

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

ALESSANDRO SILVEIRA FIRMINO

***GREEN MANUFACTURING: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PROCESSOS
DE USINAGEM DE TUBOS DE ALUMÍNIO***

Sorocaba

2020

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

ALESSANDRO SILVEIRA FIRMINO

***GREEN MANUFACTURING: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PROCESSOS
DE USINAGEM DE TUBOS DE ALUMÍNIO***

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. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva

Coorientação: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Sorocaba

2020

Firmino, Alessandro Silveira

Green manufacturing: avaliação do ciclo de vida de processos de usinagem de tubos de alumínio / Alessandro Silveira Firmino -- 2020. 106f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Diogo Aparecido Lopes Silva

Banca Examinadora: José Augusto de Oliveira, Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura, Alex Camilli Bottene
Bibliografia

1. Manufatura ambientalmente sustentável. 2. Avaliação do ciclo de vida. 3. Usinagem. I. Firmino, Alessandro Silveira. 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 Alessandro Silveira Firmino, realizada em 09/07/2020.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva (UFSCar)

Prof. Dr. José Augusto de Oliveira (UNESP)

Profa. Dra. Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura (EMBRAPA)

Prof. Dr. Alex Camilli Bottene (Insper)

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.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Elisabete e Milton, por sempre dedicarem suas vidas para propiciar tudo de melhor que eu e meu irmão Evandro poderíamos receber deles, especialmente o amor de uma mãe e um pai pelos seus filhos.

À minha esposa Aline, pelo amor, pela companhia, pela parceria, por cuidar da nossa família, e por todo o apoio que me fornece ao longo da nossa jornada (até o asilo), para que projetos como este (entre tantos outros) se tornem realidade em nossas vidas.

Ao meu filho Miguel, por ser a maior bênção que eu poderia receber em vida, e que me proporciona, dia após dia, entender o significado da palavra “infinito”, que utilizo para expressar o tamanho do amor que sinto por ele.

AGRADECIMENTOS

Ao meu admirável orientador, Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva, por ter me escolhido e me acolhido, pela orientação, pelos ensinamentos, por ser o grande responsável pela minha inserção nesta atmosfera voltada à pesquisa, e por toda a disposição em me tornar um novo integrante do seleto grupo formado por Mestres em Engenharia de Produção.

Ao meu valioso co-orientador, Prof. Dr. José Augusto de Oliveira, por ter me aceitado como seu co-orientado para este projeto, por estar sempre à disposição para oferecer sua enorme contribuição, e por todo o apoio oferecido durante os trabalhos desenvolvidos para a concretização desta dissertação de mestrado.

Aos membros da Banca Examinadora desta dissertação de mestrado, pelas valiosas contribuições apresentadas, que muito contribuíram para o resultado final deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) que, por meio do Código de Financiamento 001, possibilitou a realização do presente trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, pelo suporte físico, educacional e de apoio à pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSCar-Sorocaba, por todos os ensinamentos concedidos ao longo de toda esta jornada.

Ao querido Felipe Marques e Silva, da Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSCar-Sorocaba, pelo permanente apoio e pela enorme agilidade no atendimento às demandas existentes entre o PPGEP-So e o aluno.

*Se você quiser nadar entre os tubarões,
é melhor se tornar um deles.
Um tubarão nunca é desleal ou desonesto:
é implacável – e sabe muito bem o que quer.*
(Roberto L. Justus)

RESUMO

FIRMINO, Alessandro S. *Green Manufacturing: Avaliação do Ciclo de Vida de Processos de Usinagem de Tubos de Alumínio*. 106 f. – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2020.

Processos de manufatura são realizados para a transformação de matérias-primas em produtos acabados. Para a realização desses processos, recursos naturais são consumidos e emissões são geradas, refletindo em potencial de geração de impactos ambientais adversos. Com o objetivo de se obter sistemas produtivos com menos impactos negativos ao meio ambiente, institui-se a *Green Manufacturing (GM)*. Assim, o conceito de *GM* foi utilizado nesta dissertação, em que se estudou o desempenho ambiental de processos de usinagem de tubos de alumínio, por meio da aplicação de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) orientada à avaliação de dois processos de manufatura. Visando à utilização de uma metodologia detalhada para o desenvolvimento da fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos processos estudados, a metodologia *Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI)* foi utilizada. A aplicação desta metodologia e o desenvolvimento das fases da ACV, especialmente a fase de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), foram realizados mediante análises em categorias de impacto estabelecidas e utilizando-se do método ReCiPe 2016, e possibilitaram conhecer os impactos ambientais potenciais dos processos estudados, identificando-se a eletricidade e o fluido de corte como seus principais *hotspots*. Perante tais resultados e por meio da realização de análise de sensibilidade, cenários futuros de fabricação foram propostos visando à mitigação dos impactos oriundos destes *hotspots*. O cenário proposto ambientalmente mais sustentável prevê a duplicação da quantidade de peças fabricadas a cada ciclo do sistema, passando de três para seis peças usinadas por ciclo, além da redução de 25% do sobremetal de matéria-prima a ser usinada, resultando em importantes melhorias em todas as categorias de impacto avaliadas, possibilitando reduções dos impactos potenciais avaliados que alcançarão, no caso mais destacado, até 16,47% de melhoria no ciclo de vida *cradle-to-gate*. Ainda, benefícios relacionados a métricas clássicas da Engenharia de Produção, como o índice de produtividade e a taxa de ocupação da máquina e, também, benefícios relacionados ao índice de ecoeficiência do sistema produtivo, com melhoria de até 23,55%, foram evidenciados com a implementação do cenário futuro, que possibilitarão a obtenção de um sistema de manufatura mais sustentável.

Palavras-chave: Manufatura ambientalmente sustentável. ACV. UPLCI. Usinagem. Ecoeficiência.

ABSTRACT

FIRMINO, Alessandro S. Green Manufacturing: Life Cycle Assessment of Aluminium Pipes' Machining Processes. 106 f. – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2020.

Manufacturing processes are performed to convert raw materials into products. To perform these processes, natural resources are consumed and emissions are generated reflecting the potential for adverse environmental impacts. In order to obtain productive systems with less negative impacts on the environment, Green Manufacturing (GM) was emerged. Thus, the concept of GM was used in this dissertation, in which the environmental performance of aluminum pipes' machining processes was studied. For this, the application of a Life Cycle Assessment (LCA) oriented to the evaluation of two manufacturing processes was organized, based also in the use of a detailed methodology to develop the Life Cycle Inventory (LCI) of the studied processes – the Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI). The application of the UPLCI and the development of the LCA phases, especially the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) phase, were carried out through the selection of midpoint impact categories from the ReCiPe 2016 method, and allowed to identify the potential environmental impacts of the studied processes and identify the electricity and the cutting fluid as their main hotspots. With the obtained results and through the performance of sensitivity analysis, future manufacturing scenarios were proposed to reduce the impacts arising from these hotspots. The proposed environmentally benign manufacturing scenario was the suggestion to duplicate the quantity of parts manufactured at each production cycle, moving from three to six machined parts per cycle, and reducing 25% of the raw material surplus to be machined. All of that resulted in important improvements for all the impact categories, enabling reductions in the potential impacts up to 16.47% for the cradle-to-gate life cycle. Further, benefits regarding to classic Production Engineering metrics such as the productivity index and the machine occupancy rate were achieved and resulted into a better eco-efficiency index of the production system up to 23.55%, that will enable the achievement of a more sustainable manufacturing system.

Keywords: Green manufacturing. LCA. UPLCI. Machining. Eco-efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da visão e das práticas da <i>GM</i>	22
Figura 2 – Avanço de publicações em <i>GM</i> em processos de usinagem	27
Figura 3 – Fases de estudos de ACV	30
Figura 4 – Evolutivo histórico de estudos de ACV	30
Figura 5 – Evolutivo de publicações referentes à ACV em processos de manufatura	31
Figura 6 – Evolutivo de publicações referentes à ACV em processos de usinagem	32
Figura 7 – Visão geral da metodologia <i>UPLCI</i> pelo modelo <i>CO₂PE!</i>	35
Figura 8 – Fronteiras do sistema aplicadas no contexto da metodologia <i>UPLCI</i>	37
Figura 9 – Abordagem <i>in-depth</i>	38
Figura 10 – Centro de usinagem e suas subunidades referentes ao EC-1	47
Figura 11 – Centro de usinagem e suas subunidades referentes ao EC-2	48
Figura 12 – Fronteiras do sistema estudado	52
Figura 13 – Perfil de consumo de eletricidade do processo estudado	62
Figura 14 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PMC (em kg CO ₂ -eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	68
Figura 15 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PMP (em PM _{2,5} -eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	69
Figura 16 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PDF (em kg óleo-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	70
Figura 17 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PCAD (em m ³) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	71
Figura 18 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PEcAD (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	72
Figura 19 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PEuAD (em kg P-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	73

Figura 20 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PTHc (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	74
Figura 21 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PTHnc (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	75
Figura 22 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PDM (em kg Cu-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo.....	76
Figura 23 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PAT (em kg SO ₂ -eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	77
Figura 24 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PET (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo	78
Figura 25 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PMC (em kg CO ₂ -eq.).....	79
Figura 26 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PMP (em kg PM _{2,5} -eq.).....	80
Figura 27 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PDF (em kg óleo-eq.).....	80
Figura 28 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PCAD (em m ³)	80
Figura 29 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PEcAD (em kg 1,4DB-eq.)....	81
Figura 30 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PEuAD (em kg P-eq.).....	81
Figura 31 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PTHc (em kg 1,4DB-eq.)	81
Figura 32 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PTHnc (em kg 1,4DB-eq.)	82
Figura 33 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PDM (em kg Cu-eq.).....	82
Figura 34 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PAT (em kg SO ₂ -eq.)	82
Figura 35 – Impacto potencial do modo <i>full load</i> na categoria PET (em kg 1,4DB-eq.).....	83
Figura 36 – Análise de contribuição, no modo <i>full load</i> , de cada fluxo de consumível para todas as categorias de impacto avaliadas.....	83
Figura 37 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PMC (em kg CO ₂ -eq.).....	88
Figura 38 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PMP (em kg PM _{2,5} -eq.)	88
Figura 39 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PDF (em kg óleo-eq).....	89

Figura 40 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PCAD (em m ³)	89
Figura 41 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PEcAD (em kg 1,4DB-eq.)	90
Figura 42 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PEuAD (em kg P-eq.)	90
Figura 43 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PTHc (em kg 1,4DB-eq.)	91
Figura 44 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PTHnc (em kg 1,4DB-eq.)	91
Figura 45 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PDM (em kg Cu-eq.).....	92
Figura 46 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PAT (em kg SO ₂ -eq.)	92
Figura 47 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso <i>full load</i> , na categoria PET (em kg 1,4DB-eq.)	93
Figura 48 – Comparativo do percentual de melhoria no índice de ecoeficiência entre o cenário atual e os cenários propostos, por categoria de impacto.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição do volume das publicações pelos seguimentos estudados	28
Tabela 2 – Categorias dos autores em função do enquadramento produtivo	28
Tabela 3 – Distribuição dos autores segundo enquadramento produtivo	29
Tabela 4 – Métodos de AICV utilizados pelas publicações analisadas.....	41
Tabela 5 – Correlação entre os modos de uso e a ativação das subunidades dos equipamentos	51
Tabela 6 – Consumo de tempo em cada modo de uso	59
Tabela 7 – Consumo de tempo das suboperações desempenhadas no modo <i>full load</i>	60
Tabela 8 – Consumo de energia em cada modo de uso.....	61
Tabela 9 – Consumo de energia total e por segundo, no modo <i>full load</i> , em cada suboperação	63
Tabela 10 – Quantidades de ferramentas utilizadas por ciclo de usinagem	64
Tabela 11 – Dados de ICV consolidados.....	66
Tabela 12 – Resultados globais de AICV, por modo de uso, alusivo ao ciclo do processo.....	67
Tabela 13 – Dados estimados de ICV, no modo <i>full load</i> , para os cenários futuros propostos	86
Tabela 14 – Percentual de melhoria nos consumos estimados, resultantes da implementação dos cenários futuros propostos	87
Tabela 15 – Comparativo entre cenários segundo a ocupação e a produtividade diária	95

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
CD	<i>Capillary Drilling</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CO ₂ PE!	<i>Cooperative Effort on Process Emissions</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EC	<i>European Commission</i>
EC-1	Estudo de caso número 1
EC-2	Estudo de caso número 2
GM	<i>Green Manufacturing</i>
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IES	<i>Institute for Environmental and Sustainability</i>
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCT	<i>Life Cycle Thinking</i>
NBR	Norma Brasileira
ONU-WCED	<i>United Nations World Commission on Environment and Development</i>
PAT	Potencial de Acidificação Terrestre
PCAD	Potencial de Consumo de Água Doce
PDF	Potencial de Depleção Fóssil
PDM	Potencial de Depleção de Metal
PEcAD	Potencial de Ecotoxicidade para Água Doce
PET	Potencial de Ecotoxicidade Terrestre
PEuAD	Potencial de Eutrofização para Água Doce
PMC	Potencial de Mudanças Climáticas
PMP	Potencial de Material Particulado
PTHc	Potencial de Toxicidade Humana, cancerígena
PTHnc	Potencial de Toxicidade Humana, não-cancerígena
P+L	Produção Mais Limpa
SICV Brasil	Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida – Brasil
STEM	<i>Shaped Tube Electrolytic Machining</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UPLCI	<i>Unit Process Life Cycle Inventory</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 <i>GREEN MANUFACTURING</i>	21
2.1.1 Perspectivas, Motivações e Barreiras Relacionadas à GM	23
2.1.2 Estudos de GM em Processos de Usinagem	27
2.2 ACV EM PROCESSOS DE MANUFATURA.....	29
2.3 METODOLOGIA <i>UPLCI</i>	34
2.3.1 Definição de Objetivo e Escopo	35
2.3.2 Fronteiras do Sistema	36
2.3.3 Unidade Funcional, Seleção de Parâmetros e Análise da Máquina	37
2.3.4 Análise de Inventário em Processos de Manufatura	38
2.3.5 Estudo de Tempo, Potência, Consumíveis e Emissões	39
2.3.6 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida em Processos de Manufatura	40
2.3.7 Interpretação da ACV	42
2.4 BASES DE DADOS E SOFTWARES DE ACV.....	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 MATERIAIS	47
3.2 MÉTODOS.....	51
3.2.1 Unidade Funcional, Fluxo de Referência e Fronteiras do Sistema	51
3.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	52
3.2.3 Estudo de Tempo	53
3.2.4 Estudo de Potência	53
3.2.5 Estudo de Consumíveis	54
3.2.6 Estudos de Emissões	56
3.2.7 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	56
3.2.8 Interpretação da ACV	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE TEMPO.....	59

4.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE POTÊNCIA	61
4.3 RESULTADOS DO ESTUDO DE CONSUMÍVEIS	63
4.4 RESULTADOS DO ESTUDO DE EMISSÕES	65
4.5 INVENTÁRIOS CONSOLIDADOS DO PROCESSO	65
4.6 AICV E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE ACV	66
4.6.1 Análise de Sensibilidade da ACV	84
4.6.2 Avaliação da Ecoeficiência do Processo	94
5 CONCLUSÃO.....	97
6 REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa

Em razão do crescimento da população e da atividade industrial, e pelo fato dos ecossistemas não serem capazes de absorver as quantidades de resíduos e emissões depositados continuamente sobre o meio ambiente, os danos ambientais aumentaram drasticamente nas últimas décadas. Com este cenário, somado à disponibilidade finita dos recursos naturais, a sustentabilidade tornou-se fundamental buscando influenciar todos os aspectos organizacionais da vida humana (GARETTI; TAISCH, 2012).

O conceito da sustentabilidade aplicada à manufatura indica a necessidade de políticas ambientais que objetivem o desenvolvimento de metodologias de avaliação ambiental orientadas à redução dos impactos negativos causados pela geração dos produtos (JACQUEMIN; PONTALIER; SABLAYROLLES, 2012). Desta forma, os produtos deverão passar a ser gerados por meio de novas técnicas e estratégias sustentáveis, considerando-se, portanto, a redução do uso dos recursos naturais, a utilização de materiais e equipamentos até o fim de sua vida útil, e, quando possível, a sua remanufatura ou a sua correta destinação para reciclagem ou demais estratégias de fim de vida do produto (RIBEIRO; VEIGA, 2011). Essas medidas convergem com o pensamento voltado ao Desenvolvimento Sustentável, cujo conceito foi definido pela *United Nations World Commission on Environment and Development* (ONU-WCED, 1987) como um “desenvolvimento que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”.

