

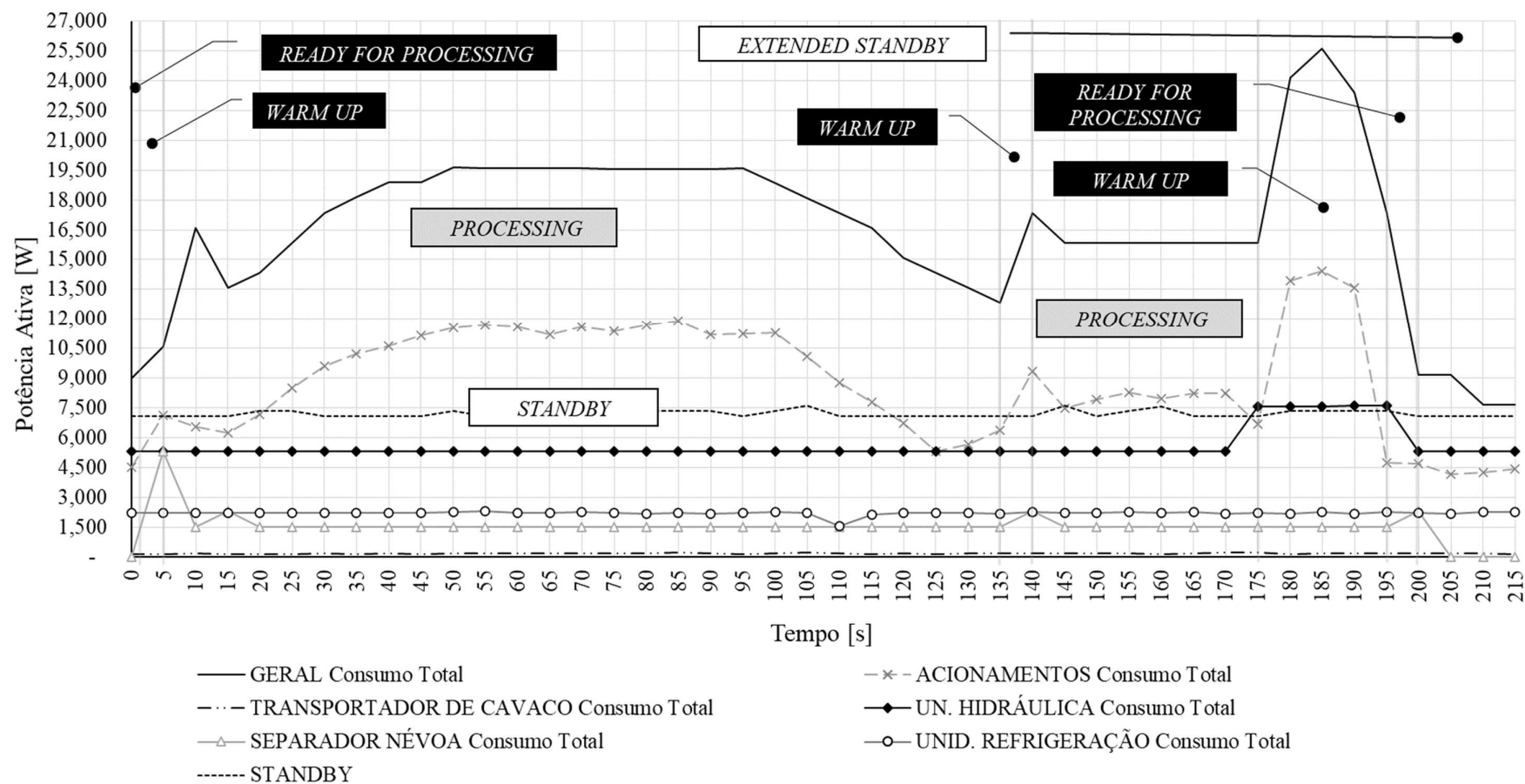
O tempo total de ciclo de fresamento da engrenagem de estudo é de 200 segundos, composto por 3 estados distintos de operação da máquina, sendo o estado de operação “*Processing*” o mais longo (82,5%), e o modo de uso “*Warm-up*” também relevante em termos de duração (14,5%). E, por fim, o estado de operação “*Ready For Processing*” corresponde ao restante para completar o ciclo (3,0%). Este perfil de utilização é típico para máquinas-ferramenta que operam em produção por lotes, no qual se procura maximizar as atividades que agregam valor à cadeia produtiva.

#### **4.1.2 Dados do estudo de potência ativa empregada no fresamento**

A medição de potência e energia elétrica foi efetuada em tempo real a cada 5 segundos, ao longo do ciclo completo de fresamento da engrenagem de estudo, por meio do dispositivo Fluke 435. O processo foi repetido cinco vezes para que se pudesse medir os parâmetros mencionados para a máquina-ferramenta e suas subunidades de acionamentos dos eixos lineares, rotativos e *Spindle*; unidade hidráulica; unidade de refrigeração; transportador de cavacos e separador de névoa (Figura 19). Em seguida, foi calculada a média aritmética das medições efetuadas. Ao final, também foi conduzida uma medição no estado de operação “*Extended Standby*” e *Standby*”.

Até o mês de junho de 2018, a máquina-ferramenta empregada neste estudo de caso era equipada com o sistema de lubrificação e refrigeração de corte convencional, ou seja, por jato líquido de óleo de corte na zona de corte. Naquele período, não foi realizado um estudo detalhado por estado de operação da máquina-ferramenta, contudo, medições do consumo geral de energia realizadas pela empresa, apontaram o valor médio de 0,85 kW.h, considerando a etapa de remoção de material da mesma engrenagem do estudo de caso.

Figura 19 - Potência Ativa ao longo de um ciclo de fresamento da engrenagem de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 4 apresenta os resultados agregados de consumo de energia elétrica para cada estado de operação da máquina-ferramenta, assim como os valores convertidos para a base do fluxo de referência “fresamento de 0,67 cm<sup>3</sup>/segundo da liga de aço 20MnCr5 modificado, oriundo de peça semi-acabada, resultando em uma engrenagem com 32 dentes helicoidais”.

Tabela 4 - Consumo de Energia por Estado de Operação da Máquina-ferramenta

| Estado de Operação da Máquina | Consumo de Energia por Peça [kW.h] | Consumo de Energia na base "Fluxo de referência" [kW.h/s] | Consumo de Energia [%] |
|-------------------------------|------------------------------------|---|------------------------|
| <i>PROCESSING</i>             | 0.785                              | 0.00475   | 76.5%                  |
| <i>WARM-UP</i>                | 0.162                              | 0.00557   | 15.8%                  |
| <i>READY FOR PROCESSING</i>   | 0.016                              | 0.00264   | 1.5%                   |
| <i>EXTENDEND STANDBY</i>      | 0.033                              | 0.00227   | 3.3%                   |
| <i>STANDBY</i>                | 0.030                              | 0.00200   | 2.9%                   |

Fonte: Elaborado pelo autor

A maior parcela do consumo de energia corresponde ao estado “*Processing*” (76,5%), seguido do estado de operação “*Warm-up*” (15,8%), e, demais estados de operação agregados (7,7%). O modo “*Warm-up*” apresentou o maior valor (0,00557 kW.h) quando o consumo de energia foi convertido à base do Fluxo de Referência.

A Tabela 5 apresenta as faixas de rotação do *spindle* porta-fresa e avanço axial de corte, e, os valores de consumo de energia obtidos em medições com a máquina-ferramenta no estado “Em processamento”. Em seguida, o consumo de energia é ordenando na Tabela 6, em termos de consumo por peça, de consumo por segundo de operação unitária de fresamento e percentual, em referência ao ciclo completo de fresamento de uma engrenagem.

Tabela 5 - Energia consumida em kW.h no estado “*Processing*” para diferentes Parâmetros de Corte

| Faixa de velocidade angular do <i>spindle</i> | Faixa de avanço axial da fresa caracol         |              |              |              |              |              |              |
|---|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|   | 2.3 mm / giro da mesa porta-peça (-7% / + 10%) |              |              |              |              |              |              |
| 470 RPM (- 5% / + 12%)                        | <b>0.690</b>                                   | <b>0.722</b> | <b>0.737</b> | <b>0.769</b> | <b>0.785</b> | <b>0.816</b> | <b>0.839</b> |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 6 - Consumo de Energia no Estado “em processamento” da máquina-ferramenta

| Estado de Operação "Em Processamento"                                      | Consumo de Energia por Peça [kW.h] | Consumo de Energia na base "Fluxo de referência" [kW.h/segundo] | Consumo de Energia [%] |
|--|------------------------------------|---|------------------------|
| <i>Medição 5</i>   | 0.690                              | 0.00418   | 74.2%                  |
| <i>Medição 4</i>   | 0.722                              | 0.00438   | 75.0%                  |
| <i>Medição 3</i>   | 0.737                              | 0.00447   | 75.4%                  |
| <i>Medição 2</i>   | 0.769                              | 0.00466   | 76.2%                  |
| <b><i>Medição 1</i></b><br><b>(configuração atual do processo seriado)</b> | <b>0.785</b>                       | <b>0.00475</b>  | <b>76.5%</b>           |
| <i>Medição 6</i>   | 0.816                              | 0.00495   | 79.6%                  |
| <i>Medição 7</i>   | 0.839                              | 0.00508   | 81.9%                  |

Fonte: Elaborado pelo autor

Mantidos os demais estados de operação da máquina inalterados, a variação no consumo geral de energia pela máquina-ferramenta foi de 9,4%, frente às variações de 17% nos parâmetros de corte mencionados anteriormente.

#### 4.1.3 Dados do estudo de consumíveis

O consumo de material semi-acabado para fresamento, uso de ferramenta de corte e fluido de corte em forma de névoa distribuído pelo sistema MQL, ocorrem durante o estado de operação “*Processing*”, quando a peça recebe o esforço de corte da ferramenta. Deste modo, todos os resultados de inventário realizados estão concentrados neste estado de operação da máquina-ferramenta.

Em cada ciclo de fresamento da engrenagem de estudo, a matéria-prima na forma de disco de aço torneado, cuja massa é de 15,0 Kg e volume é de 1901,14 cm<sup>3</sup>, é fixada na mesa da máquina-ferramenta. Em relação ao fluxo de referência, obtém-se 75 g/segundo ou 9,506 cm<sup>3</sup>/segundo.

O fluido de corte consumido no fresamento da engrenagem de estudo é um óleo de corte mineral, contendo aditivo de extrema pressão, indicado para MQL. Este óleo é abastecido no reservatório da máquina, e posteriormente, misturado ao ar comprimido, e injetado na zona de corte por intermédio de sistema de lubrificação MQL. O montante de óleo consumido por engrenagem foi obtido pelo monitoramento de consumo durante 100 horas de operação desta máquina-ferramenta, equivalentes à produção de 1532 engrenagens de estudo. O consumo de óleo totalizado no período foi de 11,0 litros, ou, seja, 7,18 ml por engrenagem, e, 0,036 ml / segundo.