Segundo Oberle *et al.* (2019), a extração global anual de materiais aumentou consideravelmente, indo de 27 bilhões de toneladas em 1970 para 92 bilhões de toneladas em 2017. Como consequência, houve um aumento significativo da poluição global, principalmente relacionado à poluição do ar devido às emissões de dióxido de carbono (CO₂), e outros gases de efeito estufa (GUTOWSKI *et al.*, 2013). A *International Energy Agency* (IEA, 2016) aponta a produção de energia como uma das maiores fontes de poluição do ar. Grande parte do uso da energia está atrelada às indústrias, que consomem quantidades significativas de energia nos seus processos de fabricação ao transformarem matérias-primas em produtos acabados (ZHOU *et al.*, 2019).

Assim, existe uma tendência mundial de mudança rumo a uma produção mais sustentável. Essa nova consciência ambiental está embasada na sustentabilidade e no

pensamento do ciclo de vida dos produtos, chamado de *Life Cycle Thinking (LCT)*, visando a estimular a indústria a se tornar proativa no *design* de seus produtos ou na melhoria dos já existentes, e no *design* dos processos de produção, buscando o desenvolvimento de processos mais limpos. Romvall, Wiktorsson e Belgran (2010) afirmam que a manufatura sustentável deixou de ser uma prática meramente cumpridora da lei, transformando-se em uma grande oportunidade de aumento na competitividade das empresas no mercado global. Historicamente, conforme apresentado por Oberle *et al.* (2019), os cenários econômicos globais focavam em melhorias de produtividade dos sistemas em detrimento da eficiência no uso de materiais e energia. Entretanto, o cenário atual exige ações visando foco no uso eficiente desses recursos naturais, que se tornaram fator limitante da produção (OBERLE *et al.*, 2019). Por esta razão, o *LCT* tornou-se um conceito central em relação ao consumo e produção sustentáveis, cujo objetivo visa a ir além do foco tradicional dado à produção e aos processos de fabricação, passando a incluir impactos ambientais, sociais e econômicos de um produto sob a perspectiva de todo o seu ciclo de vida (EC/JRC/IES, 2011; *LIFE CYCLE INITIATIVE*, 2019).

Em meio a esse contexto, surge a Manufatura Ambientalmente Sustentável, também expressa pelo termo *Green Manufacturing (GM)*, cujo objetivo se concentra na obtenção de sistemas produtivos que causem menos impactos negativos ao meio ambiente, por meio de iniciativas que visam à redução do uso de recursos naturais e de energia e na redução da geração de resíduos por unidade de produto colocado no mercado (DORNFELD *et al.*, 2013; SANGWAN; MITTAL, 2015).

Diaz *et al.* (2010) indicam que processos de usinagem representam uma área fortemente visada para aplicação da *GM* devido a:

- (i) Sua relevância no setor metalmeccânico em termos de empregabilidade e impacto econômico; e
- (ii) Seus aspectos ambientais, como o alto consumo de energia e a geração de quantidades significativas de resíduos sólidos (e.g. cavaco de usinagem, graxas e ferramentas de corte ao término de sua vida útil).

Estes fatores tornam a usinagem um processo crítico em relação à sustentabilidade na indústria de manufatura.

Segundo Liu *et al.* (2005), “um sistema de usinagem é um sistema de manufatura básico, e o conceito de *GM* pode ser aplicado de forma absoluta”, o que permitirá, portanto, a realização de uma análise ambiental holística, em que considere não apenas o impacto do processo de remoção de material em si, mas também, os impactos a montante de processos associados, por exemplo, com a extração e o fornecimento de materiais e fluidos de corte, ou seja, devendo a *GM* incluir também a perspectiva *LCT* em seu escopo (DAHMUS; GUTOWSKI, 2004).

Visando à *GM*, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido utilizada como a principal técnica quantitativa para a identificação e análise da relevância dos aspectos e impactos ambientais de sistemas produtivos (SILVA; SILVA; OMETTO, 2016), em razão de requerer o levantamento dos fluxos de entrada e saída de materiais e energia e a posterior mensuração dos impactos potenciais desses fluxos em relação ao meio ambiente (ABNT, 2009a). Assim, a ACV permite a proposição e aplicação de medidas que beneficiem o desempenho ambiental do sistema sob a perspectiva de *LCT*.

Destaca-se, no contexto da ACV, a importância dos conjuntos de dados de inventário de ciclo de vida (ICV) de produto e de processos de fabricação (DUFLOU *et al.*, 2012), que além da sua utilidade para a modelagem da ACV referente ao produto ou ao processo estudado, poderão ser inseridos, mediante seu nível de qualidade e confiabilidade, em bancos de dados de ICV. Nos softwares de ACV, esses bancos de dados contêm diversos ICVs de produtos e processos, e auxiliam na condução de estudos de ACV. Contudo, há uma escassez de inventários relacionados a processos de manufatura, o que limita o desenvolvimento de estudos de *GM*, fato que também motivou a realização desta pesquisa. Além disso, estudos de ACV estão mais concentrados em produtos e não em processos de fabricação (SILVA; SILVA; OMETTO, 2016), assim, mais trabalhos na área de ACV de processos de fabricação são necessários, conforme será discutido ao longo da seção 2. Por fim, vale ressaltar que, no Brasil, o banco nacional de inventários do ciclo de vida (SICV Brasil) foi publicado recentemente, em 2016, e ainda carece de novos inventários para fomentar os estudos de ACV nacionais (SOUZA *et al.*, 2018). Logo, os ICVs gerados nesta pesquisa poderão ser ofertados posteriormente ao SICV Brasil, contribuindo assim para o aprimoramento do banco de dados de ICVs brasileiros.

Perante o exposto, esta dissertação está organizada da seguinte forma: a subseção 1.2 elenca os objetivos do trabalho, a seção 2 e suas subseções discutem o Estado-da-Arte sobre

GM com foco nos principais desenvolvimentos da temática nos últimos anos, seus desafios e limitações, e as justificativas que embasaram a presente dissertação. A seção 3 apresenta os materiais e métodos da pesquisa, resumindo como foi realizado o estudo de ACV dos processos de manufatura avaliados, bem como a interpretação de resultados visando à *GM*. A seção 4 apresenta os resultados e discussões, seguido das conclusões, recomendações e limitações na seção 5.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar e propor melhorias visando a aperfeiçoar o desempenho ambiental de dois processos de usinagem de tubos de alumínio produzidos no Brasil, por meio da aplicação do conceito de *GM* alinhado à técnica de ACV.

1.2.2 Objetivos específicos

- Quantificar os aspectos ambientais de dois processos alternativos de usinagem de tubos de alumínio;
- Avaliar seus impactos ambientais;
- Comparar o desempenho ambiental de ambos os processos de usinagem, identificando os principais *hotspots* de cada processo;
- Propor novas alternativas visando à criação de cenários futuros de *GM* para os processos estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Green Manufacturing*

Em razão de a manufatura representar um papel indispensável na economia global, fornecendo os bens necessários a consumidores e indústrias, além de representar importante fonte de empregos e os meios pelos quais uma economia pode crescer (DUFLOU *et al.*, 2012; GUTOWSKI *et al.*, 2013), tornam-se inevitáveis, conseqüentemente, os potenciais impactos que o setor industrial pode causar ao meio ambiente, devido à manufatura ser uma das principais causas do consumo de recursos naturais e de geração direta e indireta, por exemplo, das emissões de CO₂ (GARETTI; TAISCH, 2012).

Gutowski *et al.* (2013) destacam que os principais líderes econômicos globais alcançaram seu status atual de desenvolvimento devido ao domínio da manufatura e a utilizando como principal meio de desenvolvimento. Os mesmos autores destacam ainda que, em razão desse crescimento do setor de manufatura, observa-se, ao longo da história, também uma recorrente correlação entre o desenvolvimento econômico e os impactos negativos causados ao meio ambiente.

Devido a este cenário, aumenta-se continuamente a demanda para as organizações implementarem estratégias tecnológicas mais limpas, de modo que a variável ambiental seja devidamente integrada ao desenvolvimento e à sustentabilidade, com a utilização de medidas voltadas à redução ou, quando possível, à eliminação desses impactos oriundos do uso de recursos naturais e energia não renováveis, além da redução das emissões para o ar, para a água e para o solo, rumo à geração de produtos e serviços ambientalmente mais adequados. Dornfeld (2014) argumenta que atingir a estes objetivos representa um grande desafio para engenharia neste século, e que somente por meio de inovação na manufatura será possível garantir que os sistemas se tornem sustentáveis. Devem ser avaliadas propostas para a máxima redução no uso dos recursos naturais, a utilização de materiais e equipamentos até o fim de sua vida útil, planejando sua reutilização, quando possível, ou a sua correta destinação para reciclagem (RIBEIRO; VEIGA, 2011).

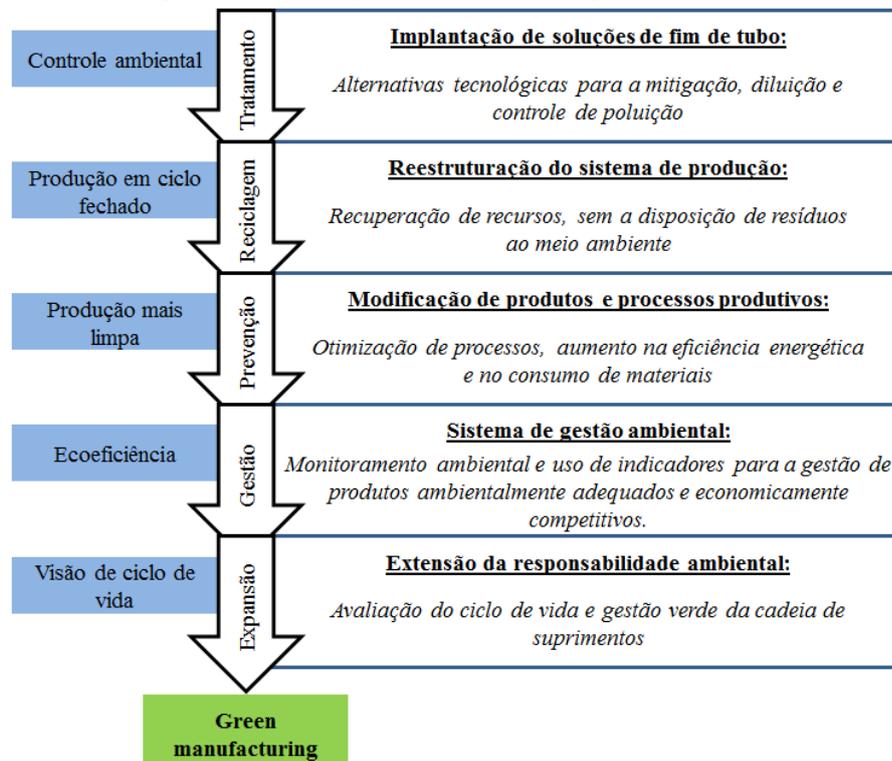
Com o objetivo de se desenvolver metodologias para se alcançar esta proposta, surge a *GM*, definida por Rusinko (2007), Dornfeld *et al.* (2013) e Sangwan e Mittal (2015) e, como um processo ou sistema produtivo que cause menos impactos negativos ao meio ambiente por meio de iniciativas que promovam a redução no uso de recursos naturais e de energia, a redução da geração de resíduos, além do *redesign* de produtos e processos, tornando-os

ambientalmente mais sustentáveis. Garetti e Taisch (2012) complementam argumentando que a preservação do meio ambiente obtida com a *GM* visa também garantir a qualidade de vida das pessoas, contribuindo assim para a sustentabilidade social.

De acordo com Gupta *et al.* (2015), o uso da expressão “*green*” objetiva indicar uma manufatura ambientalmente adequada, realizada ao menor impacto sobre o meio ambiente, os seres vivos e os ecossistemas. Destaca-se que outros termos são utilizados na literatura em alusão à *GM*, tais como: *Environmentally Conscious Manufacturing* (FLORIDA, 1996; GUNGOR; GUPTA, 1999; SARKIS, 1999; MITTAL; SANGWAN, 2011); *Environmentally Benign Manufacturing* (ALLEN *et al.*, 2002; GUTOWSKI *et al.*, 2005); e *Environmentally Responsible Manufacturing* (CURKOVIC, 2003).

A *Sustainable Manufacturing Initiative* (2011) e Silva, Silva e Ometto (2016) destacam que, ao longo do tempo, o conceito de *GM* tem evoluído em função dos avanços das estratégias de gestão ambiental, visto que, inicialmente, as soluções eram relacionadas a tratativas de fim-de-tubo, passando pela P+L (Produção Mais Limpa), chegando até os dias atuais, em que a *GM* apresenta uma visão mais abrangente voltada ao *LCT*. A Figura 1 apresenta essa evolução.

Figura 1 – Evolução da visão e das práticas da *GM*



Fonte: Adaptado de *Sustainable Manufacturing Initiative* (2011) e Silva, Silva e Ometto (2016)

Historicamente, autores como Rusinko (2007) e Deif (2011) tendem a correlacionar a *GM* com estudos de P+L, devido a ambas as estratégias concentrarem suas ações em melhorar a utilização dos recursos naturais e a redução da geração de resíduos ao longo de um processo produtivo. Entretanto, a *GM*, diferentemente da P+L, potencializa um enfoque integrado, por meio do qual sejam assumidas ações voltadas ao *LCT*, com uma abordagem *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo), ou seja, em que se consideram os aspectos e impactos ambientais causados desde a extração e beneficiamento dos recursos até a disposição final dos resíduos, indo, portanto, além do processo produtivo. Visando a estabelecer uma metodologia para o desenvolvimento de estudos de *GM* que permitam o *LCT* em seu escopo, a ferramenta de ACV, preconizada pela ABNT ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ABNT ISO 14044 (ABNT, 2009b), é considerada uma ferramenta de valiosa utilidade na manufatura e tem sido costumeiramente utilizada para esta finalidade, especialmente desde o início dos anos 2000.

2.1.1 Perspectivas, motivações e barreiras relacionadas à *GM*

No mundo competitivo atual, as organizações estão se dedicando ao alcance de uma manufatura ambientalmente sustentável, por meio da implementação do conceito de *GM*, principalmente por terem concluído que a sustentabilidade pode ser uma estratégia importante, não apenas para o negócio em si, devido a proporcionar benefícios econômicos provenientes da economia de energia e demais recursos, a redução do risco e da incerteza da cadeia de suprimentos, e ao atendimento a regulamentações governamentais, mas também visando a atender às demandas dos consumidores e manter a competitividade, visto que estão recebendo uma pressão cada vez maior para avaliar e reduzir seu impacto sob as perspectivas ambientais (DORNFELD *et al.*, 2013; GUPTA *et al.*, 2015). Nesta linha, destaca-se o fato de a sociedade como um todo estar se tornando cada vez mais exigente e responsável em relação a questões socioambientais no processo de compra dos produtos e serviços (VENTURA, 2010). Gungor e Gupta (1999) já ressaltavam que, em muitos países, leis de proteção ambiental, regulamentos e implicações tributárias já entrariam em vigor. Portanto, a conscientização da sociedade, somada a uma legislação ambiental cada vez mais exigente nos últimos anos, motivam e induzem as empresas a desenvolverem uma relação sinérgica com o meio ambiente, rumo à produção sustentável.

Sarkis (1995) já destacava que questões ambientais passariam a desempenhar um papel maior nas estratégias corporativas das organizações, visto que regulamentações e leis ambientais estavam obrigando-as a considerar os impactos ambientais de suas operações em

todos seus processos de negócios e produtos, e que a adoção de processos de fabricação ambientalmente adequados seria um pré-requisito para que competissem nos mercados globais.