Registros históricos do departamento de manutenção da empresa, entre os anos de 2013 e 2017, indicam um consumo médio de 687,5 litros de óleo mineral de corte para cada 100 horas de operação desta máquina ferramenta, ou seja, 448,76 ml por engrenagem, e, 2,24 ml / segundo.

Em relação ao consumo de ferramentas de usinagem, o indicador neste estudo é o consumo de fresa-caracol por produção de engrenagens. Dados históricos de produção indicam que é possível produzir 450 engrenagens, de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos, antes do envio da ferramenta para reafiação. Isto significa que cada ciclo de fresamento de engrenagem consome 0,0022 fresa-caracol, e a conversão para a base do fluxo de referência resulta em 0,000011 fresa-caracol consumida por segundo. Este nível de consumo é insignificante, e, portanto, não foi considerado na AICV.

#### **4.1.4 Dados do estudo de emissões**

As emissões relacionadas ao processo de manufatura estudado compreenderam o ar filtrado pelo separador de névoa da máquina-ferramenta, cuja concentração de névoa e fumos de óleo era menor que  $5 \text{ mg/m}^3$ , e, o ar aquecido à  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  dissipado pelo trocador de calor no ambiente da planta de manufatura. Nenhuma destas emissões extrapolou os limites estipulados pela Norma Regulamentadora nº15 (NR-15), segundo verificações periódicas do nível de qualidade do ar pelo departamento de engenharia ambiental da empresa. Por esta razão, entendeu-se que estas emissões tenham baixa relevância para a AICV subsequente, no escopo desta pesquisa.

## **4.2 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação**

Os dados de entradas e saídas do sistema “Fresadora de Dentes”, estratificados na forma de ICV, foram combinados com dados de *background* para a construção de um modelo no *software* GaBi, assim como o posterior cálculo dos impactos ambientais. O modelamento do processo de fresamento de dentes incluiu as entradas: consumo de matéria-prima, neste caso, o semi-acabado forjado e torneado a partir da liga de aço 20MnCr5; o consumo de energia elétrica para acionar a fresadora, e, o consumo de óleo mineral de corte. Por sua vez, as saídas deste processo foram a engrenagem com os 32 dentes fresados, os cavacos metálicos e a fração do óleo mineral de corte contaminado durante a operação de fresamento.

A partir da ICV fundamentada no processo elementar proposto pela metodologia *UPLCI*, extrapolou-se o volume de produção para uma base anual, correspondendo a 80.000



unidades da engrenagem helicoidal utilizada no estudo de caso mencionado. A fim de se retratar adequadamente o ICV da matéria-prima, foi considerada desde a extração de minérios até a disponibilização do material na forma de lingotes de aço, que serviram de entrada para a produção do semi-acabado forjado e torneado.

A análise dos impactos ambientais foi realizada segundo o método ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H), que era a versão disponível no *software* GaBi, versão 9.2.1.68 – *Education Database* 2020, durante o período de análise, ocorrido ao longo do segundo semestre de 2020.

#### 4.2.1 Análise de Sensibilidade

A AICV foi construída a partir de quatro cenários, que representam condições de produção distintas das engrenagens helicoidais de acordo com o Quadro 5. Esta premissa propiciou uma análise de sensibilidade ampla, considerando as onze categorias de impacto citadas. Os cenários C e D trazem propostas de melhoria pela redução do consumo de energia pela máquina-ferramenta, durante a operação de fresamento de dentes.

Quadro 5 - Cenários desenvolvidos na AICV do processo de fresamento de dentes

| Código do Cenário  | Descrição   |
|--|---|
| A. Lubrificação convencional                                       | Configuração de produção da fresadora vigente até meados de 2018.   |
| B. MQL   | Configuração de produção da fresadora após meados de 2018 e vigente na atualidade.  |
| C. MQL [E] <i>Standby</i> otimizado                                | Configuração futura de produção composta pelo Cenário B, com uma redução de 70% do tempo em estado <i>Standby</i> e <i>Standby</i> estendido, após avaliação do time multifuncional de empresa. |
| D. MQL [E] <i>Standby</i> otimizado [E] Potência de corte reduzida | Configuração teórica de produção composta pelo cenário C, com uma redução de 12% na energia consumida no estado <i>Processing</i> , como resultado da análise apresentada na Tabela 6.          |

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 20 traz a comparação de impactos ambientais para as onze categorias selecionadas e normalizadas, segundo o método ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H), através de quatro cenários distintos de produção de engrenagens. A categoria de depleção de recursos fósseis apresentou a maior pontuação na escala [pessoa equivalente] entre as onze categorias analisadas, sendo, aproximadamente, 3.400 vezes superior à pontuação da categoria depleção de metais, uma vez que a geração de energia global é bastante dependente de fonte de recursos não-renováveis. Quatro das onze categorias totalizaram 80% dos valores obtidos na análise pela

escala [pessoa equivalente]: depleção de recursos fósseis (43%), mudanças climáticas (19%), acidificação terrestre (11%) e consumo de água (8%). Este ordenamento de impactos ambientais está congruente com as observações de outros pesquisadores, entre eles, Camposeco-Negrete e Calderón-Nájera, (2019), que associaram a utilização de óleos lubrificantes na indústria de manufatura diretamente ao aquecimento global e depleção de recursos fósseis, enquanto, Feiferytè, *et al.* (2015) destacaram, que mesmo o emprego de lubrificantes biossintéticos poderia causar impactos potenciais de acidificação terrestre, e ainda, Sharma *et al.* (2020), Awad *et al.* (2018), Zeng *et al.* (2018), Bevilacqua *et al.* (2017), entre outras fontes citadas no capítulo 2.1, que associaram o consumo de energia em manufatura à altos impactos potenciais em mudanças climáticas, pela oferta global de energia ainda bastante dependente de recursos não-renováveis.

O exame da Figura 21 revelou que os cenários propostos para redução de inventários do processo de fresamento têm efeito limitado nas quatro categorias citadas anteriormente, sendo a maior contribuição percebida na categoria de redução da depleção de recursos fósseis (12%). Este resultado pode ser justificado pela redução de impactos causado somente no processo de fresamento de dentes, ao longo de toda a cadeia de produção das engrenagens, principalmente as fases de obtenção de matéria-prima, muito mais intensas, em termos de consumo de energia.

A contribuição do emprego dos fluídos de corte sobre os impactos ambientais é destacada também na Figura 21, em várias categorias de impacto, uma vez que este cenário de produção ainda retrata o uso da lubri-refrigeração convencional de corte, alta consumidora de lubrificantes.

As Figuras 21 e 22 apresentam comparativamente as contribuições dos fluxos de entrada e saída no sistema “Fresadora de Dentes” para os cenários A e D, descritos no Quadro 5. A escolha destes cenários teve o propósito de mostrar as maiores diferenças entre o cenário de produção original (A) e aquele contendo todas as propostas de reduções de inventário no processo elementar de fresamento de dentes (D).

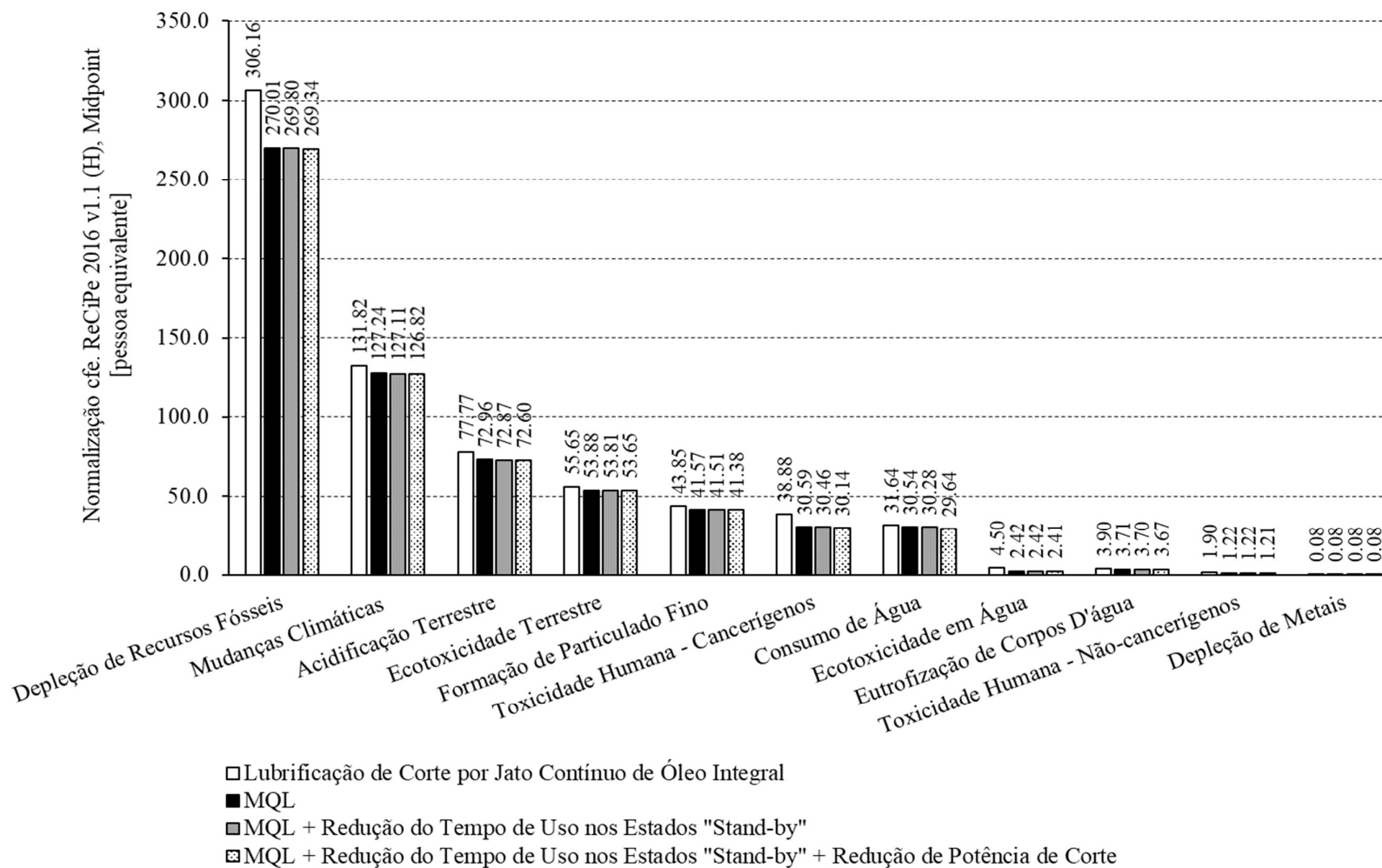
A matéria-prima, na forma de aço liga 20MnCr5, contribuiu com mais de 75% dos impactos ambientais, na média das onze categorias normalizadas, nos quatro cenários avaliados. Em seguida, em ordem decrescente de contribuição para os impactos: uso de fluídos de corte (15%), forjamento e torneamento da matéria-prima e fresamento de dentes (10%). Em ACV comparativa de fabricação de engrenagens por usinagem e manufatura aditiva, considerando a mesma liga metálica, Jiang *et al.* (2019) destacaram a importância dos fluxos

de materiais e insumos na produção de engrenagens, ao demonstrar que a carga ambiental decorrente da usinagem seria mais de 160 vezes superior àquela atribuída à manufatura aditiva, principalmente pelo uso de matérias-primas e insumos de produção, cujas origens podem ter vindo de fontes não-renováveis de energia e materiais.