Dornfeld *et al.* (2013) e Silva (2016) indicam que a busca pela *GM* por parte das organizações é motivada por fatores relacionados à: pressão governamental; pressão da sociedade; escassez de recursos; e busca por redução de custos. Na mesma direção, Rusinko (2007) relaciona os requisitos regulamentares, administração de produtos, imagem pública e possíveis vantagens competitivas em novos mercados como os principais motivos pela busca da *GM* por parte das organizações.

Seles (2016) identificou na literatura, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, a existência de motivadores internos e externos às organizações visando à adoção da *GM*. O resultado da revisão indicou que, dentre as motivações internas à organização, a melhoria no seu desempenho financeiro oriunda da adoção das práticas voltadas à *GM* representou um dos principais motivadores, em razão de, principalmente, poder proporcionar à organização reduções nos custos de suas operações (SINGH *et al.*, 2012; MITTAL; SANGWAN, 2014; GOVINDAN; DIABAT; MADAN SHANKAR, 2015). Nesta direção, Deif (2011) destaca que ser eficiente evitando o desperdício resulta em benefícios tanto ambientais quanto monetários, levando as organizações a interpretar que as iniciativas voltadas à *GM* poderão ser implantadas utilizando-se do dinheiro economizado com um sistema mais eficiente. Gupta *et al.* (2015) localizaram na literatura um total de 17 motivadores para a *GM*, e os classificaram em muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto os impactos benéficos destes motivadores em relação ao meio ambiente, à economia e à sociedade. Segundos estes autores, destacaram-se como principais motivadores à adoção de *GM*:

- (i) A legislação;
- (ii) A conservação ambiental;
- (iii) A inovação;
- (iv) Os incentivos; e
- (v) A imagem da empresa.

A revisão desenvolvida por Seles (2016) também apresentou como outros motivadores de origem interna:

- (i) O apoio da alta administração;
- (ii) A aplicação de novos recursos tecnológicos e de inovação; e
- (iii) O conhecimento ambiental das pessoas que compõem as organizações.

Dentre os motivadores de origem externa, Seles (2016) pontuou dentre os principais:

- (i) A pressão do governo;
- (ii) A imagem da organização; e
- (iii) As tendências de mercado.

A pressão do governo foi considerada como o principal motivador, devido à obrigatoriedade das organizações em estar em conformidade com as regulamentações ambientais vigentes (SELES, 2016). Em relação às tendências de mercado, vale ressaltar que, com o advento da Economia Circular, os negócios sustentáveis têm crescido nos anos mais recentes, de modo que, para o oferecimento de novos produtos e serviços sustentáveis, o papel da manufatura se mostra também fundamental nesse quesito, com destaque ao emprego das chamadas tecnologias exponenciais da Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, tais como as tecnologias de manufatura aditiva, a *Industrial Internet of Things (IIoT)*, entre outros (DRATH; HORCH, 2014; SCHWAB, 2016; LIAO *et al.*, 2017).

Em direção oposta aos motivadores, as barreiras para a adoção de *GM* também estão presentes no contexto da manufatura e considerar sua relevância é de extrema importância, visto que podem representar um grande obstáculo para a presença e longevidade da *GM* na indústria. Gupta *et al.* (2015) indicam que, dentre as principais barreiras para a devida adoção da *GM*, destacam-se aquelas relacionadas à:

- (i) Falta de conscientização ou informação;
- (ii) Legislação fraca e incertezas relacionadas à legislação futura;
- (iii) Baixa demanda e baixa pressão pública provenientes dos clientes; e
- (iv) Rejeição devido aos custos altos de curto prazo para investimentos em novas tecnologias, a se considerar ainda a incerteza dos benefícios da sua aplicação futura.

Dornfeld *et al.* (2013) e Silva (2016) agrupam as barreiras em três grupos:

- (i) Barreiras econômicas, causadas devido aos custos oriundos de ações reativas das organizações em relação à gestão ambiental, como o tratamento e

disposição dos resíduos, ao invés de se investir em ações proativas, focadas no conceito da *GM*;

- (ii) Barreiras tecnológicas, causadas pela ausência de tecnologias mais adequadas na indústria que resultariam na redução na utilização de materiais e energia em determinados processos que os tornariam ambientalmente mais adequados; e
- (iii) Barreiras gerenciais, causadas pela falta de métricas e indicadores gerenciais apropriados para tratar questões específicas de *GM*, e em novos métodos de compilação e manuseio dos dados e informações, visando um melhor apoio à tomada de decisão.

Apesar das barreiras supracitadas, muitas delas estão sendo superadas devido aos benefícios gerados pelos motivadores previamente destacados até aqui às organizações interessadas na temática. Assim, os riscos associados às barreiras à adoção da *GM*, nos últimos anos, estão sendo superados gradativamente, conforme, por exemplo, mostra o evolutivo das publicações sobre *GM*, como será discutido na seção 2.1.2.

Em relação ao *status* atual da *GM* e suas perspectivas futuras, apesar da *GM* ter origem na década de 1990, apenas em anos mais recentes estudos mais robustos têm se tornado mais frequentes. Em sua revisão, Yoon *et al.* (2016) relataram que a pesquisa em manufatura sustentável, aplicada sobre vários tipos de tecnologia, focadas principalmente na obtenção de métodos de manufatura menos complexos, emergiu consideravelmente durante a última década. Com base neste cenário, devido ao tema possuir características exploratórias de um contexto ainda em fase emergente, a literatura especializada necessita dar maiores demonstrações que contemplem as principais transformações que sistemas produtivos podem e devem empreender para se tornarem ambientalmente adequados (JABBOUR, 2013), trabalhando como um impulsionador da maior aplicação da *GM* nas organizações. Nesta direção, projetos de pesquisa e desenvolvimento desempenharão um papel fundamental buscando oferecer opções adequadas para responder às necessidades apontadas (GARETTI; TAISCH, 2012). Rehman e Shrivastava (2013) apontam também a existência de espaço para se realizar esforços mais intensos, visando à *GM*, por parte de governos, bem como de organizações privadas, por meio da utilização de plataformas comuns entre todos os praticantes, resultando em maior compartilhamento e difusão de conhecimento.

Por fim, vale ressaltar que, dentre os processos de manufatura com maior potencial para aplicações envolvendo *GM*, se destacam os processos de usinagem, devido ao fato de

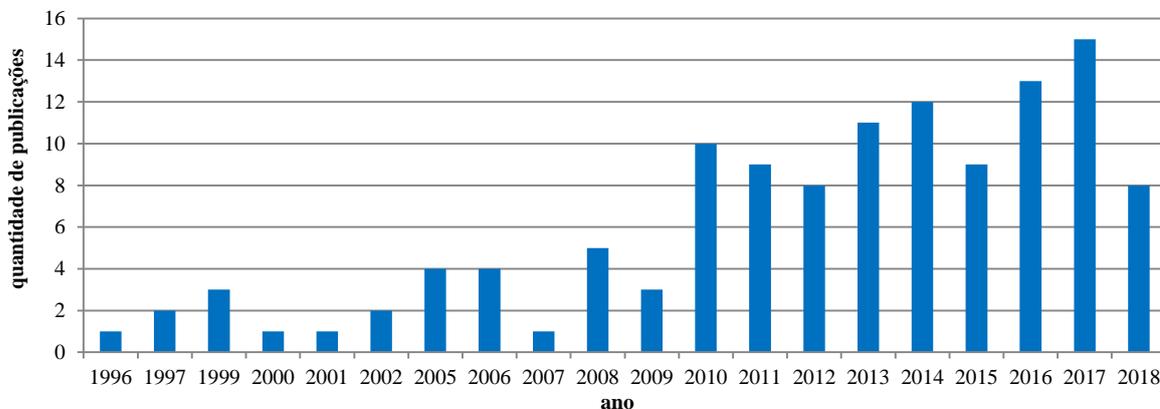
envolverem atividades que agregam valor, mas que requerem altas demandas energéticas, e pelo considerável dispêndio de resíduos sólidos gerados nos processos (LIU *et al.*, 2005; DIAZ *et al.*, 2010; SILVA; SILVA; OMETTO, 2016).

2.1.2 Estudos de GM em processos de usinagem

A primeira publicação alusiva à GM focada em processos de usinagem, com base em buscas realizadas na base de dados *Web of Science*, ocorreu no ano de 1996. Para tanto, Firmino *et al.* (2019) utilizaram como *string* de busca os termos “*green manufacturing*” e “*machining*”, e o operador booleano “*and*” para concatená-los. Nenhum critério adicional (e.g. ano de publicação, tipos de documento, idioma) foi utilizado.

Verifica-se, conforme representado na Figura 2, que o período 1996-2009 apresentou baixa representatividade, com 27 publicações, tendo, no máximo, cinco publicações por ano. Todavia, a partir de 2010, ao menos oito publicações foram realizadas anualmente, com 57 publicações concentradas nos últimos cinco anos, sobre as quais foi realizada uma análise mais detalhada por meio da leitura dos seus títulos e resumos.

Figura 2 – Avanço de publicações em GM em processos de usinagem



Fonte: Firmino *et al.* (2019)

Após análise, duas publicações foram descartadas por não apresentarem aderência ao tema. As 55 publicações restantes foram separadas por seguimento e quantificadas. O seguimento mais prolífico foi o de alteração/melhoria de design de processo, com 36 publicações, 65,45% do total, com maior foco na redução do consumo de energia nos processos, visando, como consequência, também reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Os resultados desta separação por seguimento estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição do volume das publicações pelos seguimentos estudados

Seguimento estudado	Quantidade de publicações	Percentual de contribuição
Alteração/melhoria de <i>design</i> de processo	36	65,45
Melhorias em técnicas e/ou meios de resfriamento	13	23,64
Aplicação de ferramental mais eficiente	4	7,27
Aplicação de novas tecnologias de fabricação	2	3,64
TOTAL	55	100,00

Fonte: Firmino *et al.* (2019)

Foi considerada viável a classificação acerca dos autores do período 2014-2018, para demonstrar a característica de quem está atualmente publicando mais sobre o tema, visando a apurar a eventual concentração de publicações em poucos autores ou se há diversidade de autoria. Para esta categorização, baseada em produtividade, em continuidade e em atual frequência na publicação no tema, conforme Walter e Bach (2013) e Silva, Silva e Ometto (2016), distribuiu-se os autores conforme os critérios apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Categorias dos autores em função do enquadramento produtivo

Categoria	Descrição da categoria	Critérios para classificação
Entrantes	Autores recém-iniciados no tema	≥ 2 publicações entre 2016 e 2018 0 publicações antes de 2016
Transientes	Autores relativamente permanentes no tema	≥ 2 publicações em até 4 anos diferentes ≥ 1 publicação entre 2015 e 2018 ≥ 1 publicação antes de 2015
Continuantes	Autores já consolidados no tema	≥ 2 publicações em até ≥ 5 anos diferentes ≥ 1 publicação entre 2016 e 2018
<i>One-timers</i>	Autores eventuais	1 publicação em qualquer ano
Retirantes	Autores que não estão mais publicando no tema	≥ 2 publicações até 2015 0 publicações após 2016

Fonte: Walter e Bach (2013) e Silva, Silva e Ometto (2016)

Este levantamento resultou em 360 autores distintos. Dentre eles, há dois autores com o maior volume de publicações, com 6 publicações cada. Ainda, há um autor com 5 publicações, um com 4 publicações, 14 autores com 3 publicações e 30 autores com 2 publicações, indicando a existência de apenas 48 autores com um número superior a 2 publicações no tema (13,33% do total). Em seguida, os autores foram classificados segundo seu enquadramento produtivo, ilustrando o perfil dos atuais pesquisadores do tema. A classificação está representada na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição dos autores segundo enquadramento produtivo

Categoria do autor	Quantidade	%
Entrantes	0	0,00
Transientes	3	0,83
Continuantes	15	4,17
<i>One-timers</i>	312	86,67
Retirantes	30	8,33
TOTAL	360	100,00

Fonte: Firmino *et al.* (2019)

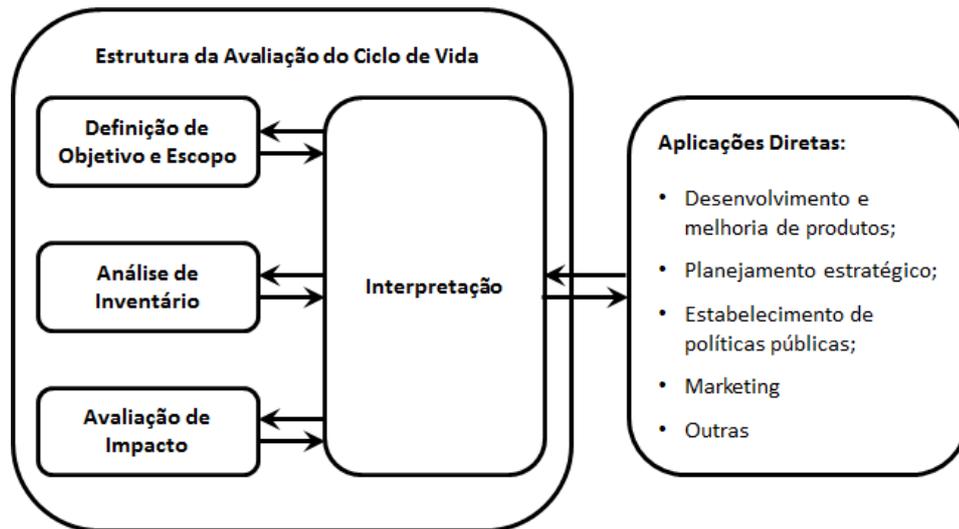
Com esta distribuição, destaca-se a predominância de *one-timers*, com 312 autores distintos na amostra de artigos, indicando que pesquisadores ainda estão publicando eventualmente no tema, sem apresentar recorrência. As demais categorias se apresentaram pouco representativas.

Baseando-se nos apontamentos coletados até aqui, é possível concluir que o tema *GM* em processos de usinagem tem mostrado ascensão nos últimos anos. No entanto, a maioria dos estudos ainda se concentra em temas envolvendo apenas alterações no processo, visando, principalmente, à economia de energia na usinagem, enquanto que um menor número de estudos está olhando para os impactos do ciclo de vida como um todo. Assim, esta dissertação contribui para o desenvolvimento da *GM* em processos de usinagem, conforme os objetivos de pesquisa anteriormente descritos.

2.2 ACV em processos de manufatura

Uma das técnicas mais utilizadas nos estudos recentes sobre *GM* é a ACV que, segundo a ABNT (2009a), enfoca nos aspectos e impactos ambientais potenciais de todo o ciclo de vida de um produto, avaliando-o desde a obtenção da matéria-prima até sua disposição final. O escopo da ACV envolve o rastreamento de todos os fluxos de material e energia de um produto, desde a extração da matéria-prima do ambiente até a disposição final do produto. Conforme apresentado na Figura 3, de acordo com a ABNT (2009a), estudos em ACV são compostos pelas fases: definição de objetivo e escopo; análise de ICV; avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV); e interpretação da ACV. Destaca-se que o fluxo de dados e informações entre as fases da ACV não se restringe a uma sequência ou a um sentido único, demonstrando ser uma metodologia dinâmica e iterativa.