A comparação entre as Figuras 21 e 22 ainda revela que a participação dos fluídos de corte como contribuidor de impactos ambientais potenciais se reduziu drasticamente, na média das onze categorias de impactos analisadas, após a introdução do MQL, de 8,8% para 0,2%. Neste sentido, houve uma correspondência com os resultados apresentados por Fratila (2010), que investigou o processo de fresamento de engrenagens em liga de aço 16MnCr5, incluindo os fluxos de materiais na ACV realizada. Foi constatado que o emprego da tecnologia MQL proporcionava redução de 8% nos impactos ambientais comparativamente ao uso da lubrificação e refrigeração convencionais.

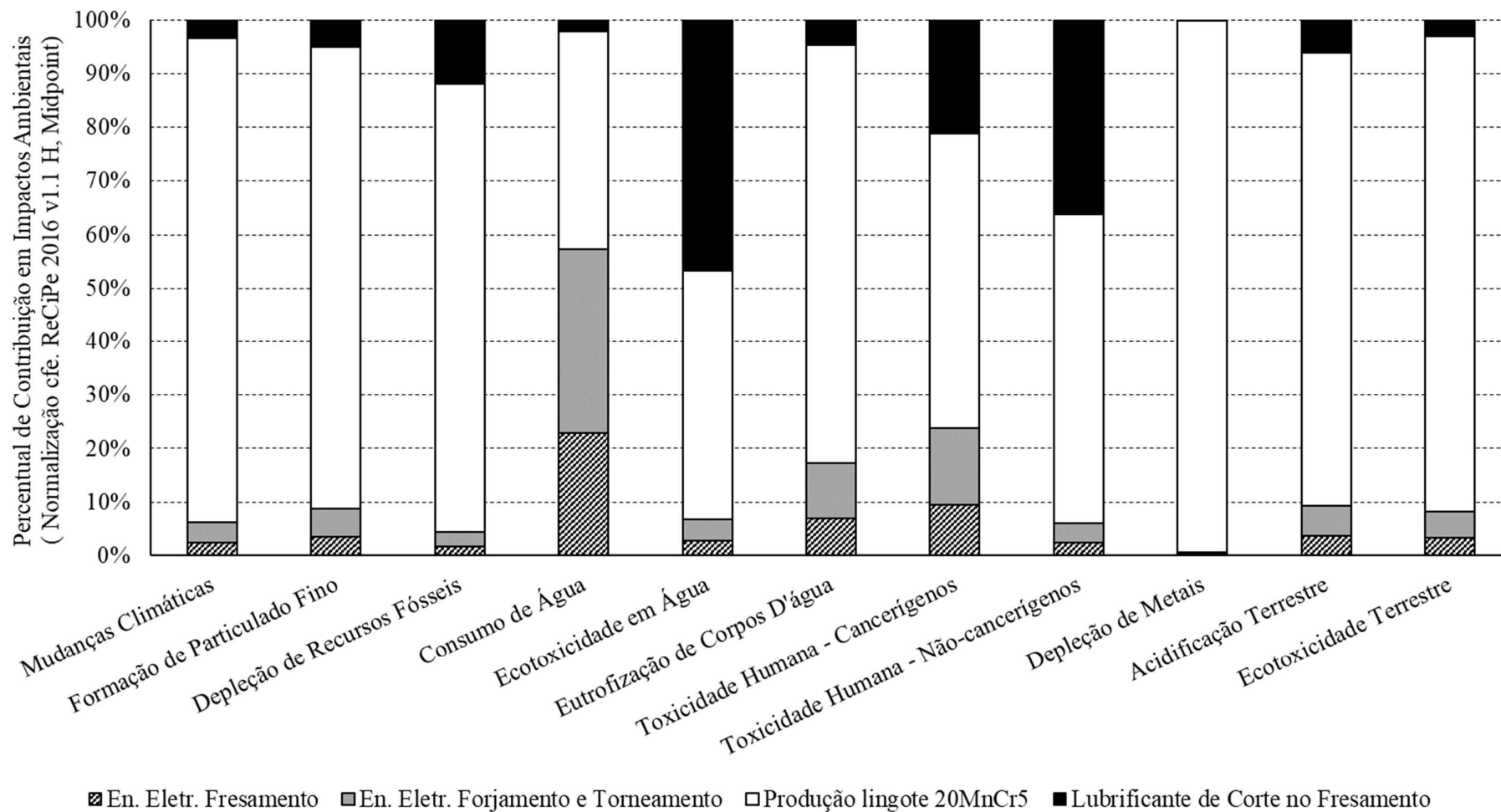
A introdução do MQL, e a consequente redução no consumo de fluídos de corte no processo de fresamento, destaca ainda mais a relevância da matéria-prima das engrenagens em termos de geração de impactos ambientais (Figura 22). Embora a matéria-prima se apresente como o maior *hotspot* do processo elementar de fresamento de dentes, o consumo do aço-liga 20MnCr5 já foi otimizado ao longo da cadeia de produção de engrenagens por décadas de aprimoramento no *design* destes componentes, de maneira que a redução deste *hotspot* seria viável unicamente mediante grandes mudanças tecnológicas nas transmissões para veículos comerciais. A partir desta constatação, as análises seguintes foram direcionadas exclusivamente ao consumo de fluídos de corte e consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta, durante o ciclo de fresamento de dentes das engrenagens.

Figura 20 – Impactos ambientais normalizados pelo método ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H)



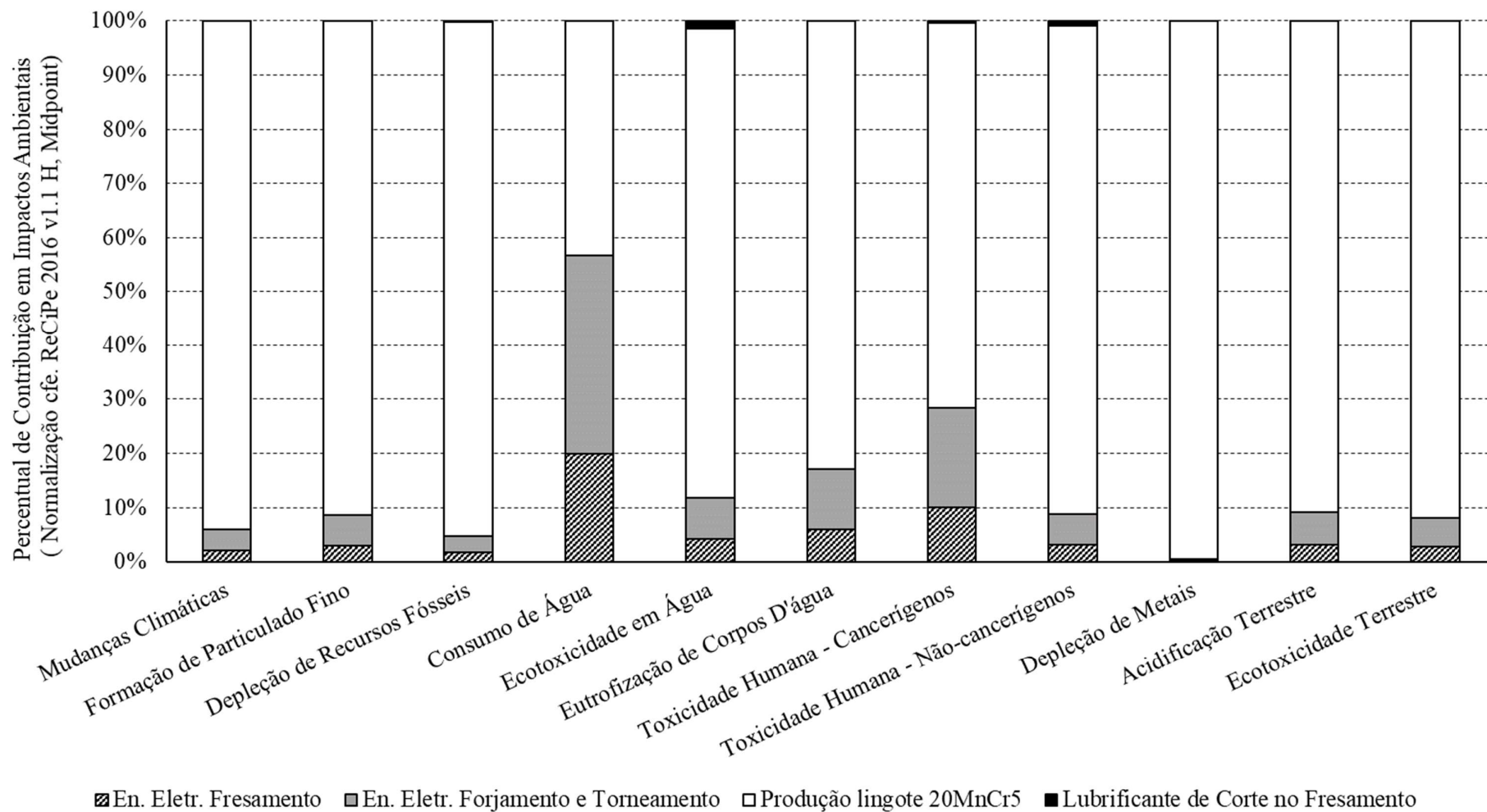
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Análises de Contribuições de Fluxos de Entrada no Sistema “Fresadora de Dentes” – Cenário A



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Análise de Contribuições de Fluxos de Entrada no Sistema “Fresadora de Dentes” – Cenário D



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 23 apresenta os resultados de impactos ambientais classificados em ordem decrescente, a partir da maior redução de impacto para as onze categorias analisadas. As quatro de onze categorias de impacto listadas a seguir representam mais de 85% das reduções de impactos obtidas, quando se compara os resultados do Cenário A - condição original de produção das engrenagens, ao Cenário D – condição otimizada com menor tempo de ciclo em estados improdutivos da máquina-ferramenta, potência de corte reduzido e sistema MQL implementado:

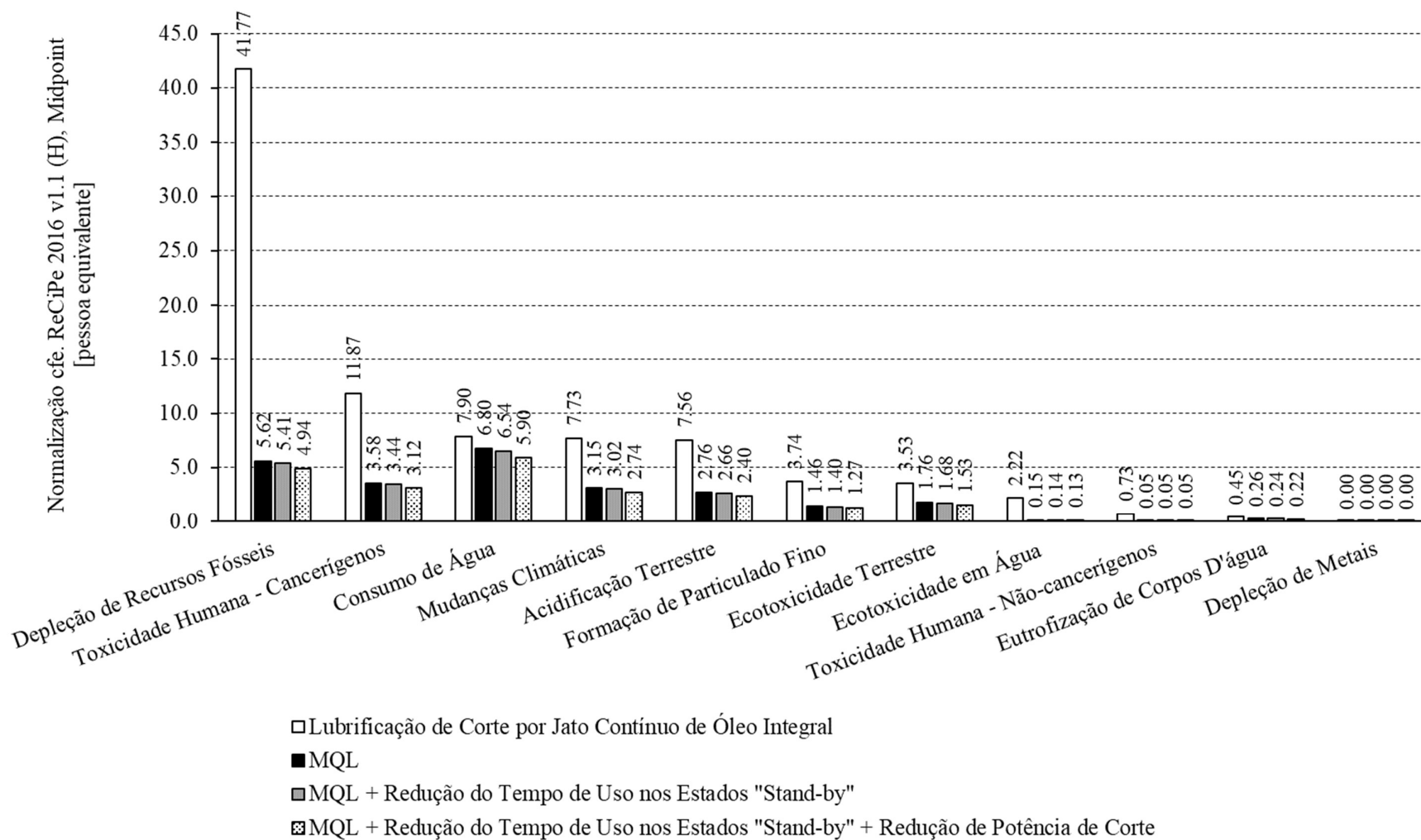
- Depleção de Recursos Fósseis (56,5%);
- Toxicidade Humana - Cancerígenos (13,4%);
- Acidificação Terrestre (7,9%);
- Mudanças Climáticas (7,7%).

Em termos de ICV, a mudança do Cenário A para o Cenário D significou a redução de 98,4% no consumo de fluídos de corte e 18,7% no consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta. Sem os fluxos de entrada correspondentes à produção da matéria-prima das engrenagens no estudo modificado de AICV, as influências do consumo de energia elétrica exclusivamente pela máquina-ferramenta alcançaram elevadas percentagens. Na Figura 24, observa-se, que na média das onze categorias de impacto analisadas, o consumo de energia elétrica é responsável por 93,6% dos impactos ambientais e o consumo de lubrificantes, 6,4%.

Estes resultados podem ser comparados com aqueles da pesquisa de Zeng *et al.* (2018), que demonstraram, que energia elétrica e insumos de produção representariam 84% e 10% exclusivamente na fase de uso destas máquinas-ferramenta, a depender da tecnologia embarcada neste equipamento, tipo e modelo.

Os resultados mostrados na Figura 24 também apresentaram correspondência com as conclusões de Campitelli *et al.* (2019), que investigaram processos de usinagem com diferentes materiais, e, concluíram que, em média, os impactos ambientais potenciais devidos ao consumo de energia pela máquina-ferramenta seriam da ordem de 70%, enquanto a consumo de fluídos de corte responderia por 27% dos impactos.

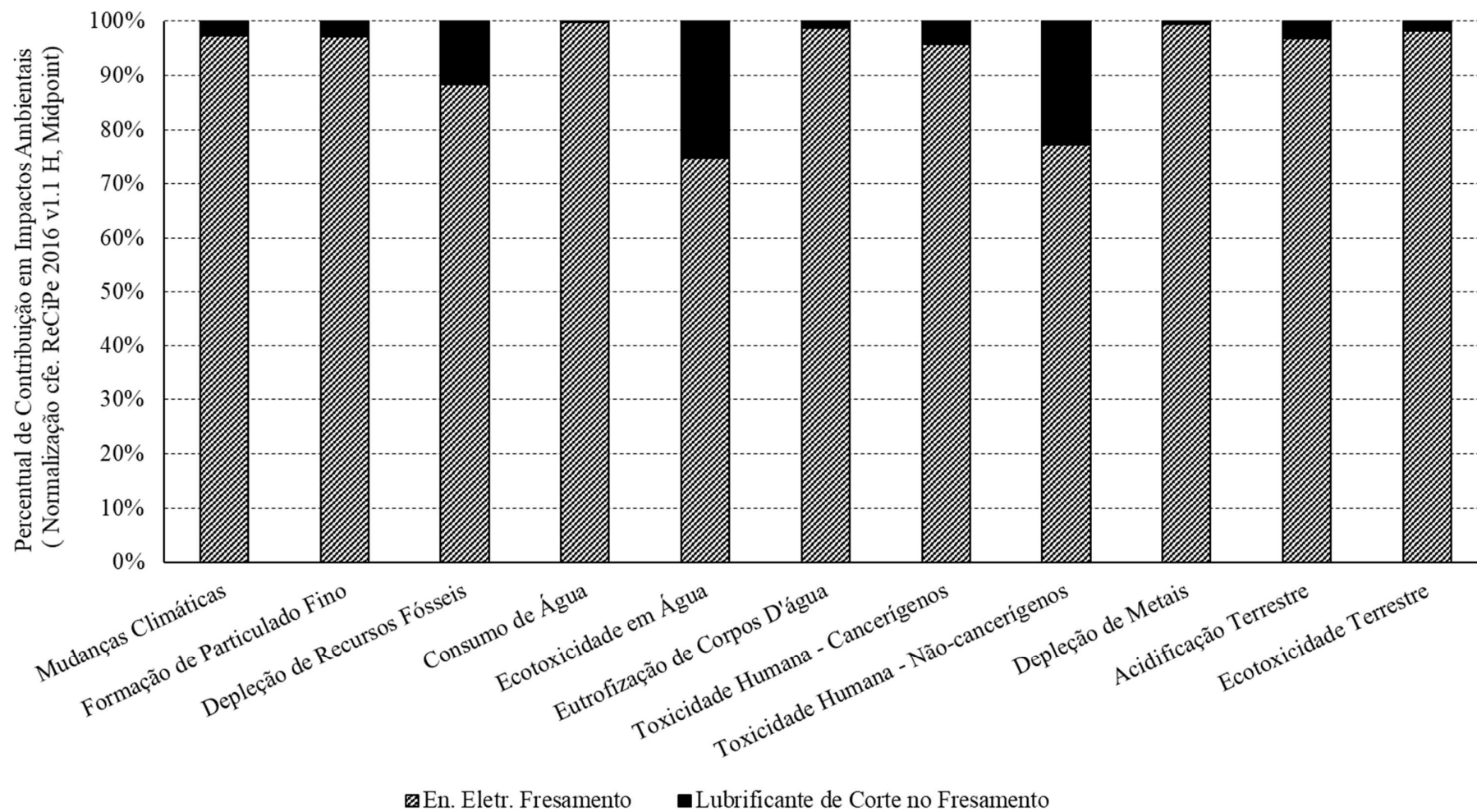
Figura 23 – Impactos ambientais normalizados pelo método ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H), exceto matéria-prima



Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 24 - Contribuições de Fluxos de Entrada no Sistema “Fresadora de Dentes” – Cenário D, exceto matéria-prima



Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 25 e 26 trazem os efeitos em termos de reduções de impactos ambientais após a adoção do MQL e estratégias de diminuição gradual do consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta nos cenários de produção analisados.

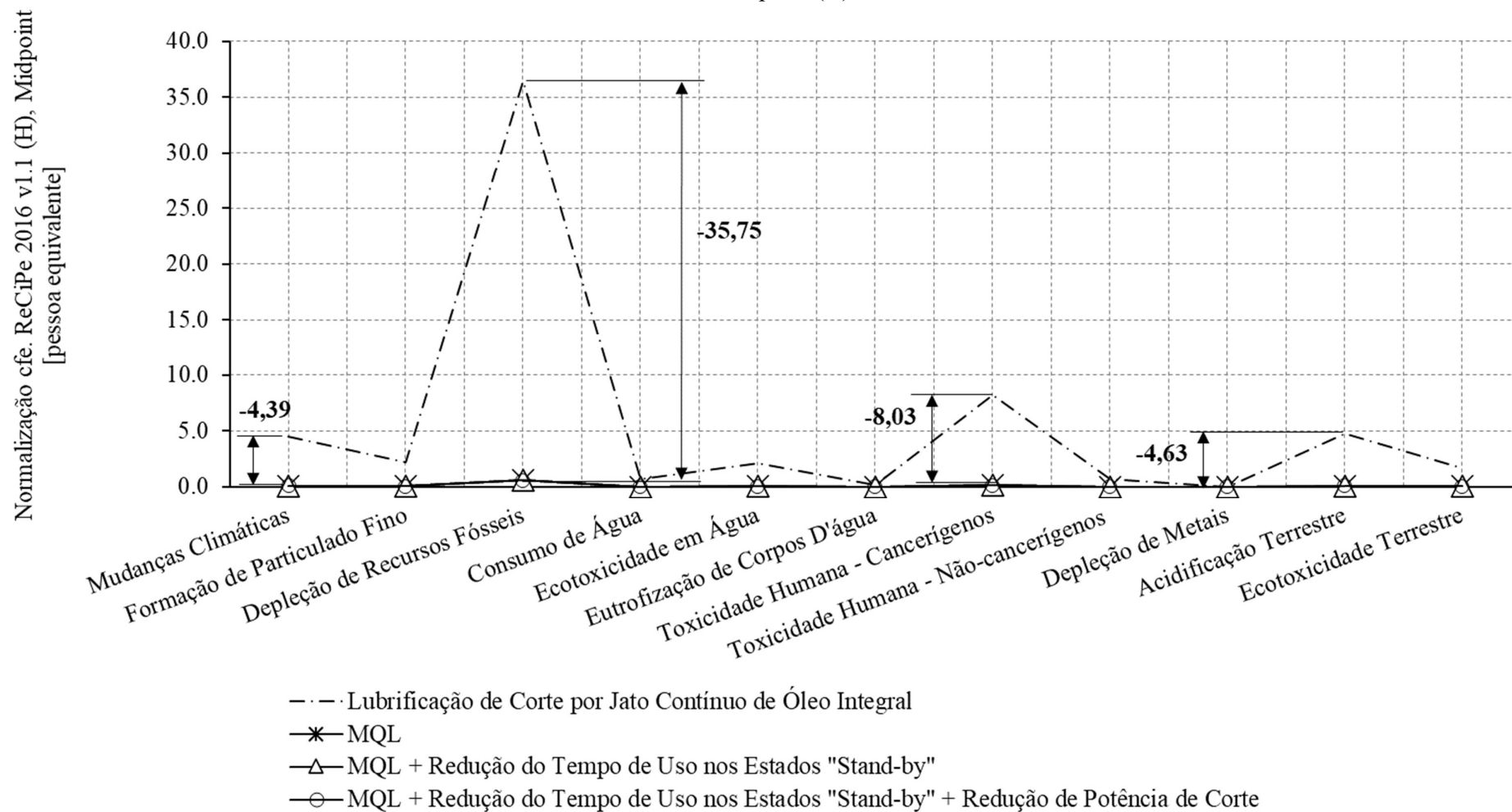
A introdução da tecnologia MQL proporcionou uma redução de 70,77% nos impactos ambientais agregados das onze categorias de impacto normalizadas. Em contrapartida, a redução do consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta proporcionou 3,74% de redução. Desta maneira, a contribuição do sistema MQL na mitigação de impactos ambientais é 19 vezes superior àquela proporcionada pela diminuição do consumo de energia elétrica exclusivamente no processo de fresamento.