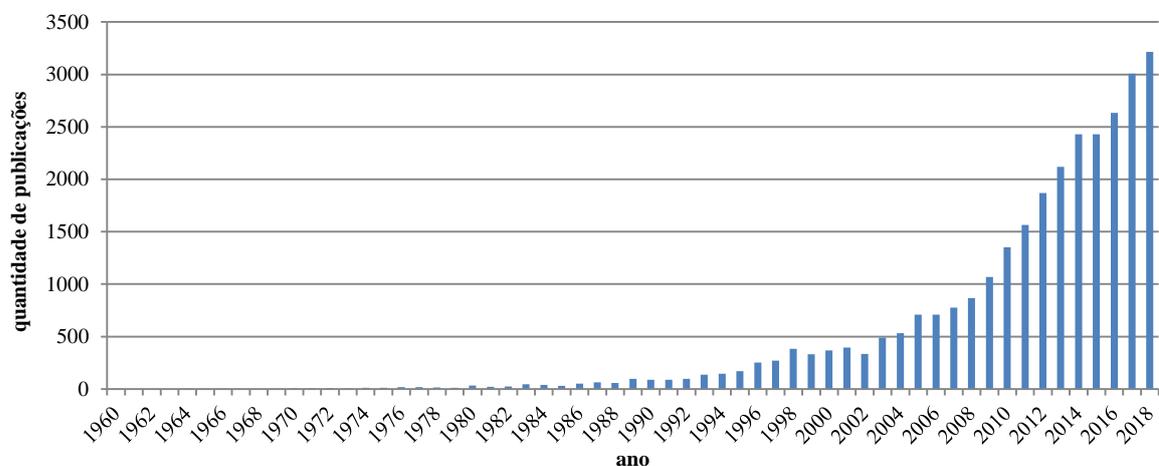
Figura 3 – Fases de estudos de ACV



Fonte: ABNT (2009a)

Os primeiros estudos utilizando a técnica da ACV ocorreram de forma tímida na década de 1960, durante a primeira crise do petróleo. Ocorria, naquele período, o despertar global da necessidade de uma utilização mais consciente dos recursos naturais. A partir de então, publicações envolvendo estudos em ACV tornaram-se frequentes na pesquisa científica, sendo que a partir do ano 2009, conforme apresentado na Figura 4, oriunda de um levantamento realizado na base de dados *Scopus*, utilizando-se as expressões de busca “LCA” ou “life cycle assessment”, ao menos 1.000 publicações ocorreram por ano, demonstrando que, definitivamente, a aplicação de ACV tornou-se um tema de pesquisa consumado no meio acadêmico, sendo que a partir de 2017, as publicações no tema ultrapassaram a marca de 3.000 publicações por ano.

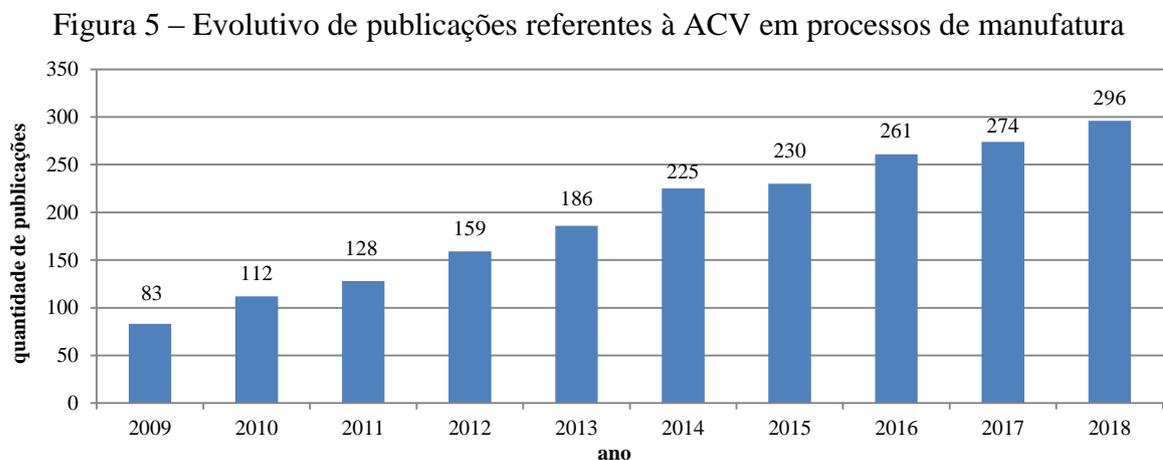
Figura 4 – Evolutivo histórico de estudos de ACV



Fonte: Firmino *et al.* (2019)

Entretanto, conforme Silva, Silva e Ometto (2016), o uso da ACV em processos de manufatura, visando a subsidiar a *GM*, é ainda recente e tem se concentrado em estudos voltados à redução do consumo de recursos, especialmente energia, e à redução da geração de resíduos sólidos nos processos, e têm sido desenvolvidos em unidades de processo em nível fabril, principalmente em processos de usinagem (SILVA *et al.*, 2015). A fim de se mensurar a atual aplicação da ACV especificamente em processos de manufatura, foi adicionado um novo critério na busca realizada anteriormente. Agora, foi adicionada a palavra “*manufacturing*” como uma nova expressão de busca, e ainda limitou-se o período de busca, visando a publicações geradas a partir do ano de 2009. Assim, a nova *string* de busca adotada foi: “*LCA*” OR “*life cycle assessment*” AND “*manufacturing*”, com o *publication year* entre 2009 e 2018.

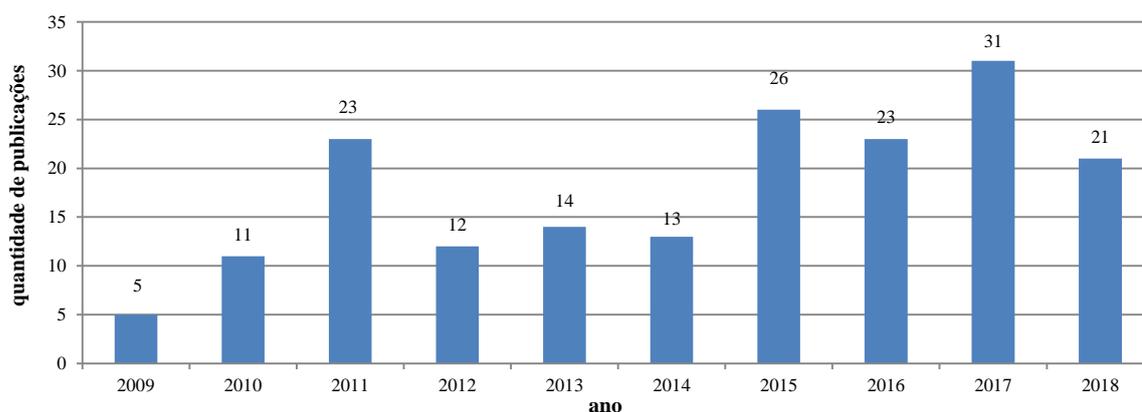
O resultado obtido com os novos critérios, conforme apresentado na Figura 5, demonstra que pesquisas envolvendo ACV em processos de manufatura estão consideravelmente estabelecidas, visto que houve, no ano de 2018, 296 publicações visando especificamente a este contexto. Observa-se, ainda, com base no evolutivo, a ascensão na quantidade de publicações ao longo do período apurado.



Fonte: Firmino *et al.* (2019)

Visando a obter informações robustas para subsidiar o presente trabalho, foi realizado um novo refinamento nos critérios de busca inicialmente utilizados. Foi adicionado o termo “*machining*” aos critérios de busca, visando a localizar as publicações referentes à aplicação de ACV focadas especificamente no processo de usinagem. Os resultados desta busca podem ser observados na Figura 6, e demonstram que a aplicação de ACV em processos de usinagem ainda está em fase de maturação, podendo, portanto, ser considerada uma oportunidade para novas pesquisas.

Figura 6 – Evolutivo de publicações referentes à ACV em processos de usinagem



Fonte: Firmino *et al.* (2019)

Percebe-se, ainda, ao se calcular a razão entre o volume de artigos relacionados especificamente à ACV em processos de usinagem (dados da Figura 6), em relação ao total de artigos relacionados à ACV em processos de manufatura em geral (dados a Figura 5), a presença de, em média, 9,33% daqueles focados em processos de usinagem, confirmando que, na literatura atual, os estudos de *GM* estão mais voltados, de fato, à temática de processos de usinagem.

Em seguida, visando a conhecer métodos, critérios e demais considerações de relevância utilizadas em estudos de ACV em processos de usinagem, de modo que pudessem ser replicados no presente trabalho, as seguintes ações foram tomadas:

- (i) Limitada à pesquisa entre os anos 2016-2018, resultando em 75 publicações, a fim de se concentrar a análise em publicações mais recentes;
- (ii) Selecionada uma amostra das 25 publicações com maior número de citações;
- (iii) Análise crítica dos textos completos das 25 publicações visando à coleta e compilação de informações-base utilizadas por estas publicações, dentre elas: os aspectos ambientais mais avaliados; as categorias de impacto mais avaliadas; aspectos metodológicos da ACV aplicada; os métodos de AICV utilizados; e os softwares e bases de dados mais utilizados.

Mediante ao resultado da análise crítica realizada, inicialmente é importante destacar que a maior parte das publicações analisadas não tratava especificamente de aplicação de ACV em processos de usinagem em si, mas de comparações entre processos de usinagem e novos processos de manufatura que têm sido desenvolvidos e explorados como alternativas

mais sustentáveis em substituição à usinagem, destacando-se neste quesito a manufatura aditiva (impressão 3D), devido principalmente, conforme apontado por Ma *et al.* (2017) e Garcia *et al.* (2018), a sua capacidade de gerar produtos com geometrias complexas em uma única etapa.

Verifica-se uma predominância (70% dos casos) de estudos do tipo *cradle-to-gate* (do berço ao portão), em que se consideram os aspectos e impactos ambientais causados pelas etapas desde a extração e beneficiamento dos recursos naturais utilizados no processo, até os processos de fabricação do produto. Desta forma, os aspectos e impactos ambientais ocorridos posteriormente à etapa de fabricação, como os da distribuição, uso e da disposição final dos produtos, não são considerados.

Em relação aos aspectos ambientais avaliados nos estudos, destaca-se a onipresença da energia, devido ao alto consumo demandado pelos processos de manufatura em geral, além de ser uma das maiores fontes de poluição do ar, devido às emissões diretas e indiretas de gases de efeito estufa (IEA, 2016). E quanto às categorias de impacto avaliadas, foram localizadas 33 categorias distintas, sendo que as mais presentes foram o Potencial de Aquecimento Global, em 58% das publicações, e o Potencial de Acidificação, em 50% das publicações.

Por fim, ao se analisar os métodos de AICV e os softwares de ACV mais utilizados, detecta-se a variedade na utilização, porém com a predominância dos métodos ReCiPe (60%) e IMPACT 2002+ (40%), e dos softwares SimaPro (64%) e Umberto (18%).

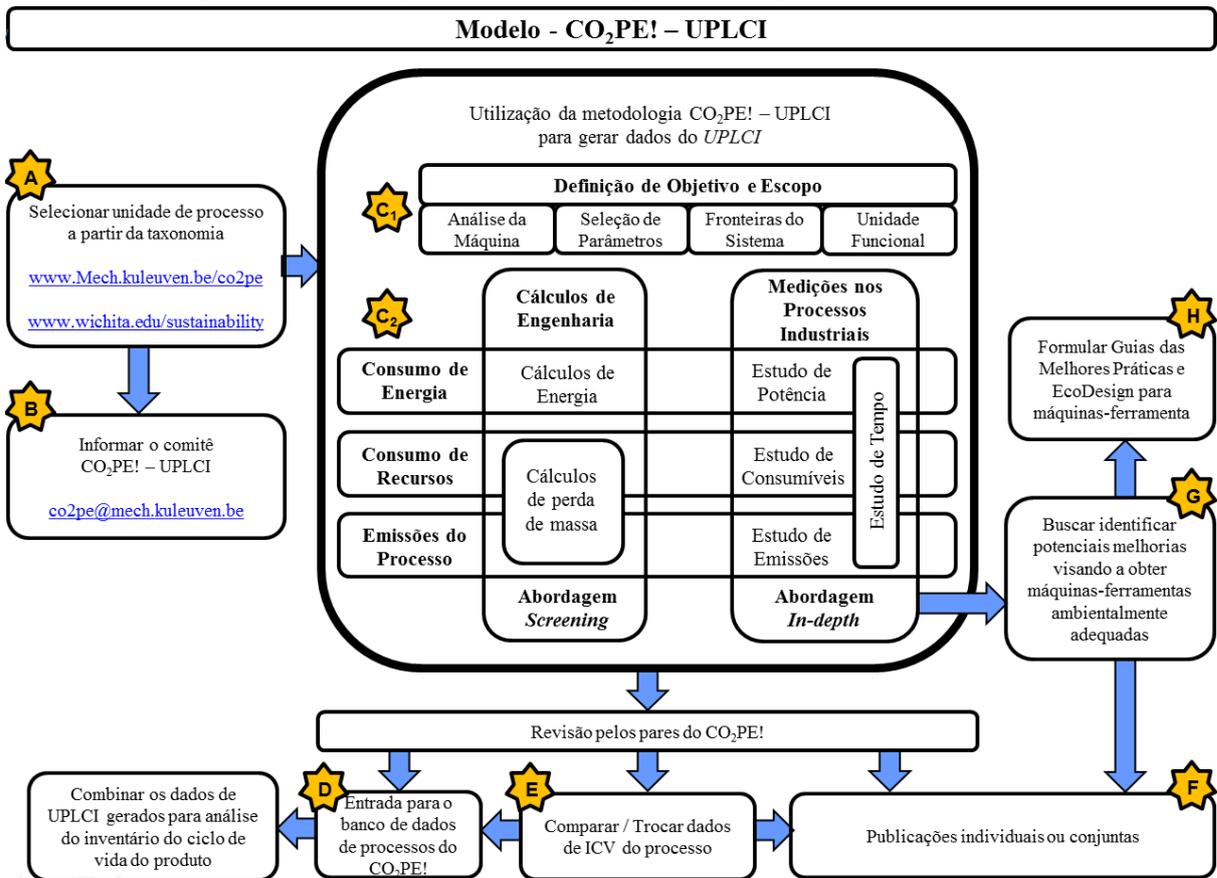
Baseado na revisão realizada ao longo desta seção, verifica-se considerável aplicação de estudos de ACV em processos de manufatura, o que reforça a importância da temática atual de *GM* na literatura. Visando a fortalecer ainda mais esta aplicação e, ainda, aumentar a viabilidade da utilização da ACV em processos de manufatura, resultando na maior difusão da *GM*, Kellens *et al.* (2012a, 2012b) desenvolveram uma metodologia específica orientada para a ACV para análise sistemática de inventários de processos unitários de fabricação, chamada *Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI)*. A partir do desenvolvimento da metodologia *UPLCI*, em 2012, praticantes de ACV em processos de manufatura utilizaram esta metodologia em seus estudos recentes (LINKE; OVERCASH; ALUMINA, 2017; SILVA; GAMAGE; HARRISON, 2017; ZHANG; ZHAO, 2019). A metodologia *UPLCI* permite um maior detalhamento durante a realização da fase de ICV, pois apresenta procedimentos metodológicos específicos para o inventário de processos de manufatura.

2.3 Metodologia UPLCI

Segundo Thorn, Kraus e Parker (2011) e Filleti *et al.* (2017), em estudos de ACV, a fase de ICV apresenta a maior probabilidade de incidência de erros, gerando restrições envolvendo a qualidade dos dados durante essa etapa, de modo que, por esta razão, demandará maior concentração de esforço, tempo e recursos para ser adequadamente realizada. Visando a mitigar essas restrições, Kellens *et al.* (2012a, 2012b) propuseram a metodologia *UPLCI*, com o objetivo de coletar, documentar e fornecer dados de ICV para uma variedade de unidades de processo de manufatura discreta, assim como identificar potenciais melhorias ambientais aplicáveis aos processos estudados. Essa metodologia ainda oferece, conforme Filleti *et al.* (2017), uma estrutura que permite a coleta de dados de ICV estratificados tanto por nível de subunidade do equipamento/processo quanto pelos seus modos de uso, permitindo a criação de inventários mais detalhados, precisos e completos de forma individual para cada subunidade do processo, podendo ser realizada sob duas abordagens, a *screening approach* e a *in-depth approach*. Zhang e Zhao (2019) destacam que um modelo *UPLCI* pode ser utilizado em diversas configurações de fabricação em que uma variedade de máquinas e materiais pode ser empregada. Nesta mesma direção, Overcash *et al.* (2018) afirmam que o foco do *UPLCI* está direcionado a criar descrições quantitativas das eficiências de energia e dos balanços de massa das unidades de processo mapeadas.

As etapas a serem desenvolvidas por meio da metodologia *UPLCI* relacionadas à aplicação de uma ACV, conforme Kellens *et al.* (2012a) e representadas no modelo *CO₂PE!* (Figura 7), consistem em:

- Localizar a unidade de processo de manufatura pela classificação *CO₂PE!*, baseada na norma DIN 8580 (etapa “A” do modelo *CO₂PE!*);
- Registrar a contribuição pretendida para a área da classificação selecionada, a fim de permitir a comparação de resultados obtidos em estudos similares (etapa “B”);
- Selecionar e seguir uma das abordagens definidas para geração e coleta de dados de ICV da(s) unidade(s) de processo de manufatura estudada(s). As abordagens selecionadas poderão ser a *screening*, a *in-depth*, ou uma combinação entre ambas (etapa “C”).

Figura 7 – Visão geral da metodologia UPLCI pelo modelo CO₂PE!

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

2.3.1 Definição de objetivo e escopo

Na primeira fase de aplicação de uma ACV, realiza-se a definição de objetivo e escopo do estudo. Ao se definir o objetivo do estudo, deve-se declarar qual a aplicação pretendida e qual a motivação para a realização do estudo a ser desenvolvido ao longo do trabalho (ABNT, 2009a). Após, deve-se definir o escopo do estudo. Conforme Kellens *et al.* (2012a) e Duflou *et al.* (2012), ao se utilizar a metodologia UPLCI, o objetivo e o escopo do estudo devem ser claramente definidos e devem apresentar consistência em relação à unidade de processo de manufatura selecionada na etapa “A” da metodologia. Para se atender a esse requisito, segundo Kellens *et al.* (2012a e 2012b), deve-se realizar nesta fase:

- (i) Análise da arquitetura do equipamento;
- (ii) Seleção dos parâmetros de processo que serão analisados ao longo do estudo;
- (iii) Identificação de todas as subunidades e modos de uso;
- (iv) Determinação das fronteiras do sistema; e
- (v) Definição da unidade funcional, incluindo seu fluxo de referência.

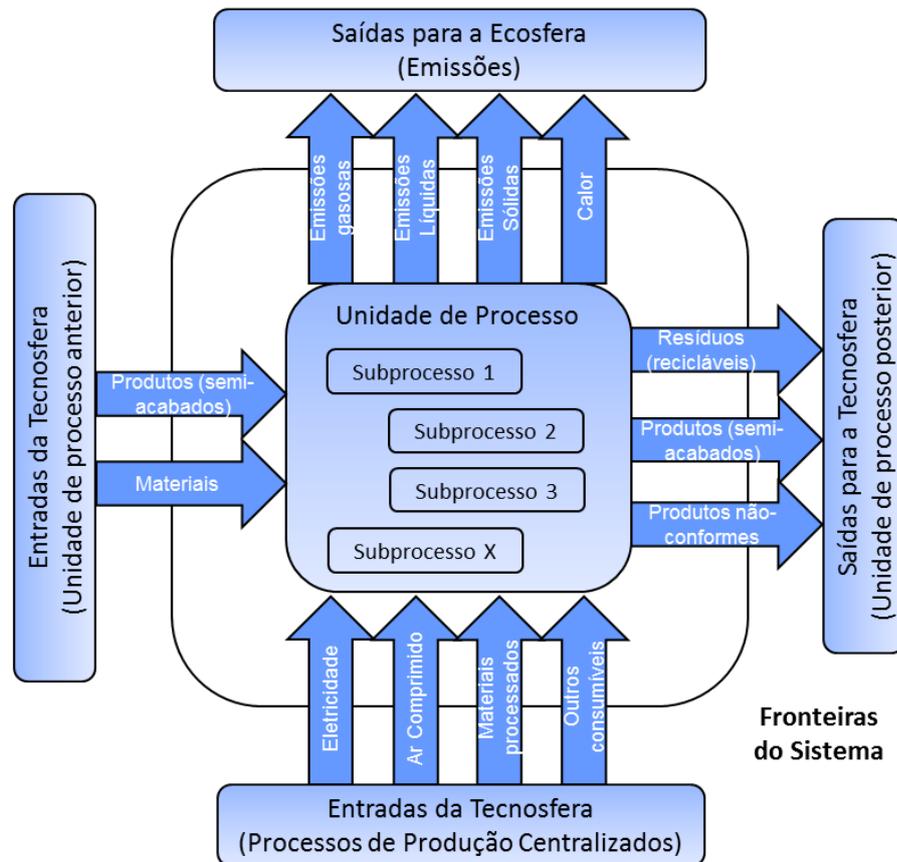
2.3.2 Fronteiras do sistema

Na definição das fronteiras do sistema, conforme a metodologia *UPLCI* (KELLENS *et al.*, 2012a), deve-se estabelecer de forma esclarecedora qual o processo será estudado e quais os seus subprocessos serão detalhadamente investigados, indicando, portanto, em que momento se inicia o sistema a ser estudado, em que momento se encerra, e quais operações ocorrem entre seu início e encerramento. Em adição, Kellens *et al.* (2012a) indicam que entradas ou saídas podem ser excluídas do estudo, caso seja detectada sua baixa relevância para as conclusões da pesquisa. Ainda, em caso de fluxos ou subprocessos serem deliberadamente excluídos do escopo, tal exclusão deverá ser claramente relatada.

Em relação à seleção dos parâmetros do processo a serem considerados no estudo, estes serão definidos em função da sua relevância para o desempenho do processo em relação à unidade funcional definida (KELLENS *et al.*, 2012a). Nesta etapa, portanto, devem ser listadas, conforme demonstrado na Figura 8, 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 – fluxos elementares) e as saídas para a tecnosfera (enviadas para a(s) unidade(s) de processo posterior(es)).

Kellens *et al.* (2012a) e Dufflou *et al.* (2012) destacam que as fronteiras do sistema são definidas para incluir apenas o estágio de operação da unidade de processamento, desconsiderando o restante do ciclo de vida da máquina em si, que envolve o processamento de materiais, a produção/montagem do equipamento, o transporte, a manutenção e descarte da máquina. Linke, Overcash e Alumina (2017) descrevem, ainda, que a operação da máquina deve ser isolada, desconsiderando, portanto, a influência de outros elementos do processo, como o manuseio e alimentação de materiais, que devem ser abordados em outras etapas da *UPLCI*. Para processos que utilizam consumíveis fornecidos por sistemas centrais (ar comprimido, lubrificantes, gases etc.), os impactos desses consumíveis são considerados com base nos dados médios disponíveis por unidade de consumível, presentes em bancos de dados existentes, tais como oecoinvent (DUFFLOU *et al.*, 2012) ou o SICV Brasil, no caso de base de dados brasileira de ICVs.

Figura 8 – Fronteiras do sistema aplicadas no contexto da metodologia *UPLCI*



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

2.3.3 Unidade funcional, seleção de parâmetros e análise da máquina

Após o estabelecimento das fronteiras do sistema, deve-se descrever a unidade funcional, cujo objetivo é especificar quantitativa e qualitativamente a medida do desempenho das saídas funcionais do sistema que será estudado. A *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environmental and Sustainability - EC/JRC/IES* (2010) e Kellens *et al.* (2012a) a definem que a unidade funcional é utilizada para definir um fluxo de referência que irá se relacionar quantitativamente com todos os outros fluxos de entrada e saída do processo, de modo que o fluxo de referência irá medir a quantidade necessária do produto para desempenhar a função expressa pela unidade funcional (SILVA, 2012). Por meio da iniciativa *CO₂PE!* (2011), conforme Kellens *et al.* (2012a) e Duflou *et al.* (2012), é proposta 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.

Em relação à seleção dos parâmetros do processo serão considerados no estudo em função da sua relevância para o desempenho do processo alusivo à unidade funcional

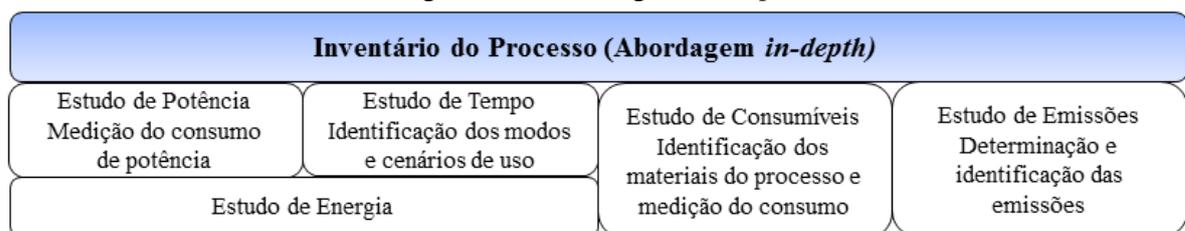
definida, baseados em experiências de processos ou literatura disponíveis (KELLENS *et al.*, 2012a). Na etapa imediatamente anterior ao início da fase de ICV, realiza-se também a análise da máquina-ferramenta do processo estudado, para que se possam considerar os cenários de uso da mesma, bem como identificar as subunidades consumidoras de energia e demais recursos e os subprocessos geradores de emissões (KELLENS *et al.*, 2012a).

2.3.4 Análise de inventário em processos de manufatura

A fase de ICV, segundo a ABNT (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. Segundo Duflou *et al.* (2012), há maneiras distintas de se realizar a coleta e a documentação dos dados de ICV, podendo ser obtidos por meio de cálculos teóricos ou por meio de medições *in loco*. Kellens *et al.* (2012a) definem que, utilizando-se da metodologia UPLCI, esta fase pode ser desenvolvida por meio de duas abordagens diferentes: *screening approach* (abordagem teórica, vista como mais rápida) ou *in-depth approach* (abordagem prática, que exige maior esforço e tempo). Esses autores ainda afirmam a possibilidade de se utilizar uma combinação entre as duas abordagens no estudo, desde que o uso das abordagens em cada etapa seja devidamente relatado no estudo.

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, a abordagem *in-depth* foi selecionada, conforme será descrito na seção 3. Segundo Kellens *et al.* (2012a, 2012b) e conforme apresentado na Figura 9, a abordagem *in-depth* é subdividida em quatro partes: estudo de potência; estudo de tempo; estudo de consumíveis; e estudo de emissões. Por meio desta divisão, objetiva-se que todo o processo seja medido e analisado mais detalhadamente em termos de seus fluxos de entrada e saída de materiais e energia, em função do tempo de fabricação e dos parâmetros de processo em investigação. Maiores detalhes sobre a abordagem *in-depth* serão fornecidos ao longo da seção 3, conforme os estudos de caso conduzidos nesta pesquisa.

Figura 9 – Abordagem *in-depth*



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

2.3.5 Estudo de tempo, potência, consumíveis e emissões

Silva, Gamage e Harrison (2017) apontam que o estudo do tempo desempenha um papel fundamental na distribuição de energia, consumíveis e emissões por um determinado período de manufatura. Estudos de tempo são desenvolvidos a fim de, primeiramente, se listar os diferentes modos de uso do processo estudado, seus respectivos parâmetros de processo desde o momento da sua inicialização até o seu desligamento por completo, e o tempo consumido por cada modo de uso e subunidade em relação ao tempo total do processo de fabricação (DUFLOU *et al.*, 2012; KELLENS *et al.*, 2012a).

Na etapa de estudo de potência é realizada a medição do consumo de energia elétrica utilizada pela unidade de processamento. O consumo é medido para cada modo de uso identificado durante a etapa de estudo de tempo e é obtido pela multiplicação entre a potência fornecida e a duração de realização de cada modo de uso (KELLENS *et al.*, 2012a; DUFLOU *et al.*, 2012). O consumo deve ser relatado tanto em relação ao equipamento como um todo, assim como por cada subunidade ativa em cada modo de produção escolhido.

Em relação ao estudo de consumíveis, conforme Kellens *et al.* (2012a) e Duflou *et al.* (2012), a medição do consumo dos consumíveis (ar comprimido, lubrificantes etc.) é realizada para cada material utilizado na unidade de processamento, em cada modo de produção, paralelamente às medições de tempo e potência. Destaca-se que, apesar do fluxo da matéria-prima não representar um impacto induzido pelo processo em estudo, a quantidade gerada de resíduos de matéria-prima (e.g. cavaco de usinagem) deve ser incluída, pois é resultado da realização do processo (KELLENS *et al.*, 2012a; DUFLOU *et al.*, 2012). Kellens *et al.* (2012a) relatam que a medição dos consumíveis pode ser realizada diretamente (medição de volume ou massa) ou indiretamente (medidores de fluxo em relação ao tempo) e que os consumíveis devem ser expressos em relação ao fluxo de referência, ou seja, em quantidade por segundo de processamento, com exceção aos resíduos criados pelo processo, que deverão ser relatados de forma percentual em relação ao fluxo de entrada desse material.

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 (KELLENS *et al.*, 2012a; DUFLOU *et al.*, 2012). Por fim, Kellens *et al.* (2012a) e Duflou *et al.* (2012) destacam que as emissões monitoradas devem ser expressas na unidade de medida pertinente por segundo de processamento. Emissões ao ar e os efluentes líquidos são os menos avaliados em estudos de *GM* em processos de usinagem, principalmente devido a

maior complexidade de mensuração comparativamente aos resíduos sólidos, que são mais tangíveis em termos de sua quantificação (SILVA, 2016; SILVA; SILVA, OMETTO, 2016).

2.3.6 Avaliação do impacto do ciclo de vida em processos de manufatura

Segundo a ABNT (2009a), a AICV tem como principal objetivo classificar e conhecer a significância dos impactos ambientais potenciais de cada fluxo inventariado na fase de ICV. É nesta fase que recursos e emissões listados na fase de ICV são categorizados em diferentes indicadores de impacto ambiental, por meio da etapa de classificação (PENG *et al.*, 2017). Ocorre também nesta fase, conforme descrito pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2019), que os fluxos obtidos na fase de ICV são traduzidos em impactos ambientais por meio da multiplicação das quantidades de inventário por fatores de equivalência específicos, levando a resultados em unidades comuns (e.g. kg de CO₂ equivalente para a categoria Potencial de Mudanças Climáticas, kg de SO₂ equivalente para a categoria Potencial de Acidificação etc.). EC/JRC/IES (2010) destaca que a seleção das categorias de impacto deve ser abrangente, de modo a considerar todas as questões ambientais relevantes relacionadas ao sistema em estudo.

A ABNT (2009a) estabelece elementos para o desenvolvimento da fase de AICV, separando-os em mandatórios e opcionais. Os elementos mandatórios são compostos pelas etapas de: seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização (etapa de seleção); correlação de resultados do ICV (etapa de classificação); e cálculo de resultados dos indicadores de categoria (etapa de caracterização). Os demais elementos que podem compor uma AICV, ou seja, as fases de normalização, agrupamento e ponderação, são definidas como opcionais (ABNT, 2009a). Vale ressaltar que a metodologia *UPLCI* não incorpora em seu escopo a fase de AICV.

Mendes (2013) descreve que o *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* (EC/JRC/IES, 2010) foi desenvolvido visando ao fornecimento de informações alusivas aos principais métodos de AICV. EC/JRC/IES (2010), inicialmente, reforça que a seleção dos métodos de AICV a serem utilizados em um estudo deva estar em consonância com os objetivos definidos para a sua aplicação, devendo, conseqüentemente, ser definidos na primeira etapa da ACV (definição de objetivo e escopo), de modo a evitar que tal seleção possa ser influenciada apenas por eventuais pré-avaliações realizadas com o desenvolvimento da etapa de ICV, que poderiam levar ao praticante a escolher os métodos que melhor se correlacionassem com os resultados previamente obtidos nesta etapa.

Segundo Mendes (2013), os métodos de AICV permitem a avaliação de diversas categorias de impacto, que podem ser avaliadas em nível *midpoint* ou *endpoint*, de modo que cada um desses níveis representam categorias de impacto em diferentes estágios do mecanismo causa-efeito sobre o meio ambiente (BEKKER; VERLINDEN, 2018). Em nível *midpoint*, a caracterização utiliza-se de indicadores situados ao longo do mecanismo ambiental, em um ponto em que se considera não ser exequível uma modelação adicional (e.g. potenciais de aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio, radiação ionizante, entre outros). Em nível *endpoint*, a caracterização é realizada considerando-se o mecanismo ambiental por completo, até o seu ponto final, sendo aplicada quando a ACV objetiva a determinação dos impactos em áreas de proteção ambiental (mudanças climáticas, danos à saúde humana, danos à qualidade do ecossistema) (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015).