Na Figura 25, observou-se significativa redução de 35 pontos na escala pessoa-equivalente na categoria de Depleção de Recursos Fósseis. Este resultado pode ser atribuído, principalmente, à redução de consumo do recurso não-renovável e, também pela menor quantidade de emissões de elementos inorgânicos ao ar. Além disso, destacou-se a categoria de Toxicidade Humana para elementos Cancerígenos, cuja redução alcançou 8,03 pontos na escala pessoa-equivalente, como reflexo na redução das emissões de elementos inorgânicos ao ar devido ao emprego de fluídos de corte.

Na prática, após a introdução do MQL, os operadores de máquinas-ferramenta praticamente não tiveram mais contato com os fluídos de corte, o qual contém substâncias comprovadamente tóxicas para a saúde humana. Tais resultados estão alinhados às conclusões de estudos apresentados por Shashidhara e Jayaram (2010), Shokrani et al. (2012), inclusive, a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer, que alertaram sobre o desencadeamento de doenças ocupacionais, inclusive cânceres, pelo contato com fluídos de corte.

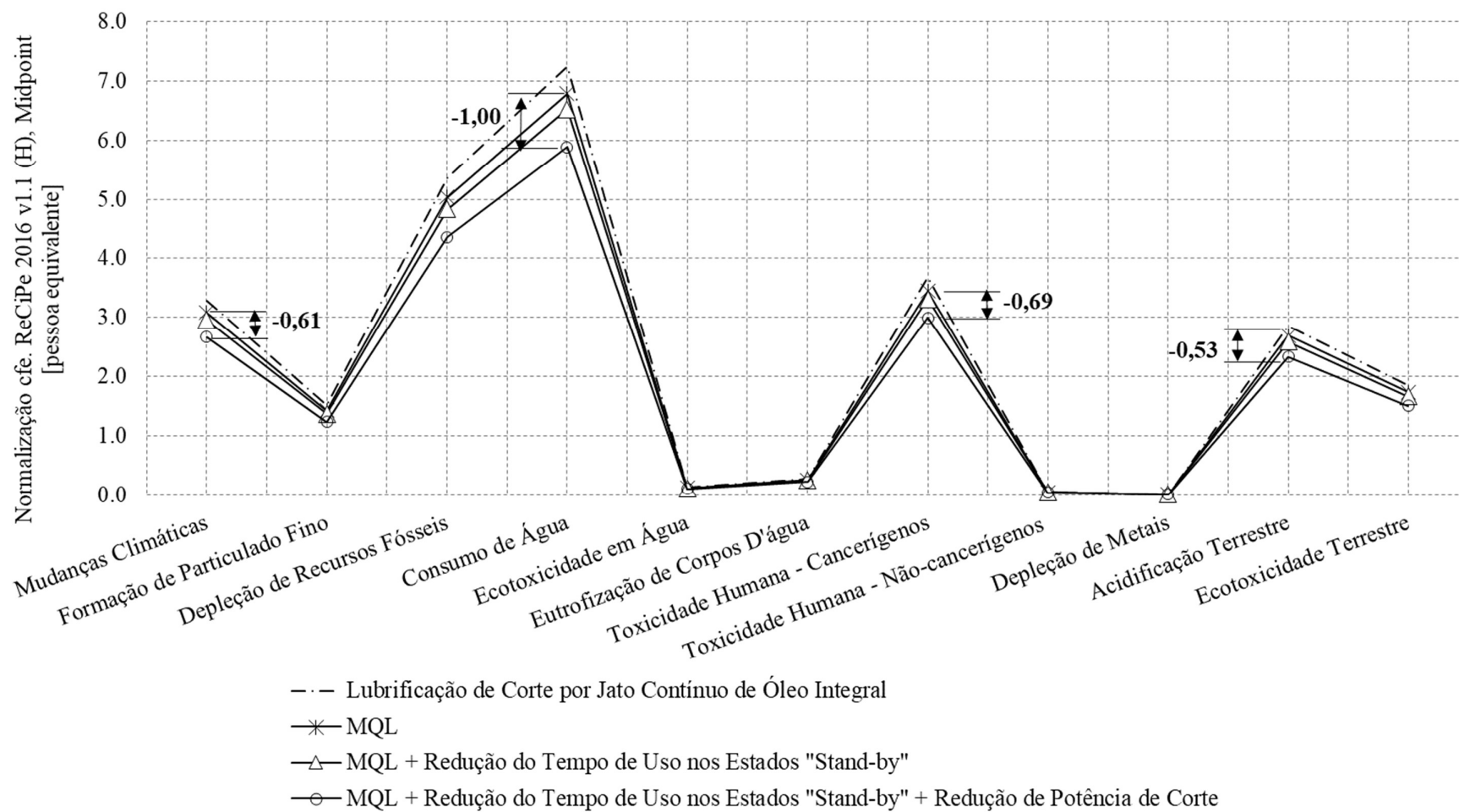
Diferentemente do MQL, a redução do consumo de energia elétrica durante o ciclo de fresamento das engrenagens não causou efeito significativo na redução de impactos ambientais potenciais. No somatório das onze categorias normalizadas, a redução de impactos foi da ordem de 3,3 pontos na escala pessoa-equivalente (Figura 26). Por se tratar de um processo de produção em alta escala, implementado e otimizado ao longo de décadas, há pouco espaço para estratégias de redução do consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta.

Figura 25 – Efeito da redução do consumo de fluido de corte no fresamento de dentes sobre os Impactos Ambientais normalizados por ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Efeito da redução do consumo de energia elétrica no fresamento de dentes sobre os Impactos Ambientais normalizados por ReCiPe 2016, v1.1., Midpoint (H)



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3. Considerações finais sobre os resultados da ACV

Os resultados obtidos na AICV convergem de maneira geral com as conclusões apresentadas em pesquisas citadas no capítulo de revisão bibliográfica. A depleção de recursos fósseis, mudanças climáticas e acidificação terrestre, que representam juntos, em torno de 75% dos impactos ambientais potenciais do processo de usinagem estudado.

O fluxo de entrada de matéria-prima no sistema de produtos “Fresadora de Dentes” é responsável por aproximadamente 75% de todos os impactos ambientais levantados na AICV deste estudo de caso. Esta contribuição majoritária ocorre pois os processos de obtenção de minério de ferro, os processos siderúrgicos e de forjamento do aço têm como característica a elevada demanda de energia para sua realização.

Ao isolar-se o fluxo de matéria-prima no sistema de produto “Fresadora de Dentes”, tornam-se evidentes os aspectos ambientais de consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta e de lubrificantes, os quais passam a contribuir respectivamente com 93,6% e 6,4% dos impactos ambientais potenciais. Estes resultados se comparam àqueles apresentados ao longo da revisão de literatura, onde se demonstrou que o consumo de energia pela máquina-ferramenta poderia causar de 70% a 84% dos impactos ambientais potenciais, e o restante seria atribuído ao uso de lubrificantes.

A introdução de MQL no processo de fresamento de engrenagens contribuiu para uma redução de 70,77% nos impactos ambientais agregados das onze categorias de impacto normalizadas na AICV, quando se excluiu o fluxo de matéria-prima, e, 8,6%, levando-se em conta o fluxo da matéria-prima. De forma semelhante, na revisão de literatura foi identificada uma pesquisa, na qual se relatou 8% de redução nos impactos ambientais potenciais pelo uso de MQL ao invés de lubrificação convencional, no fresamento de engrenagens fabricadas em liga de aço 16MnCr5.

Em contrapartida, a aplicação das estratégias de redução do consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta alcançou 3,74% de redução em impactos potenciais, uma vez que o processo seriado de fresamento de engrenagens é ajustado para obtenção da maior quantidade de peças processadas na unidade de tempo.

## 5. CONCLUSÕES

A realização de pesquisas bibliográfica e bibliométrica, assim como, a ACV comparativa entre os processos de fresamento de engrenagens, fundamentou a elaboração das conclusões da pesquisa destacadas a seguir:

- A revisão de literatura, que serviu para fundamentar o estudo de caso, abordou metodologias de ICV voltadas para sistema de manufatura, o processo de fresamento de dentes de engrenagens e a técnica MQL. Em síntese, esta revisão: 1) partiu de uma base de 249 artigos sobre metodologias de ICV voltadas para sistemas de manufatura, por meio da qual se concluiu que a metodologia mais utilizada na atualidade é a *UPLCI*, que explora o conceito de processo elementar de manufatura; 2) concluiu que os estudos sobre ICV em processos de usinagem são ainda escassos em comparação aos inventários de sistemas de produto, em especial, os processos de fresamento de denteados, cuja busca na base de dados *Web of Science* selecionou apenas três artigos na última década, que explorassem concomitantemente a ACV e o fresamento de engrenagens; 3) evidenciou que o MQL têm emprego amplamente favorável em comparação à lubrificação tradicional, por jato líquido de fluido de corte, pois conduz à redução da geração de resíduos sólidos, do consumo de água, do consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta, além minimização de riscos à saúde ocupacional, pela diminuição do desenvolvimento de doenças como infecções, alergias e cânceres.
- O ICV realizado para o estudo de caso, desenvolvido de acordo com a metodologia *UPLCI* revelou, que: 1) durante o ciclo de fresamento de uma engrenagem, em 76,5% do tempo a máquina-ferramenta ocupa o estado “em processamento”, ou seja, com efetivo trabalho de remoção de material; 2) a introdução do sistema MQL proporcionou uma redução de 98% no consumo de óleo de corte na operação de fresamento de dentes; 3) o consumo de ferramenta, geração de resíduos e emissões foram pouco relevantes no processo estudado. Uma vez que o estudo de caso examinou um processo de usinagem estabelecido há mais de uma década, e, otimizado ao longo deste tempo, encontrou-se pouco espaço para implementação de estratégias que promovessem a redução de consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta.
- Os resultados obtidos na AICV demonstraram que: 1) o uso da matéria-prima, na forma de barras de aço liga 20MnCr5, contribuiu com mais de 75% dos impactos ambientais potenciais, na média das onze categorias normalizadas e nos quatro cenários avaliados, enquanto, o uso de óleo de corte contribuiu com 15%, e, o consumo de energia elétrica pela

- máquina-ferramenta alcançou aproximadamente 4%; 2) o consumo de energia no sistema de manufatura estudado alcançou 53% para as atividades de obtenção de matéria-prima para a produção de engrenagens; 3) o emprego do MQL proporcionou reduções de impactos ambientais da ordem de 8,6%, diretamente associados ao consumo de energia elétrica e dos fluídos de corte.
- O estudo de caso revelou que o consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta não é o *hotspot* na geração de impactos ambientais, como verificado na revisão de literatura, e, sim, a matéria-prima utilizada no processo. Contudo, ao se analisar a questão sob a ampla perspectiva *Cradle-to-Gate*, incluído até o processo de fresamento de engrenagens, o consumo de energia para a produção da matéria-prima e fluídos de corte somados ao consumo do processo de fresamento correspondem à mais de 90% de todos os impactos ambientais levantados na AICV.

O processo de fresamento de engrenagens se diferencia de outros processos de usinagem convencionais, tais como torneamento, fresamento e retífica planas, por apresentar interface complexa entre geometria da peça e ferramenta ao longo do processo de remoção de material. Xiao *et al.*, (2019) apresentou mais de uma dezena de parâmetros de processo tais como módulo, diâmetro externo e velocidade de corte da fresa-caracol, avanço axial do spindle porta-fresa, taxa instantânea entre e profundidade de corte momentânea e a máxima disponível, número de dentes da engrenagem a ser fresada, velocidade angular da mesa porta-engrenagem, além de seis coeficientes empíricos calculados para cada geometria de engrenagem. Todos estes fatores juntos determinam a demanda direta de potência ativa de corte, que, em última instância, reflete no consumo total de energia pela máquina-ferramenta.

Assim, a condução de experimentos adicionais na máquina-ferramenta deste estudo de caso, a fim de se investigar a influência de cada um dos parâmetros de processo acima mencionados, aumentaria consideravelmente o escopo desta pesquisa, que foi desenvolvida em ambiente produtivo, com a máquina-ferramenta operando em regime de produção seriada.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de caso realizado foi considerado um projeto-piloto na área de ACV na empresa onde se conduziu a coleta de dados, contribuindo para a construção de *know-how* sobre ACV. Desta maneira, trabalhos futuros de pesquisa poderiam abranger a execução de novas avaliações de ciclo de vida em outras máquinas-ferramentas do parque produtivo da empresa, associando o tema à Avaliação de Custo de Ciclo de Vida e o Mercado de Crédito de Carbono no Brasil.

Outra linha futura de pesquisa poderia vir a investigar os diversos parâmetros de processo de fresamento, identificando àqueles mais sensíveis à variação do consumo de energia pela máquina-ferramenta, e consequentemente, na geração de impactos ambientais potenciais.



## 7. REFERÊNCIAS

- ABDALLA, H. S.; BAINES, W.; MCINTYRE, G.; SLADE, C. Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium Alloy machining. Part 1. Formulation development. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 1/2, p. 21-33, 2007.
- ABUKHSHIM, N.; MATIVENGA, P.; SHEIKH M. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, p. 782-800, 2006.
- ADAMS, R. J.; SMART, P.; HUFF, A. S. Shades of Grey: Guidelines for Working with the Grey Literature in Systematic Reviews for Management and Organizational Studies. **International Journal of Management Reviews**, v. 19, n. 4, p. 432-454, 2017.
- AGGARWAL, A.; SINGH, H.; KUMAR, P.; SINGH, M. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 42-50, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E3012-16. **Standard Guide for Characterizing Environmental Aspects of Manufacturing Processes**. U.S.A. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2009b.
- AWAD, M.; HASSAN, N. Joint decisions of machining process parameters setting and lot-size determination with environmental and quality cost consideration. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 46, p. 79-92, 2018.
- AZIZPOUR JALALI, M.; MAJD MOHAMMADI, H. Wear mechanisms in high speed steel gear cutting tools. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 4, p. 739-741, 2010.
- BAITZ, M.; OSUMI, M.; YUKIYOSHI H.; FLORIN, H. Life cycle based sustainability solutions: how successful companies turn sustainability solutions into company benefit and business value. **11st International Conference on Ecobalance**, Tsukuba, 2014.
- BENES, J. Cutting the coolant. **American Machinist**, July, p. 36-41, 2007.
- BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F.E.; D’ORAZIO, A.; FORCELLESE, A.; SIMONCINI, M. Sustainability analysis of friction stir welding of AA5754 sheets. **Procedia CIRP** 62, p. 529-534, 2017.

BLACK, J. T.; KOHSER R. A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**, 13 ed. U.S.A.: Wiley, 2019.

BOUZAKIS, K. D.; LILI, E; MICHAILEDIS, N.; FRIDERIKOS, O. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, p. 676–696, 2008.

BRECHER C.; BRUMM, M; KRÖMER, M. Design of Gear Hobbing Processes Using Simulations and Empirical Data. **Procedia CIRP** 33, p. 484-489, 2015.

BRÉCHET, T., & LI, S. The many traps of green technology promotion. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 15, n. 1, p. 73-91, 2013.

BROADBENT, C. Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 11, p. 1658-1665, 2017.

BROCH F.; WARSEN J.; KRINKE S. Implementing Life Cycle Engineering in Automotive Development as a Helpful Management Tool to Support Design for Environment. *In*: SONNEMANN G.; MARGNI M. (ed.). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Dordrecht: Springer, 2015. p. 319-330.

BRUNDAGE, M. P.; LECHEVALIER, D.; MORRIS, K. C. Toward Standards-Based Generation of Reusable Life Cycle Inventory Data Models for Manufacturing Processes. **Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME**, v. 141, n. 2, 2019.

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; MORIS, V. A. S. Uma Revisão De Literatura Sobre Softwares Utilizados Em Estudos De Avaliação Do Ciclo De Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 735–750, 2015.

CAMPOSECO-NEGRETE, C.; CALDERÓN-NÁJERA J. D. Sustainable machining as a mean of reducing the environmental impacts related to the energy consumption of the machine tool: a case study of AISI 1045 steel machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, p. 27-41, 2019.

CAMPITELLI, A.; CRISTÓBAL, J.; FISCHER J.; BECKER, B.; SCHEBEK, L. Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 464-475, 2019.

CAROU, D.; RUBIO, E.M; DAVIM, J.P. "A note on the use of the minimum quantity lubrication (MQL) system in turning", **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 67, n. 3, p. 256-261, 2015.

CHANG, D.; LEE, C.K.M.; CHEN C. Review of life cycle assessment towards sustainable product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 48-60, 2014.

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT, 2015.

CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA K.; OBIKAWA, T; YAMANE, Y. **Metal Machining - Theory and Applications**, Elsevier, 2000, p. 35-80.

CIROTH, A., FOSTER, C., HILDENBRAND, J. *et al.* Life cycle inventory dataset review criteria - a new proposal. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 483–494, 2019.

CITESPACE. **Information on Citespace (2019)**. Disponível em: <http://cluster.cis.drexel.edu/~cchen/citespace/>. Acesso em: 20 de set 2019.

CLARENS A.; ZIMMERMAN J.; KEOLEIAN G.; HAYES K.; SKERLOS S. Comparison of Life Cycle Emissions and Energy Consumption for Environmentally Adapted Metalworking Fluid Systems. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 22, p. 8534-8540, 2008.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 2, p. 273–277, 2013.

CURRAN, M. A. Report on Activity of Task Force 1 in the Life Cycle Inventory Programme: Data Registry – Global Life Cycle Inventory Data Resources. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, p. 284–289, 2006.

DE SILVA, A. K. M.; GAMAGE, J. R.; HARRISON, C. S. Assessment of environmental performance of shaped tube electrolytic machining (STEM) and capillary drilling (CD) of superalloys. **CIRP Annals**, v. 66, e. 1, p. 57–60, 2017.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 8580. **Manufacturing processes - terms and definitions**. Berlin: DIN, 2003.

DIODATO, V. P. **Dictionary of Bibliometrics**. New York: Routledge, 2012.

DUFLOU, J. R.; SUTHERLAND, J. W.; DORNFELD, D.; HERRMANN, C.; JESWIET, J.; KARA, S.; HAUSCHILD, M.; KELLENS, K. Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, p. 587-609, 2012.

DUFLOU, J. R.; KELLENS K.; RENALDI, GUO Y.; DEWULF W. Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 61, p. 63-66. 2012

EASTWOOD, M. D.; HAAPALA, K. R. A unit process model-based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.108, p. 54-64, 2015.

ECOINVENT. **Information on Ecoinvent 3.5 (2018)**. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/support/documents-and-files/information-on-ecoinvent-3/information-on-ecoinvent-3.html#3123>. Acesso em: 17 de jul 2019.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and**

**Action Steps.** First edition March 2010. EUR 24378 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

FEIFERYTĖ, A.; DVARIONIENĖ, J.; GUMBYTĖ, M. Assessment of properties and life cycle of biosynthetic oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 281-290, 2015.

FILLETI, R. A. P.; SILVA, D. A. L.; SILVA, E. J.; OMETTO, A. R. Dynamic System for Life Cycle Inventory and Impact Assessment of Manufacturing Processes. **21st CIRP Conference of Life Cycle Engineering**, v. 15, p. 531-536, 2014.

FILLETI, R. A. P.; SILVA, D. A. L.; SILVA, E. J.; OMETTO, A. R. Productive and environmental performance indicators analysis by a combined LCA hybrid model and real-time manufacturing process monitoring: A grinding unit process application. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 510-523, 2017.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FIRMINO, A. S. **Green Manufacturing: Avaliação do Ciclo de Vida de Processos de Usinagem de Tubos de Alumínio.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2020.

FRATILA, D. Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. **Journal of Cleaner Production**, v.18, n. 10–11, p. 1031–1039, 2010.