Em relação ao cenário nacional, Piekarski *et al.* (2012) e Silva (2012) abordam a questão das dificuldades em se realizar a fase de AICV em estudos no Brasil devido à inexistência de métodos que considerem as especificidades brasileiras.

Ao se analisar a frequência de uso dos métodos de AICV disponíveis, baseando-se na análise crítica dos atuais estudos de ACV em processos de manufatura, relacionados à usinagem, já mencionada na seção 2.2, observa-se que os métodos de AICV mais utilizados nas publicações avaliadas, conforme apresentado na Tabela 4, foram: ReCiPe (GOEDKOOPE *et al.*, 2009) e IMPACT 2002+ (JOLLIET *et al.*, 2003), seguidos por Eco-indicator 99 (GOEDKOOPE; SPRIENSMA, 2001) e CML2001 (GUINÉE, 2001).

Tabela 4 – Métodos de AICV utilizados pelas publicações analisadas

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 *et al.* (2019)

2.3.7 Interpretação da ACV

A fase final de estudos de ACV consiste no desenvolvimento da interpretação dos resultados da ACV em relação à definição do objetivo do estudo, verificando-se, inclusive, a eventual necessidade de alterações em fases anteriormente desenvolvidas no estudo (FILLETI, 2015). Kamalakanta *et al.* (2019) define esta fase como uma abordagem sistemática visando a classificar, quantificar, verificar e avaliar os resultados de ICV e/ou de AICV (SAHOO *et al.*, 2019). Portanto, é nesta fase que os resultados das fases anteriores serão considerados e analisados em relação à qualidade dos dados aplicados e das suposições feitas em todo o estudo (EC/JRC/IES, 2010). A ABNT (2009b) estabelece que esta fase compreende os seguintes elementos:

- (i) Identificação das questões significativas (*hotspots*) oriundas dos resultados obtidos nas fases de ICV e AICV;
- (ii) Avaliação do estudo verificando sua completeza, sensibilidade e consistência;
- (iii) Apresentação das conclusões, das limitações e das recomendações do estudo.

EC/JRC/IES (2010) enfatiza que esta fase de interpretação deve apresentar os resultados da ACV de uma maneira compreensível e contribuir para que o praticante avalie a robustez das conclusões e entenda quaisquer limitações potenciais do estudo.

Em estudos sobre *GM*, em geral, a interpretação dos resultados da ACV objetiva concretizar os objetivos previamente listados nas etapas iniciais do trabalho. Nesta direção, por exemplo, parâmetros de processo podem ser redefinidos, tais como os sugeridos por Silva *et al.* (2018), onde, a partir da ACV junto com a metodologia *UPLCI* em sua versão *in-depth*, os autores sugeriram alterar parâmetros de usinagem na retificação de válvulas automotivas para referências mais ecoeficientes. Já Filleti *et al.* (2017) comparou o uso de dois rebolos de retificação diferentes, concluindo sobre os prós e contras de cada modelo investigado. Também o estudo de Silva, Gamage e Harrison (2017), aplicando o *UPLCI*, realizou a avaliação de impacto ambiental comparativa entre dois processos de usinagem eletroquímica especializados, *shaped tube electrolytic machining (STEM)* e *capillary drilling (CD)*, utilizados para se fazer furos de resfriamento em pás de turbinas, permitindo aos autores concluir que, neste estudo, o impacto ambiental do processo *STEM* é maior em relação ao *CD*, de forma a possibilitar aos usuários a seleção do processo ambientalmente mais adequado. Portanto, em estudos de *GM*, a fase de interpretação da ACV tem sido empregada principalmente para se identificar *hotspots* ambientais e se conduzir análises de sensibilidade

da ACV, para posterior tomada de conclusões e recomendações visando à melhoria do processo e/ou do ciclo de vida do produto.

2.4 Bases de dados e softwares de ACV

Por fim, o tema de base de dados em ACV é relevante, atual e sensível, especialmente envolvendo os estudos de *GM*. As bases de dados de ICV representam uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento de estudos de ACV, pois são constituídas por conjuntos de dados (*datasets*) ambientais relacionados à geração de produtos e à disponibilidade de recursos de elementos comuns a vários ciclos de vida, como energia, materiais, transporte e outros (CAMPOLINA; SIGRIST; MORIS, 2015; CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). As bases de dados estão presentes em softwares de ACV e são oriundas de inventários de ciclo de vida realizados em estudos de ACV, os quais foram oficializados como *datasets* para publicação em bases de dados somente após criteriosa análise visando a atestar sua confiabilidade. Campolina *et al.* (2015) ainda destacam que a utilização das bases de dados disponíveis reflete em considerável redução de tempo a ser consumido na coleta e tratamento dos dados pelos praticantes de ACV, o que representa uma motivação adicional para o seu uso em estudos da área.

Silva e Masoni (2016) apresentaram uma análise crítica sobre os principais bancos de dados de ICV utilizados mundialmente, identificando um total de 15 bancos de dados de destaque, e os principais modelos de negócio utilizados por eles. O modelo mais frequentemente adotado refere-se a bancos de dados de acesso gratuito, subsidiado por governos de cada país, que contam, normalmente, com um comitê gestor, formado por uma ou mais entidades públicas e/ou privadas que realizam o gerenciamento do banco de dados. Entretanto, Silva e Masoni (2016) destacaram também o volumoso número de bancos de dados particulares, financiado por meio da venda de licenças atreladas aos softwares de ACV, com destaque para oecoinvent e a base de dados GaBi.

É importante destacar, ainda em relação aos bancos de dados de ICV, que, apesar da existência de considerável quantidade de bancos de dados, ainda é reduzida a quantidade de *datasets* relacionados especificamente a processos de manufatura. Este fato motiva a geração de conjuntos de dados de ICV com a devida qualidade e confiabilidade, a fim de que possam ser ofertados para inserção em bancos de dados nacionais e internacionais para uso pela academia e outras partes interessadas, tais como os desenvolvedores de máquinas e equipamentos, e outras empresas do setor metalmeccânico.

Os softwares de ACV representam uma ferramenta fundamental que visam a apoiar a operacionalização de estudos de ACV orientados à análise e cálculos confiáveis dos impactos ambientais decorrentes dos fluxos de materiais e energia para obtenção do produto ou processo estudado, além de possibilitar a análise de cenários alternativos de ciclo de vida de produtos ou processos (SILVA *et al.*, 2019). Atualmente, pode-se identificar considerável variedade de softwares de ACV, cada um apresentando características bastante específicas quanto a sua aplicação, de modo a permitir aos praticantes de ACV a seleção daquele que mais se adequa ao seu estudo.

Cherubini e Ribeiro (2015) e Silva *et al.* (2019) listaram os softwares de ACV mais utilizados em estudos de ACV, tendo sido nomeados o SimaPro, o GaBi, o Umberto e o OpenLCA. Destaca-se que, na revisão desenvolvida na seção 2.2, estes mesmos softwares estiveram entre os mais utilizados nas publicações sobre as quais foi realizada a análise crítica, com maior destaque ao SimaPro, confirmando, portanto, a manutenção da forte presença destes softwares em estudos de ACV em processos de fabricação. Contudo, vale ressaltar que o software SimaPro não apresenta atualmente uma base de dados específica para o fornecimento de *datasets* sobre a manufatura de produtos/materiais, envolvendo processos de usinagem, por exemplo, ou outros. Entre estes softwares citados, apenas o GaBi apresenta uma base de dados específica voltada aos processos de manufatura e intitulada *manufacturing processes*. Todavia, tal base de dados conta atualmente com apenas 71 *datasets*, e nenhum deles foi desenvolvido a partir da metodologia *UPLCI*. Entre os *datasets* disponíveis, se destacam os processos de usinagem (furação, retificação, torneamento, usinagem a laser, etc.), os processos de tratamento metálico como galvanização, e processos de secagem e moldagem (prensagem hidráulica, pneumática) de peças metálicas, poliméricas e para compósitos.

Visando ao desenvolvimento de infraestrutura adequada para a maior difusão da metodologia de ACV no Brasil, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) idealizou o Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida (SICV Brasil), um banco de dados criado, em 2016, para abrigar ICVs de produtos e processos nacionais, com alto grau de qualidade e com representatividade geográfica, tecnológica e temporal (SILVA; MASONI, 2016; IBICT, 2019). O objetivo central desta base de dados, cujo acesso é gratuito, é proporcionar ao Brasil um sistema capaz de organizar, armazenar e disseminar dados de ICVs alusivos à indústria nacional, e que seja reconhecido internacionalmente. Silva e Masoni (2016) ainda indicam que a criação da SICV Brasil possibilita, inclusive, resolver uma

importante deficiência existente nas bases costumeiramente utilizadas nos estudos, que oferecem poucos ou nenhum conjunto de dados desenvolvido para o contexto brasileiro.

Destaca-se que, visando à ampliação dos dados inseridos no SICV Brasil, esta base de dados incentiva aos atores presentes na indústria, na academia e no governo a ofertar e depositar o inventário desenvolvido em seu estudo de ACV, de modo que serão oficializados após um processo minucioso de revisão, antes de serem disponibilizados em definitivo para acesso global. Entretanto, conforme os resultados de uma *survey* realizada por Silva e Masoni (2016), dentre uma gama de empresas entrevistadas quanto à sua disposição em doar seus conjuntos de dados para o desenvolvimento do SICV Brasil, apenas 36,4% afirmaram estar dispostas a doar seus dados de imediato, enquanto que 63,6% afirmaram que “talvez” doariam, ressaltando que, para que pudessem confirmar sua doação, questões relacionadas à confidencialidade dos dados deveriam ser discutidas. Este mesmo levantamento indicou que esta garantia de confidencialidade representou, inclusive, o maior motivador para as empresas doarem seus conjuntos de dados ao SICV Brasil, seguida da oportunidade de as empresas terem seus inventários revisados por especialistas de ACV antes de serem oficializados na base de dados do SICV Brasil, fato que poderia beneficiar as empresas, pois possibilitaria a geração de novos métodos de coleta de dados no processo produtivo estudado ou, ainda, a proposição de melhorias nestes processos produtivos oriundos das análises realizadas por estes pares. Em relação às barreiras relacionadas ao uso do SICV Brasil, as principais referem-se à existência de poucos conjuntos de dados disponíveis e ao baixo de número de setores cobertos com os conjuntos de dados já disponíveis ao público, indicando a necessidade de uma forte ampliação dos dados disponíveis nesta base de dados, o que acarretaria em maior motivação para sua utilização e, conseqüentemente, em grande fortalecimento do SICV Brasil como um todo.

Por fim, vale ressaltar que, assim como a grande maioria das demais bases de dados existentes, o SICV Brasil também carece de inventários sobre processos de manufatura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Nesta seção são descritos os procedimentos, as definições e as informações relacionadas à modelagem de dois processos de usinagem, utilizando-se da metodologia *UPLCI*, visando ao atendimento do objetivo do trabalho de se descrever, monitorar e melhorar o desempenho ambiental destes processos que visam à fabricação de tubos de alumínio com características e dimensões especificadas pelo Departamento de Engenharia do Produto da empresa. O produto final é fabricado a partir de tubos de alumínio fundido, inseridos neste processo em seu estado bruto. Cada processo de usinagem avaliado será tratado como um estudo de caso independente e serão chamados de EC-1 e EC-2. Tais processos são desenvolvidos em dois equipamentos distintos, entretanto, com similaridades entre si, visto que foram produzidos pelo mesmo fabricante. As Figuras 10 e 11 apresentam uma visão geral dos equipamentos e suas subunidades referentes aos EC-1 e EC-2.

Figura 10 – Centro de usinagem e suas subunidades referentes ao EC-1



Fonte: O próprio autor

Figura 11 – Centro de usinagem e suas subunidades referentes ao EC-2



Fonte: O próprio autor

Um dos equipamentos, cujo processo foi avaliado no EC-1, refere-se a um Centro de Usinagem construído em 2011, com alimentação elétrica 380 V, trifásico. O outro equipamento, cujo processo foi avaliado no EC-2, refere-se a um Centro de Usinagem construído em 2018, com alimentação elétrica 380 V, trifásico. Ambos foram fabricados pelo mesmo fabricante. Mediante às descrições, aos detalhamentos e às imagens fornecidas, nota-se a similaridade de modelos e capacidade de ambos os equipamentos, destacando-se, entretanto, o intervalo de sete anos da fabricação entre eles, de modo que o mais recente absorveu inovações tecnológicas decorrentes da diferença do período em que foram fabricados. A definição da aplicação do estudo nestes processos de usinagem foi devida a:

- (i) Serem os processos de produção com maior duração por peça fabricada dentro do parque fabril estudado, com duração média superior a 70 minutos por ciclo;
- (ii) Capacidade de fabricação, nos EC-1 e EC-2, de produtos com dimensões superiores a qualquer outro equipamento do mesmo parque fabril; e
- (iii) Alta taxa de utilização de energia elétrica e de insumos de produção.

Em relação aos modos de uso dos equipamentos, desde o momento da sua inicialização até o seu completo desligamento, foi possível se relacionar quatro modos de uso distintos, a seguir identificados:

- **Startup:** Estado em que o equipamento está iniciando seu funcionamento, aguardando o início do ciclo de usinagem, mas nenhuma operação está acontecendo – somente a subunidade primária está ativada;
- **Standby:** Estado em que o equipamento finalizou um ciclo de usinagem e está aguardando pela retirada do produto acabado e inserção da matéria-prima para o início de um novo ciclo de usinagem;
- **Full Load:** Estado em que o equipamento está realizando a usinagem, ou seja, a remoção de cavaco do produto. Ao longo deste modo de uso, além da remoção de cavaco em si, está também contemplada a movimentação que o cabeçote realiza para buscar ferramenta no porta-ferramentas, ou realizando a troca da ferramenta, ou realizando a aproximação ao produto após já ter realizado a troca da ferramenta;
- **Shutdown:** Estado em que o equipamento finalizou a produção da demanda diária e será, portanto, desligado.

Dentre esses quatro modos de uso, apenas o modo *full load* pode ser considerado como produtivo, visto que os demais modos de uso não proporcionam agregação de valor ao objetivo do processo, portanto, sendo considerados não produtivos. Destaca-se que, ao longo do ciclo de produção de tubos de alumínio, durante o modo de uso *full load*, diferentes métodos de usinagem são realizados, os quais serão monitorados detalhadamente para que seus fluxos possam ser inventariados. Os métodos de usinagem realizados tanto em EC-1 quanto em EC-2 são:

- (i) Fresamento;
- (ii) Mandrilhamento;
- (iii) Furação; e
- (iv) Roscamento.

Por meio do monitoramento desses métodos de usinagem em ambos os estudos de caso, foram identificadas e nomeadas dez operações distintas, às quais se dará o nome de suboperações, desempenhadas pelos equipamentos ao longo de cada ciclo, realizadas para se obter o tubo de alumínio na condição de produto-acabado, sendo:

1. Fresamento total nos lados A e B;
2. Mandrilhamento do diâmetro nº 1 nos lados A e B;
3. Furação dos lados A e B;
4. Roscamento dos lados A e B;
5. Mandrilhamento do diâmetro nº 2 nos lados A e B;
6. Mandrilhamento do diâmetro nº 3 nos lados A e B;
7. Chanfro nos lados A e B;
8. Furação do lado B;
9. Usinagem de rebaixo no lado B; e
10. Movimentação do cabeçote para troca de ferramentas.

Em adição, a partir do estudo do ciclo do processo e seus modos de uso, foram identificadas as subunidades presentes nos equipamentos, que, em função do modo de uso e da suboperação em desenvolvimento, podem estar em condição:

- (i) Ativada;
- (ii) Energizada mas com ativação intermitente;
- (iii) Energizada mas não ativada; ou
- (iv) Desligada.

Já as subunidades listadas são:

- (i) Sistema primário (iluminação, agregado hidráulico, computadores e sensores);
- (ii) *Spindle*;
- (iii) Porta-ferramentas;
- (iv) Sistema de refrigeração;
- (v) Sistema de exaustão; e
- (vi) Transportador de cavaco.

A Tabela 5 apresenta uma correlação entre os modos de uso e as subunidades dos equipamentos, indicando quais delas estariam ativadas, em modo de ativação intermitente, em *standby*, ou seja, energizada mas não ativada, ou totalmente desligadas durante cada modo de uso, a fim de, futuramente, se possibilitar maior facilidade na interpretação dos motivadores de maior consumo de energia e insumos durante a realização dos processos, além dos impactos potenciais.