GAMAGE J. R.; DE SILVA A. K. M. Assessment of Research Needs for Sustainability of Unconventional Machining Processes. **Procedia CIRP 26**, p. 385-390, 2015.

Gamage J. R.; DE SILVA, A. K. M.; HARRISON, C. S.; HARRISON, D. K. Process level environmental performance of electrodischarge machining of aluminium (3003) and steel (AISI P20). **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 291–299, 2016.

GERMANI, M.; MANDOLINI, M.; MARCONI, M.; MENGARELLI, M. A Method to Assess the Environmental Profile of In-House Machining Processes. **21st Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 10th International Conference on Micro- and Nanosystems American Society of Mechanical Engineers**, v. 4, p. V004T05A039, 2016.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-Indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment.** The Netherlands: PRé Consultants B.V., 2001.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A. D.; STRUIJS, J.; ZELM, R. **ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterization**, 1 ed., 2009.

GOINDI, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: A step towards sustainable machining - Challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557-1571, 2017.

- GRZESIK, W. "Dry and semi-dry machining". *In: GRZESIK, W. (ed.). **Advanced Machining Processes of Metallic Materials***. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 226-245.
- GUINÉE, J. B. Handbook on Life Cycle Assessment. An Operational Guide to the ISO Standards. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, p. 311-313, 2001.
- GUINÉE, J. B.; R. HEIJUNGS, G.; HUPPES, A.; ZAMAGNI, P.; MASONI, R.; BUONAMICI, T.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life cycle assessment: past, present and future. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 90-96, 2011.
- GUINÉE, J. B. Selection of Impact Categories and Classification of LCI Results to Impact Categories. *In: HAUSCHILD, M.; HUIJBREGTS, M. (ed.). **Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment***. Dordrecht: Springer, 2015, p. 17-38.
- GUPTA, M. K.; SONG, Q.; LIU, Z.; PRUNCU, C. I.; MIA, M.; SINGH, G.; LOZANO, J. A.; CAROU, D.; KHAN, A. M.; JAMIL, M.; PIMENOV D. Y. Machining characteristics based life cycle assessment in eco-benign turning of pure titanium alloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, 2020.
- HAAPALA, K.; ZHAO, F.; CAMELIO, J.; SUTHERLAND, J.; SKERLOS, S.; DORNFELD, D.; JAWAHIR, I. S.; CLARENS, A.; RICKLI, J. A Review of Engineering Research in Sustainable Manufacturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 135, 2013.
- HAUSCHILD, M.; HUIJBREGTS, M. Introducing Life Cycle Impact Assessment. *In: HAUSCHILD, M.; HUIJBREGTS, M. (ed.). **Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment***. Dordrecht: Springer, 2015, p. 1-16.
- HENRIKSEN, T.; ASTRUP, T. F.; DAMGAARD, A. Linking data choices and context specificity in life cycle assessment of waste treatment technologies: A landfill case study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, p. 1039-1049, 2017.
- HOFFMEISTER, B. **Über den Verschleiß am Wälzfräser**. Diss. RWTH, Aachen, 1970.
- HONG, S. Y.; BROOMER, M. Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 2, p. 157-166, 2000.
- HONG, S. Y.; ZHAO, Z. Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 1, p. 107-116, 1999.
- HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; *et al.* ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, e. 2, p. 138–147, 2017.

IBICT. **O que é SICV Brasil?** Disponível em: <http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv>. Acesso em: 20 de jun 2020.

IBICT. **Guia Qualidata: requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida.** Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia- Ibict, Brasília: 2017. 58 p. ISBN: 978-85-7013-119-5

INGARAO, G. Manufacturing strategies for efficiency in energy and resources use: The role of metal shaping processes. **Journal of Cleaning Production**, v. 142, p. 2872–2886, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **IEA Data and Statistics.** Disponível em <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD>. Acesso em: 19 de out 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 14040. **Environmental management - life cycle assessment - principles and framework.** Genebra: ISO, 2009a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 14044. **Environmental management - life cycle assessment - principles and framework.** Genebra: ISO, 2009b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 14045. **Environmental management – Eco-efficiency assessment of product systems – principles, requirements and guideline.** Genebra: ISO, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 14955-1. **Machine Tools e Environmental Evaluation of Machine Tools e Part 1: Design methodology for Energy-efficient Machine Tools.** Genebra: ISO, 2017.

JIANG, Q.; LIU, Z.; LI, T.; CONG, W.; ZHANG H. Energy-based life-cycle assessment (Em-LCA) for sustainability assessment: a case study of laser additive manufacturing versus CNC machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9, p. 4109-4120, 2019.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p. 324-330, 2003.

KAMATA, Y.; OBIKAWA, T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192-193, p. 281-286, 2007.

KAMPS, T.; LUTTER-GUENTHER, M., SEIDEL, C.; GUTOWISKI, T.; REINHART, G. Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 21, p. 47–60, 2018.

KARA, S.; LI, W. Unit process energy consumption models for material removal processes. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 60, p. 37-40, 2011.

KELLENS, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M. Z.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 1, p. 69-78, 2012a.

KELLENS, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M. Z.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 242-251, 2012b.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. "Dry cutting". **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 46, n. 2, p. 519-522, 1997.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; BAYRAMOGLU, M.; DEMIRBAS, E.; TOLGA SIMSEK, B. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 159-166, 2013a.

KURAM, E., OZCELIK, B., DEMIRBAS, E. Environmentally friendly machining: vegetable based cutting fluids. *In*: PAULO DAVIM, J. (ed.). **Green Manufacturing Processes and Systems**. Berlin Heidelberg: Springer, 2013b, p. 23-47.

KURGIN, S.; DASCH, J. M.; SIMON, D. L.; BARBER, G. C.; ZOU, Q. "Evaluation of the convective heat transfer coefficient for minimum quantity lubrication (MQL)", **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 64, n. 6, p. 376-386, 2012.

LI, W.; KARA, S. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, n. 9, p. 1636-1646, 2011.

LI, W.; ZEIN, A.; KARA, S.; HERRMANN, C. An investigation into fixed energy consumption of machine tools. **In: Globalized solutions for sustainability in manufacturing: proceedings of the 18<sup>th</sup> CIRP international conference on life cycle engineering**, p. 268-273, 2011.

LINKE, B.; OVERCASH, M. Reusable unit process life cycle inventory for manufacturing: grinding. **Production Engineering-Research and Development**, v. 11, n. 6, p. 643-653, 2017.

LIU, Z. Y.; Guo, Y. B.; SEALY, M. P.; LIU, Z. Q. Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 305-312, 2016.

LIU, N.; ZHANG, Y. F.; LU, W. F. A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling case. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 264-272, 2015.

LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; ANGULO, C.; LAMIKIZ, A.; SÁNCHEZ, J. A. Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 11-15, 2006.

MAMI, F.; REVÉRET, J-P; FALLAHA, S.; MARGNI, M. Evaluating Eco-Efficiency of 3D Printing in the Aeronautic Industry: 3D Printing in Aeronautics through Eco-Efficiency. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. 37-48, 2017.

MATSUHASHI, R; KUDOH, Y; YOSHIDA, Y; ISHITANI, H; YOSHIOKA, M; YOSHIOKA, K. Life cycle of CO<sub>2</sub>-emissions from electric vehicles and gasoline vehicles utilizing a process-relational model. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 2, p. 93-94, 2002.

MAZIIN B.; REVÉRET J. Life Cycle Sustainability Assessment: A Tool for Exercising Due Diligence in Life Cycle Management. *In*: SONNEMANN G.; MARGNI M. (ed.). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Dordrecht: Springer, 2015. p. 51-64.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MIA, M.; GUPTA, M. K.; LOZANO, J. A.; CAROU, D.; PIMENOV, D. Y.; KRÓLCZYK, G., *et al.* Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 121-133, 2019.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 15** – Atividades e Operações Insalubres. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2014.

MORROW, W.; QI, H.; KIM, I.; MAZUNDER J.; SKERLOS, S. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 10, p. 932-943, 2007.

NIE, Y.; LIN, Y-J.; SUN, W.; HUANG, T. A Methodology for Optimal Lightweight Design of Moulds and Dies: A Case Study. **In: Volume 2B: Advanced Manufacturing**; p. V02BT02A018, 2015.

NYAMEKYE, P.; LEINO, M.; PIILI, H.; SALMINEN, A. Overview of sustainability studies of CNC machining and LAM of stainless steel. **15th Nordic Laser Materials Proceeding Conference**, Nolamp 15, v. 78, p. 367-376, 2015.

NESS, B.; URBEL-PIIRSALUA, E.; ANDERBERGD, S.; OLSSONA, L. Categorizing tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**. v. 60, n. 3, p. 498-508, 2007.

NORDELÖF, A. A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing processes. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, e. 4, p. 694-711, 2019.



NOUARI, M. “Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminium alloys”, **Wear**, v. 255, n. 7/12, p. 1359-1368, 2003.

OVERCASH, M.; TWOMEY, J.; KALLA, D. Unit Process Life Cycle Inventory for Product Manufacturing Operations. **Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference**, v. 1, p. 49-55, 2009.

PARIS, H.; MOKHTARIAN, H.; COATANÉA, E.; MUSEAU, M.; ITUARTE, I. F. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. **CIRP Annals**, v. 65, e. 1, p. 29-32, 2016.

PASHMFOROUSH F.; BAGHERINIA, R. D. Influence of water-based copper nanofluid on wheel loading and surface roughness during grinding of Inconel 738 superalloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 363-372, 2018.

PUSAVEC, F.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 174-184, 2010.

REBITZER, G.; EKVAL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W. -P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701-720, 2004.

SALES, W. F.; BECKER, M.; BARCELLOS, C. S.; JR, J. L.; BONNEY, J.; EZUGWU, E. O. Tribological behavior when face milling AISI 4140 steel with minimum quantity fluid application, **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 61, p. 84-90, 2009.

SALES, W. F.; MACHADO, A. R.; BONNEY, J.; EZUGWU, E. O. Evaluation of cutting fluids using scratch tests and turning process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 29, n. 4, p. 372-378, 2007.

SALETE, M.A.; OLIVEIRA, J. F. G. D. Vegetable based cutting fluid-an environmental alternative to grinding process. **15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering**, p. 664-668, 2008.

SCHIPPER, M. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions in U.S. Manufacturing. **U.S. Energy Information Administration**. Disponível em: [http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/pdf/industry\\_mecs.PDF](http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/pdf/industry_mecs.PDF). Acesso em: 7 de mai 2011.

SHARMA, V.S.; DOGRA, M.; SURI, N. M. “Cooling techniques for improved productivity in turning”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 6, p. 435-453, 2009.

SHARMA, R. K.; G. P. S. SODHI; BHAKAR V.; KAUR R.; PALLAKONDA S.; SARKAR P.; SINGH H. Sustainability in manufacturing processes: Finding the environmental impacts of friction stir processing of pure magnesium. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 30, p. 25-35, 2020.