Tabela 5 – Correlação entre os modos de uso e a ativação das subunidades dos equipamentos

Modos de Uso	Subunidades					
	Sistema Primário	Spindle	Porta-Ferram.	Refrige-ração	Sist. de Exaustão	Transp. Cavaco
<i>Startup</i>	●	-	-	-	-	-
<i>Standby</i>	●	⊙	⊙	⊙	-	-
<i>Full Load</i>	●	○	○	○	●	○
<i>Shutdown</i>	●	-	-	-	-	-

Legenda:

- Ativada
- Energizada mas com ativação intermitente
- ⊙ Energizada mas não ativada
- Desligada

Fonte: Elaborado pelo autor

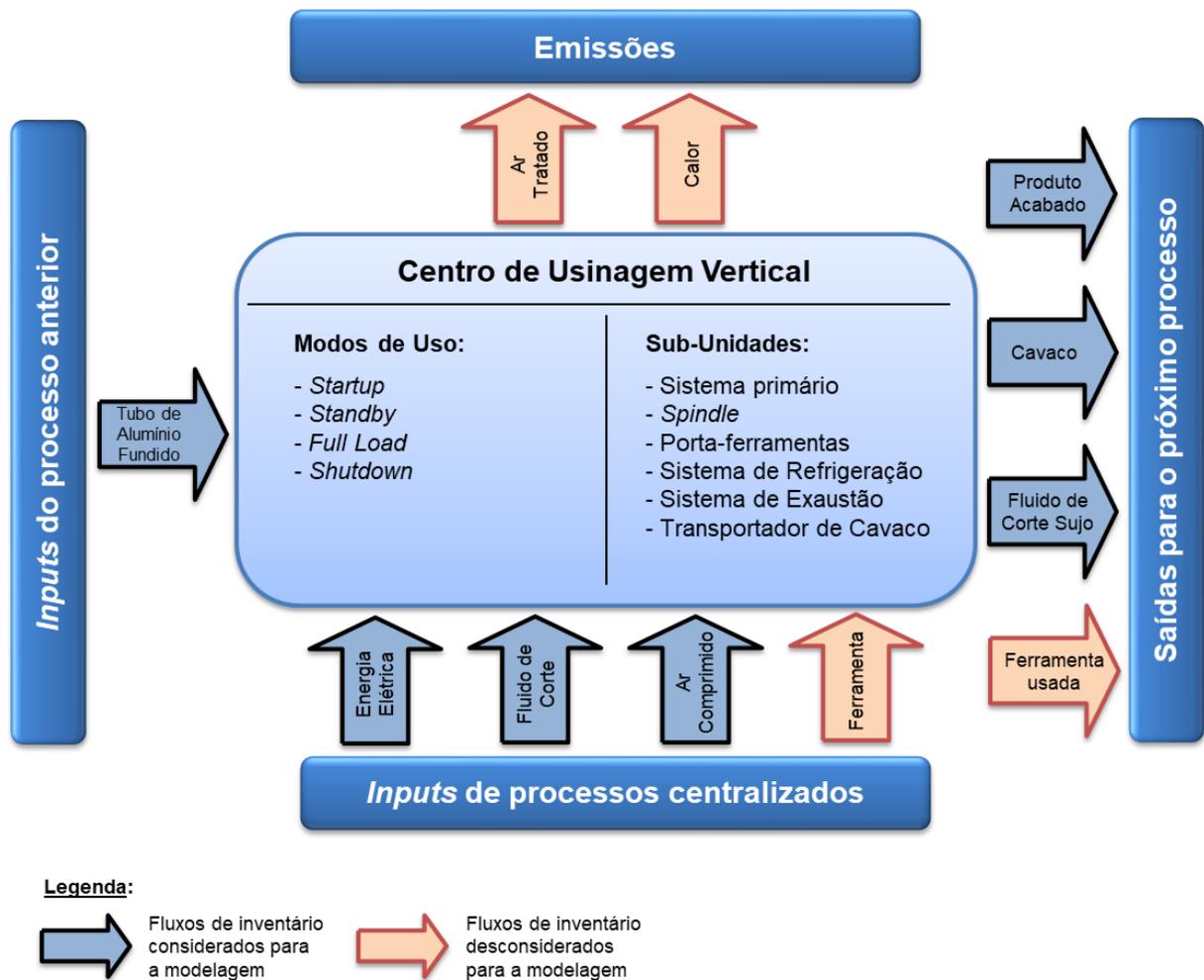
3.2 Métodos

3.2.1 Unidade funcional, fluxo de referência e fronteiras do sistema

Ao se descrever a unidade funcional, objetiva-se especificar a medida do desempenho das saídas funcionais do produto/sistema que será estudado, e o fluxo de referência mede a quantidade do produto necessário para se cumprir a função expressa pela unidade funcional. Baseado neste conceito e, ainda, obedecendo à sugestão proposta pela metodologia *UPLCI* de se indicar o fluxo de referência considerando o tempo de 1 segundo de processamento, para o presente estudo, a unidade funcional é expressa pela remoção de $0,788 \text{ cm}^3/\text{seg}$ de alumínio. Já o fluxo de referência é expresso por: remoção, por meio de usinagem mecânica, de $0,788 \text{ cm}^3/\text{seg}$ de alumínio, oriundos de tubos de alumínio fundidos, resultando em três tubos usinados, considerados produtos-acabados.

Na Figura 12 estão definidas as fronteiras do sistema, indicando, além das entradas e saídas do sistema estudado, também os seus modos de uso e suas subunidades.

Figura 12 – Fronteiras do sistema estudado



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

Para a realização da etapa de ICV, visando à coleta de dados em ambos os estudos de caso, adotou-se a abordagem *in-depth* do *UPLCI*. A abordagem *in-depth* tende a reduzir as incertezas em estudos de ACV e na geração de inventários para posterior utilização por outros estudos do gênero e, inclusive, visando à geração de conjuntos de dados (*datasets*) para suprimento de bancos de dados de ICV com foco em processos de manufatura.

Primeiramente, em busca dos dados de *foreground*, foi estabelecido o passo a passo das etapas desenvolvidas ao longo dos processos, visando a determinar os parâmetros de processo a serem monitorados no estudo. Os dados de *background* utilizados neste estudo foram oriundos do *GaBi Database*, presente no software *Gabi Education 8.7*. As etapas estabelecidas para coleta dos dados de *foreground* foram:

- 1ª etapa: Medir o tempo, o consumo de energia elétrica e de demais insumos

(alumínio, fluido de corte, ferramenta de usinagem, ar comprimido) em cada modo de uso dos EC-1 e EC-2;

- 2ª etapa: Medir a geração de resíduos decorrentes dos modos de uso;
- 3ª etapa: Compilar os dados de inventário coletados, a fim de se realizar cálculos de entrada e saída totais, para o fechamento do balanço de massa/energia do sistema do produto representado na Figura 12.

Em relação à qualidade requerida dos dados, ao se realizar o inventário das entradas e saídas, a precisão dos dados coletados, a completeza, a representatividade, a consistência e a reprodutibilidade foram considerados fundamentais. A fim de se atender a estas premissas, todos os dados coletados ao longo deste estudo foram medidos *in loco*, no chão-de-fábrica, ou calculados mediante utilização de softwares de referência, como o *AutoCAD* e o *Smath Studio*.

Para a realização da coleta de dados *in loco*, em atendimento às etapas descritas acima, um formulário, apresentado no Apêndice A, foi desenvolvido e utilizado para preenchimento dos dados de inventário que posteriormente seriam compilados em uma planilha eletrônica, a fim de que cálculos de tempo e de consumo pudessem ser realizados para cada etapa do processo produtivo. Durante a realização de cada etapa ao longo do ciclo completo, todos os movimentos realizados pelo equipamento, os tempos de cada etapa, além dos consumos de recursos foram detalhados na referida planilha. Todas as etapas descritas nas seções seguintes foram realizadas igualmente em ambos os estudos de caso.

3.2.3 Estudo de tempo

Após a listagem dos modos de uso e das suboperações desempenhadas ao longo do ciclo, foi cronometrada a duração de cada deles, monitorando-se o ciclo completo do sistema estudado. Destaca-se que foram monitoradas seis repetições deste ciclo completo, sendo três repetições no primeiro dia de uma semana de trabalho e outras três no último dia da semana, a fim de se eliminar eventuais diferenças de desempenho do equipamento ao longo de uma semana de operação, e se obter, portanto, uma maior acurácia no levantamento dos tempos de cada uma das etapas que compõem os processos produtivos estudados.

3.2.4 Estudo de potência

O monitoramento do consumo de eletricidade foi realizado com base no estudo de potência do equipamento, monitorado com a utilização do analisador de energia trifásico FLUKE 1735, instalado no painel elétrico do equipamento, que possibilitou a coleta dados de

corrente e tensão elétrica em cada uma das três fases, que posteriormente foram convertidos em potência elétrica total (expresso em kW). Os dados foram inicialmente salvos na memória interna do aparelho, posteriormente transferidos para um *notebook*, convertidos em formato texto e, por fim, transferidos para planilhas eletrônicas, visando a compilação, manuseio e cálculos de balanço, e a validação frente ao fluxo de referência do estudo.

3.2.5 Estudo de consumíveis

Em paralelo à medição de tempo e energia, foi realizada a medição dos insumos consumíveis utilizados ao longo do ciclo. A matéria-prima utilizada, suas dimensões, os meios de produção utilizados, bem como os resíduos gerados pela realização do processo, foram listados e suas quantidades foram determinadas de duas formas distintas:

- (i) Diretamente, por meio da medição do peso ou pelo cálculo do volume; ou
- (ii) Indiretamente, pela medição do fluxo combinado com o estudo de tempo.

Os consumíveis monitorados foram:

- (i) Matéria-prima;
- (ii) Fluido de corte;
- (iii) Ferramenta de usinagem; e
- (iv) Ar comprimido.

Os resíduos gerados pelo processo nos estudos de caso EC-1 e EC-2 foram:

- (i) Cavaco;
- (ii) Fluido de corte sujo; e
- (iii) Ferramenta usada.

Especificamente para a medição do consumo da matéria-prima e do volume de geração de resíduos sólidos (cavacos), optou-se por se realizar o cálculo do volume ao invés de se medir o volume gerado *in loco*. Para tal, utilizou-se o software *SMath Studio*, em que foram inseridas informações relacionadas às dimensões inicial e final do tubo de alumínio, a fim de se obter o volume de matéria-prima nas condições anterior e posterior à usinagem.

Em relação ao fluido de corte, foram monitoradas tanto a quantidade indicada como *input* do processo, ou seja, o volume de fluido de corte que é utilizado para melhorar a eficiência do processo de usinagem, quanto o fluido de corte sujo, indicado como um dos *outputs* do processo, resultado do processo de filtragem de todo fluido de corte que é utilizado

no processo antes de ser devolvido ao reservatório central de fluido de corte, que circula no equipamento em um circuito fechado. A medição da quantidade utilizada, necessária para o desenvolvimento do processo, foi realizada por meio de medição *in loco*. Todo o fluido utilizado em um ciclo monitorado, ao invés de ser devolvido para o reservatório central, foi devolvido para um reservatório independente, a fim de tornar possível a medição do seu volume e a definição, portanto, da quantidade utilizada de fluido ao longo do ciclo.

Para o estabelecimento da quantidade de fluido de corte sujo gerado pelo processo, foi monitorado o volume de fluido de corte que é repostado no tanque de refrigeração dos equipamentos e a frequência de reposição, visto que a reposição somente ocorre em razão do descarte do fluido de corte sujo. Desta forma, entende-se que o volume de fluido de corte repostado é igual ao volume de fluido de corte sujo descartado. Em posse destes dados, o volume foi calculado mediante a Equação 1:

$$FCsj = \frac{volFCrep}{nc} \quad (1)$$

Sendo:

FCsj = volume de fluido de corte sujo gerado pelo processo (em litros);

volFCrep = volume de fluido de corte repostado (em litros);

nc = quantidade de ciclos realizados entre uma reposição e outra (em unidades).

Em relação ao consumo de ferramentas de usinagem, para a definição da quantidade de ferramentas consideradas como *input* para o processo, foi realizada a identificação e a contagem individual de todas as ferramentas utilizadas ao longo do ciclo completo de usinagem, que são montadas no porta-ferramentas do equipamento. E para a definição da quantidade de ferramentas consumidas ao longo de um ciclo de processo, visto que um dos *outputs* do processo considera a quantidade de ferramenta usada, foi utilizada a Equação 2:

$$\Sigma Ferr = \frac{(Ferr_1)}{np\zeta} + \frac{(Ferr_2)}{np\zeta} + \dots + \frac{(Ferr_z)}{np\zeta} \quad (2)$$

Sendo:

$\Sigma Ferr$ = quantidade de ferramentas consumidas por peça (em unidades);

Ferr₁; Ferr₂; Ferr_z = ferramentas utilizadas para usinagem (em unidades);

np ζ = quantidade de peças usinadas pela ferramenta (em unidades).

Após a coleta de todos os dados, conforme detalhado, os dados foram inseridos em uma planilha (Apêndice A), compilados e utilizados para consolidação do ICV.

3.2.6 Estudos de emissões

A medição das emissões gasosas, líquidas ou sólidas, oriundas de um processo, deve ser desenvolvida nos processos em que tais emissões se demonstrem relevantes em comparação aos demais fluxos monitorados. Ainda, conforme a metodologia *UPLCI*, as emissões devem ser expressas na unidade de medida pertinente dividida por segundo. As emissões geradas nos estudos de caso presentes neste trabalho, o ar tratado e o calor, representam baixa relevância quanto aos eventuais impactos à atmosfera, em razão de seu volume e sua intensidade serem consideravelmente baixos em relação ao volume e intensidade dos fluxos de entrada, de modo que se decidiu que não seriam considerados para a etapa de AICV.

3.2.7 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Para a realização da etapa de AICV, em que o sistema do produto é examinado sob uma perspectiva ambiental, o software *GaBi Education 8.7* foi utilizado nesta pesquisa.

Em relação ao método de AICV a ser utilizado, definiu-se a utilização do método *ReCiPe 2016 v1.1* pois, conforme apresentado na seção 2.3.5, é o método de AICV mais adotado na literatura envolvendo a aplicação de ACV em processos de manufatura e, ainda, é um método que abrange as categorias de impacto consideradas adequadas e importantes a serem avaliadas em relação aos impactos potenciais do processo estudado, em função dos fluxos monitorados.

Para o estabelecimento das categorias de impacto a serem avaliadas, foi realizado, inicialmente, o levantamento de todas as categorias avaliadas pelo método *ReCiPe*. Após, seguindo o mesmo critério de se optar por aquelas mais adequadas para as características do processo estudado, definiu-se que as categorias de impacto a serem avaliadas seriam:

- Potencial de Mudanças Climáticas, excluindo carbono biogênico (PMC, em kg CO₂-eq.);
- Potencial de Acidificação Terrestre (PAT, em kg SO₂-eq.);
- Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (PET, em kg 1,4DB-eq.);
- Potencial de Consumo de Água Doce (PCAD, em m³);
- Potencial de Ecotoxicidade de Água Doce (PEcAD, em kg 1,4DB-eq.);

- Potencial de Eutrofização de Água Doce (PEuAD, em kg P-eq.);
- Potencial de Toxicidade Humana, cancerígena (PTHc, em kg 1,4DB-eq.);
- Potencial de Toxicidade Humana, não-cancerígena (PTHnc, em kg 1,4DB-eq.);
- Potencial de Depleção Fóssil (PDF, em kg óleo-eq.)
- Potencial de Depleção de Metal (PDM, em kg Cu-eq.);
- Potencial de Material Particulado (PMP, em kg PM2,5-eq.).

Destaca-se, por fim, a realização da AICV sem considerar os impactos potenciais causados pelo alumínio. Tal critério foi estabelecido em razão de o alumínio não ser uma variável a ser considerada para eventuais alterações e/ou melhorias em relação ao sistema estudado, visto que não há possibilidades de substituição desta matéria-prima para a fabricação do produto gerado pelo sistema, devido a tratar-se de um produto com especificidades que não permitem a utilização de outra matéria-prima visando ao uso destinado.