- SHASHIDHARA, Y; JAYARAM, S. Vegetable oils as a potential cutting fluid - An evolution. **Tribology International**, v. 43, p. 1073-108190, 2010.
- SHIN, S-J.; SUH, S-H.; STROUD, I.; YOON, S. Process-oriented Life Cycle Assessment framework for environmentally conscious manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 28, p. 1481–1499, 2017.
- SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. 'Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids'. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 57, p. 83-101, 2012.
- SICV - BANCO NACIONAL DE INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA. **Processo DataSets (2021)**. Disponível em: <https://sicv.ibict.br/Node/processList.xhtml?stock=IBICT>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- SILVA, D. A. L.; MASONI, P. **Análise crítica das principais políticas de gestão, manutenção e uso de bancos de dados internacionais de inventários do ciclo de vida de produto**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT, 2016a.
- SILVA, D. A. L.; SILVA, E. J.; OMETTO, A. R. Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. **Production**, v. 26, n. 3, p. 642–655, 2016b.
- SILVA, D. A. L.; NUNES, A. O.; MORIS, V. A. S.; PIEKARSKI, C.; RODRIGUES, T. O. How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, OpenLCA, SimaPro and Umberto. **VII Conferencia Internacional de Analisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica**, 2017.
- SILVA, D. A. L.; DE OLIVEIRA J. A.; FILLETI, R. A. P.; DE OLIVEIRA, J. F. G.; DA SILVA, E. J.; OMETTO A. R. Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 286–300, 2018.
- SILVA, D. A. L.; NUNES, A. O.; PIEKARSKI, C. M.; MORIS, V. A. S.; SOUZA; L. S. M.; RODRIGUES, T. O. Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. **Sustainable Production and Consumption**, v. 20, p. 304-315, 2019.
- SKONE, T. J.; CURRAN, M. A. LCAccess – Global Directory of LCI resources. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 1345-1350, 2005.
- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice'**. U.S.A. 1993.
- SONNEMANN G.; MARGNI M. (ed.). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Dordrecht: Springer, 2015.
- SONNEMANN, G; GEMECHU, E. D.; REMMEN, A.; FRYDENDAL, J.; JENSEN, A. A. Life Cycle Management: Implementing Sustainability in Business Practice. *In*:

SONNEMANN G., MARGNI M. (ed.). **Life Cycle Management. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment**. Dordrecht: Springer, 2015.

SOUZA, L. S. M.; SILVA, D. A. L.; RODRIGUES, T. O.; DIAS, L. G. M. E.; BRAGA, T. **Levantamento de publicações científicas brasileiras para incremento do Banco Nacional de Inventário do Ciclo de Vida (SICV)**. Brasília: 2018.

SREEJITH P.; NGOI, B. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, p. 287-291, 2000.

STACHURSKI, W.; KRUSZYŃSKI, B. "Influence of Cutting Speed on the Hob Wear in Hobbing with the Minimum Quantity Lubrication." **Tehnički vjesnik**, v. 27, n. 2, p. 341-345, 2020.

STACHURSKI, Z.; SŁUPIK, H. Hobbing as finishing machining of the hard teeth. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 64, p. 353-358, 1997.

STEHLÍK P. A contribution to advances in waste-to-energy technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 10, p. 919–31, 2009.

SUH, S.; LEIGHTON, M.; TOMAR, S.; CHEN, C. Interoperability between Ecoinvent ver. 3 and US LCI database: a case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1290-1298, 2016.

TAO, J.; YU, S. Development of LCA Module Integrated With CAD for Eco-Assessment of Machined Products. **In American Society of Mechanical Engineers Digital Collection**, v. 4, p. V004T05A039/275027, 2018.

TAPOGLOU N.; BELIS, T.; VAKONDIOS, D.; ANTONIADIS, A. CAD-Based Simulation of Gear hobbing. **31st International Symposium on Mechanics and Materials**, Aghia Marina, Greece, 2010.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence: informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, Chichester, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

TSCHÄTSCH, H.; ANETTE, R. Cutting Fluids (Coolants and Lubricants). *In: Applied Machining Technology*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. p. 349-352.

THORN, M. J.; KRAUS, J. L.; PARKER, D. R. Life-cycle assessment as a sustainability management tool: strengths, weaknesses, and other considerations. **Environmental Quality Management**, v. 20, n. 3, p. 1-10, 2011.

TORRES-CARRILLO; S.; SILLER, H. R.; VILA; C.; LÓPEZ; C.; RODRÍGUEZ C.A. Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, n. 119068, 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Life Cycle Management – Business Guide to Sustainability**. Disponível em:

[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7894/DTI0889PA.pdf?sequence=3&mp%3BisAllowed=](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7894/DTI0889PA.pdf?sequence=3&amp%3BisAllowed=). Acesso em: 09 jun. 2020.

VAN THAO, L.; PARIS, H. A life cycle assessment-based approach for evaluating the influence of total build height and batch size on the environmental performance of electron beam melting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, p. 275-288, 2018.

VUKELIC, D; SIMUNOVIC, K; SIMUNOVIC, G; SARIC, T; KANOVIC, Z; BUDAK, I. Evaluation of an environment-friendly turning process of Inconel 601 in dry conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, n. 121919, 2020.

XIAO Q.; LI C.; TANG Y.; PAN J.; YU J.; CHEN X. Multi-component energy modeling and optimization for sustainable dry gear hobbing. **Energy**, v. 187, 115911, 2019.

WEGENER, K.; KUSTER, F.; WEIKERT, S.; WEISS, L.; STIRNIMANN, J. Success story cutting. **Procedia CIRP** 46, p. 512-524, 2016.

WEIDEMA, B. Market aspects in product life cycle inventory methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 1, n. 3-4, p. 161-166, 1993.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J. W.; WAKABAYASHI, T. "Dry machining and minimum quantity lubrication", **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 511-537, 2004.

YANG, S.; MIN, W.; GHIBAUDO, J.; ZHAO Y. F. Understanding the sustainability potential of part consolidation design supported by additive manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 722-7338, 2019.

YOSOFI, M.; KERBRAT, O.; MOGNOL, P. Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 2, p. 83-96, 2018.

YOSOFI, M.; KERBRAT, O.; MOGNOL, P. Additive manufacturing processes from an environmental point of view: a new methodology for combining technical, economic, and environmental predictive models. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9-12, p. 4073-4085, 2019.

ZANUTO, R. S.; HASSUI, A.; LIMA, F.; DORNFELD, D. A. Environmental impacts-based milling process planning using a life cycle assessment tool. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 349-355, 2019.

ZENDOIA, J.; WOY, U.; RIDGWAY, N.; PAJULA, T.; UNAMUNO, G.; OLAIZOLA, A.; FYSIKOPOULOS, A.; KRAIN, R. A specific method for the life cycle inventory of machine tools and its demonstration with two manufacturing case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 78, p. 139-151, 2014.

ZENG, D.; CAO, H.; JAFAR, S.; TAN, Y.; SU, S. A Life Cycle Ecological Sensitivity Analysis Method for Eco-Design Decision Making of Machine Tool. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 698–703, 2018.

ZIAKIS, C.; VLACHOPOULOU, M.; KYRKOUDIS, T.; KARAGKIOZIDOU, M. Important Factors for Improving Google Search Rank. **Future Internet**, v. 11, n. 32, 2019.



### APÊNDICE B - FLUKE 435 e sequência de etapas da medição de potência ativa



FLUKE 435 com conexão de alças e pinças

| LOGGER                                     |         |             |                 |       |
|--|---------|-------------|-----------------|-------|
|  | 0:05:10 |             |                 |       |
|  | L1      | L2          | L3              | Total |
| kVAR                                       | 2.8     | 2.2         | 2.3             | 7.3   |
|  | L1      | L2          | L3              |       |
| cos $\phi$                                 | 0.67    | 0.75        | 0.80            |       |
|  | L1      | L2          | L3              | Total |
| kWh  | 0.242   | 0.208       | 0.247           | 0.697 |
| 18/12/19 14:58:54 440V 60Hz 3Ø WVE ENS0160 |         |             |                 |       |
| PREV<br>NEXT                               | TREND   | EVENTS<br>0 | OPEN<br>MENU... |       |

Display de medição de potência ativa

**Atenção:** as medições devem ser realizadas por engenheiro ou electricista industrial habilitados!

- a) Ligar o FLUKE e selecionar opção de medição trifásica;
- b) Conectar os cabos no FLUKE e no painel da máquina a ser medido, sendo 1 alça para cada uma das fases R/S/T e o Terra.
- c) Instalar as alças em torno dos condutores elétricos observando o sentido do fluxo de corrente conforme indicado pelo FLUKE.
- d) Instalar as pinças em pontos energizados para aquisição das tensões.
- e) Realizar verificação de instalação por meio de leitura inicial de todos os parâmetros;
- f) Iniciar modo de medição com gravação dos dados de consumo em tempo real;

Fonte: Elaborado pelo Autor

**APÊNDICE C** – Fatores de normalização recomendados pelo Método *ReCiPe 2016 v1.1 (H)*, *Midpoint Normalization, World, excl. biogenic carbon (person equivalents)*

| <b>Quantidade</b>   | <b>Equivalências</b> | <b>Unidade</b>       | <b>Fator de Normalização por Pessoa</b> |
|---|----------------------|----------------------|---|
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Climate change, default, excl biogenic carbon | 7,990.41             | kg CO2 eq.           | 1.25150E-04                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Fine Particulate Matter Formation             | 25.57                | kg PM2.5 eq.         | 3.91089E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Fossil depletion                              | 983.28               | kg oil eq.           | 1.01701E-03                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater Consumption                        | 266.64               | m3                   | 3.75039E-03                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater ecotoxicity                        | 25.17                | kg 1,4 DB eq.        | 3.97224E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater Eutrophication                     | 0.65                 | kg P eq.             | 1.53873E+00                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Human toxicity, cancer                        | 10.30                | kg 1,4-DB eq.        | 9.71033E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Human toxicity, non-cancer                    | 31,251.84            | kg 1,4-DB eq.        | 3.19981E-05                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Ionizing Radiation                            | 479.92               | kBq Co-60 eq. to air | 2.08369E-03                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Land use                                      | 6,167.48             | Annual crop eq. ·y   | 1.62141E-04                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Marine ecotoxicity                            | 43.44                | kg 1,4-DB eq.        | 2.30188E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Marine Eutrophication                         | 4.62                 | kg N eq.             | 2.16554E-01                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Metal depletion                               | 120,051.21           | kg Cu eq.            | 8.32978E-06                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Photochemical Ozone Formation, Ecosystems     | 17.75                | kg NOx eq.           | 5.63402E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Photochemical Ozone Formation, Human Health   | 20.57                | kg NOx eq.           | 4.86205E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Stratospheric Ozone Depletion                 | 0.06                 | kg CFC-11 eq.        | 1.66639E+01                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Terrestrial Acidification                     | 40.98                | kg SO2 eq.           | 2.44018E-02                             |
| ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Terrestrial ecotoxicity                       | 15,200.31            | kg 1,4-DB eq.        | 6.57881E-05                             |

Fonte: Adaptado do *software Gabi* versão 9.2.1.68 - Education Database 2020