3.2.8 Interpretação da ACV

Ao final do desenvolvimento das fases anteriores da ACV, foi realizada a interpretação dos resultados obtidos, visando à identificação dos fluxos e dos processos influentes no perfil ambiental do sistema estudado. Neste aspecto, destaca-se que, além da interpretação realizada sob o ponto de vista ambiental, objetivo central da ACV, o presente trabalho realizou, também, análises relacionadas a métricas voltadas à gestão da produção, como custo, tempo e flexibilidade, visando a incluir benefícios voltados ao melhor desempenho do processo sob os pontos de vista econômico e produtivo. Após, em posse dos resultados oriundos das análises ambiental e econômica, foi desenvolvida a análise da ecoeficiência dos processos desempenhados nos EC-1 e EC-2, conforme preconizado pela norma ABNT ISO 14045 (ABNT, 2014).

Por fim, foi realizada a análise de sensibilidade para ambos os estudos de caso, a fim de se verificar quais seriam os comportamentos dos EC-1 e EC-2 mediante alterações em seus fluxos ou métodos e, também, visando a estimar o quanto tais mudanças poderiam influenciar no perfil ambiental e na ecoeficiência destes processos. Para isso, melhorias foram propostas visando a um cenário futuro de fabricação para ambos os estudos de caso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo desta seção foram realizados o monitoramento e a análise do desempenho ambiental dos estudos de caso EC-1 e EC-2. Ao se realizar as atividades propostas para esta seção, foi constatada a similaridade dos processos desempenhados em ambos os estudos de caso. Tal similaridade deve-se ao fato de que:

- (i) Ambos os processos serem realizados em equipamentos fornecidos pelo mesmo fabricante e serem de modelos similares, absorvendo as mesmas subunidades, apenas com diferença de ano de fabricação de sete anos entre eles;
- (ii) Ambos os processos utilizarem os mesmos métodos de usinagem, o mesmo ferramental de usinagem e o mesmo ciclo de usinagem.

Conseqüentemente, esta similaridade entre os processos refletiram em similaridade nos dados de ICV coletados ao longo da pesquisa. Por esta razão, a partir desta seção, ao invés de realizar análises individualizadas para cada estudo de caso, tratando-os como EC-1 e EC-2, optou-se pelo cálculo do valor médio entre ambos os estudos de caso, para cada fluxo monitorado. Desta forma, os dados de ICV apresentados neste trabalho se referirão ao valor médio entre os estudos de caso, os quais também serão utilizados para a realização das fases posteriores de AICV e de interpretação da ACV.

4.1 Resultados do estudo de tempo

O estudo de tempo foi desenvolvido de forma separada para cada modo de uso do sistema estudado. Os resultados estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Consumo de tempo em cada modo de uso

Modo de Uso	Tempo [seg]
<i>Startup</i>	292
<i>Standby</i>	853
<i>Full Load</i>	4.519
<i>Shutdown</i>	15
TOTAL	5.678

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que o *full load* apresenta-se como o modo de uso com maior consumo de tempo. Tal fato foi considerado positivo, visto que é o modo de uso em que ocorre o objetivo central do sistema estudado, a usinagem, em que se promove a agregação de valor ao produto gerado pelo sistema.

Visando a um maior detalhamento do consumo de tempo no modo de uso *full load*, foi realizado um monitoramento detalhado do ciclo desempenhado neste modo de uso, realizando-se a cronometragem de cada suboperação realizada. A Tabela 7, oriunda das observações realizadas detalhadamente em dez suboperações distintas, apresenta o consumo de tempo de cada suboperação e o percentual de participação de cada suboperação em relação ao tempo total do ciclo no modo de uso *full load*.

Tabela 7 – Consumo de tempo das suboperações desempenhadas no modo *full load*

Suboperação	Tempo [seg]	Tempo [%]
Fresamento total nos lados A e B	516	11,4
Mandrilhamento do diâmetro nº 1 nos lados A e B	305	6,7
Furação dos lados A e B	355	7,9
Roscamento dos lados A e B	832	18,4
Mandrilhamento do diâmetro nº 2 nos lados A e B	247	5,4
Mandrilhamento do diâmetro nº 3 nos lados A e B	579	12,8
Chanfro nos lados A e B	243	5,4
Furação do lado B	318	7,0
Usinagem de rebaixo no lado B	126	2,8
Movimentação do cabeçote (troca de ferramenta)	1.001	22,2
TOTAL	4.519	100,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi possível verificar que a movimentação do cabeçote para a troca de ferramentas entre uma suboperação e outra representou a maior duração, com 22,2% do tempo total do ciclo, indicando que grande parte da duração deste modo de uso é consumida sem haver a realização de usinagem da peça, objetivo central do processo. Em relação a atividades de usinagem, ou seja, descartando-se o tempo em que a máquina está realizando apenas movimentações para troca de ferramentas, a suboperação que apresentou a maior duração foi a de roscamento, com 18,4% do total.

4.2 Resultados do estudo de potência

Ao se realizar o estudo de potência, também foi feita a medição do consumo de eletricidade para cada modo de uso, e os resultados estão apresentados na Tabela 8. O monitoramento do uso de eletricidade foi realizado com medições realizadas em intervalos de dois segundos, com a finalidade de se conhecer o perfil de consumo do sistema estudado, inclusive representados por cada modo de uso. O resultado desse monitoramento proporciona a geração de um gráfico detalhado do consumo de eletricidade, conforme representado na Figura 13, elaborado para representar o perfil de consumo do processo.

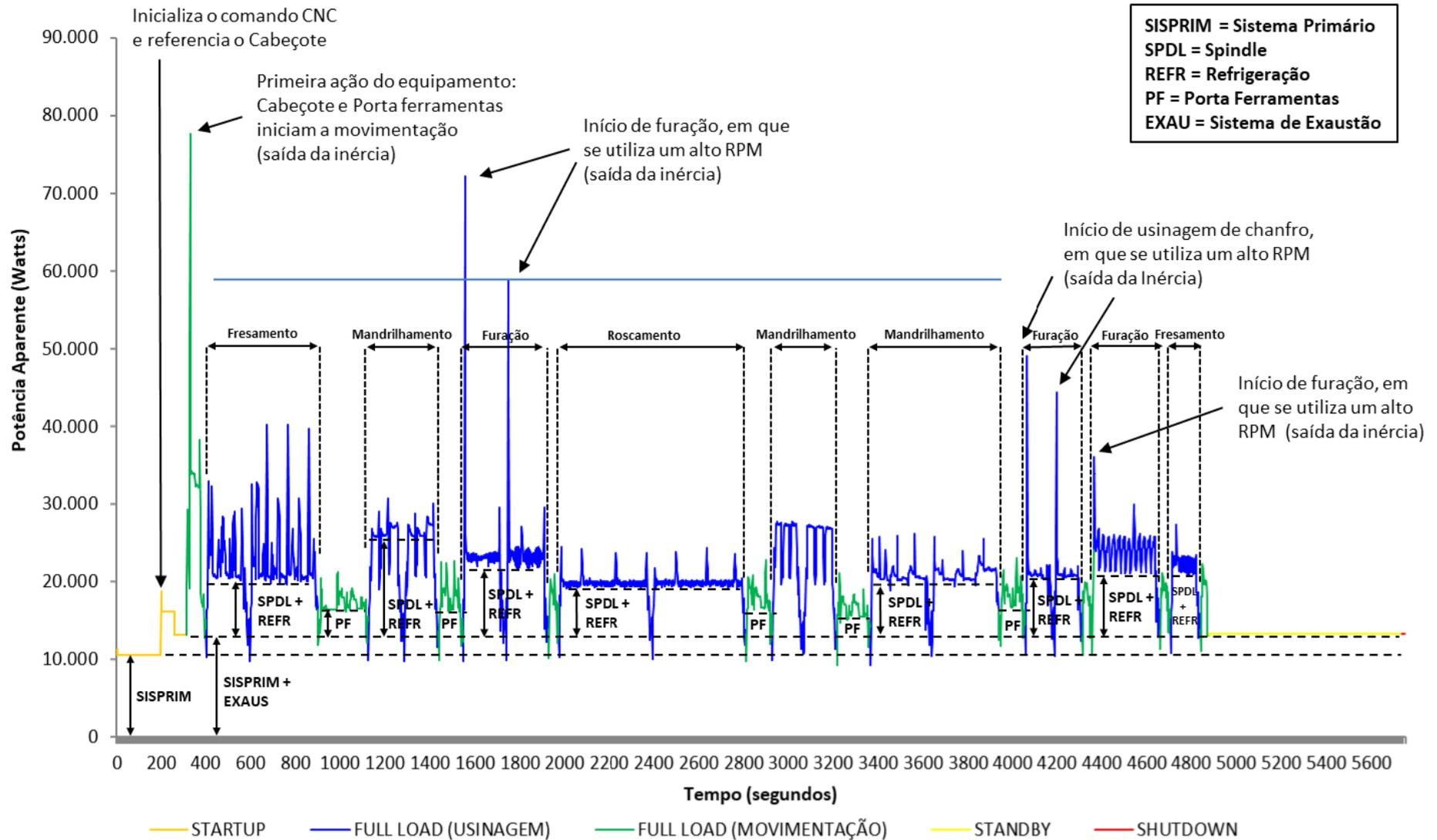
Tabela 8 – Consumo de energia em cada modo de uso

Modo de Uso	Consumo [kWh]	Consumo/Segundo [kWh / seg]
<i>Startup</i>	0,98	0,00336
<i>Standby</i>	2,83	0,00330
<i>Full Load</i>	28,26	0,00625
<i>Shutdown</i>	0,05	0,00333

Fonte: Elaborado pelo autor

Evidenciou-se, ao se monitorar o consumo de eletricidade em todos os modos de uso, o maior consumo atrelado ao modo de uso *full load*. O consumo total do equipamento para a realização do processo, abrangendo, portanto, todas as suboperações atreladas ao ciclo de usinagem do sistema, foi de 28,26 kWh, ou 0,00625 kWh/seg. A Tabela 9 foi elaborada para apresentar: (i) a compilação dos resultados do monitoramento do consumo total de eletricidade em cada uma das suboperações, incluindo uma representação do percentual de participação de cada suboperação no consumo total no modo *full load*; (ii) o consumo por segundo de cada uma das suboperações, visto que dados de consumo/segundo são de grande valia para efeito de banco de dados de ACV, pois a representação de dados por unidade de tempo possibilita a utilização destes mesmos dados por outros pesquisadores, em situações que queiram utilizar o mesmo processo produtivo, devendo, apenas, multiplicar os fluxos pelos tempos de operação em seus estudos de caso.

Figura 13 – Perfil de consumo de eletricidade do processo estudado



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Consumo de energia total e por segundo, no modo *full load*, em cada suboperação

Suboperação	Consumo Total [kWh]	Consumo Total [%]	Consumo / Segundo [kW / seg]
Fresamento total nos lados A e B	3,30	11,7	0,00655
Mandrilhamento do diâmetro nº 1 nos lados A e B	2,24	7,9	0,00823
Furação dos lados A e B	2,54	9,0	0,00812
Roscamento dos lados A e B	4,85	17,1	0,00622
Mandrilhamento do diâmetro nº 2 nos lados A e B	2,03	7,2	0,01073
Mandrilhamento do diâmetro nº 3 nos lados A e B	3,55	12,6	0,00656
Chanfro nos lados A e B	1,55	5,5	0,00729
Furação do lado B	2,06	7,3	0,00654
Usinagem de rebaixo no lado B	0,83	2,9	0,00733
Movimentação do cabeçote (troca de ferramenta)	5,31	18,8	0,00576
TOTAL	28,26	100,0	-

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Resultados do estudo de consumíveis

Ao se realizar o estudo de consumíveis, em que se visa medir as quantidades de materiais utilizados no processo estudado e as quantidades de resíduos gerados, verificou-se que tal consumo esteve restrito somente ao modo de uso *full load*.

O primeiro consumível inventariado refere-se à matéria-prima. A cada ciclo realizado, 243,38 kg de alumínio fundido são inseridos no processo por meio de três tubos. Em atendimento à recomendação de se considerar os fluxos de inventário por segundo de operação, tem-se que a matéria-prima representa um fluxo de 0,0539 kg/segundo no sistema estudado.

O fluido de corte representou uma outra entrada no processo. A composição deste fluido de corte tratava-se de uma mistura entre um óleo à base de óleo mineral e água. O óleo foi adicionado à mistura na proporção de 12%, sendo os demais 88% da concentração compostos por água. Para a realização do processo analisado, a quantidade total de fluido de corte utilizada durante todo o ciclo foi de 92,4 litros, ou 0,02045 litros/segundo.

Em relação ao consumo de ferramentas de usinagem, destaca-se que, devido à variedade de métodos de usinagem distintos realizados ao longo do processo estudado, houve

a necessidade de utilização de ferramentas distintas para cada método de usinagem desempenhado, como pastilhas, broca e macho. A Tabela 10 apresenta as quantidades de ferramentas utilizadas para geração de produtos acabados no processo estudado e o consumo médio de ferramentas por ciclo de produção realizado. Por meio deste inventário, foi possível se verificar que, somando-se o consumo parcial de cada ferramenta utilizada ao longo deste processo, totalizou-se o consumo de 0,249 ferramenta por ciclo. Ao se buscar o consumo por segundo, obteve-se um resultado inferior a 0,0001 unidade consumida por segundo, de modo que tal consumo foi considerado insignificante para ser utilizado no estudo dos consumíveis para efeito da AICV.

Tabela 10 – Quantidades de ferramentas utilizadas por ciclo de usinagem

Suboperação	Ferramentas utilizadas	Peças produzidas por ferramenta	Ferramentas consumidas por ciclo
Fresamento total nos lados A e B	1 Cabeçote com 12 pastilhas (2 arestas cada)	188	0,19149
Mandrilhamento do diâmetro nº 1 nos lados A e B	2 Cápsulas com 1 pastilha cada (2 arestas cada)	787	0,00762
Furação dos lados A e B	1 Broca	1.650	0,00182
Roscamento dos lados A e B	1 Macho	900	0,00333
Mandrilhamento do diâmetro nº 2 nos lados A e B	1 Cápsula com 1 pastilha (6 arestas)	450	0,00667
Mandrilhamento do diâmetro nº 3 nos lados A e B	1 Cápsula com 1 pastilha (2 arestas)	135	0,02222
Chanfro nos lados A e B	1 Cabeçote com 2 pastilhas (3 arestas cada)	2.700	0,00222
Furação do lado B	1 Broca	900	0,00333
Usinagem de rebaixo no lado B	1 Cabeçote com 2 pastilhas (3 arestas cada)	1.350	0,00444

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Resultados do estudo de emissões

As emissões ao ar relacionadas no processo estudado foram o calor e o ar tratado. Ao se realizar o estudo de emissões geradas no processo, em razão da geração de calor e da quantidade de ar tratado devolvido para a atmosfera representarem quantidades desprezíveis, concluiu-se ser de baixa relevância quanto aos eventuais impactos à atmosfera causados pelos resíduos gerados no processo estudado e, por esta razão, decidiu-se que não seriam considerados para a avaliação de impacto do ciclo de vida ao longo deste estudo.

Emissões devido ao uso do fluido de corte também ocorrem, visto que, parte do fluido de corte pode volatilizar devido à vazão de fluido utilizada durante a usinagem, combinada à forma de aplicação do mesmo e ao calor do processo gerado durante a usinagem. Contudo, a perda por volatilização do fluido de corte não foi considerada neste estudo, devido a também ser desprezível. Além disso, o sistema opera em circuito fechado, o que reduz drasticamente a perda de fluido após o uso. Para o cálculo do consumo de fluido devido ao seu uso, ou seja, o fluxo de saída que se perde durante o ciclo, foi realizado o balanço de massa do total de fluido utilizado, 0,02045 litros/segundo, em relação ao total de óleo para reuso que volta ao processo, 0,02036 litros/segundo. Logo, as quantidades de fluido perdidas durante a usinagem foram de 0,00009 litros/segundo. Esta quantidade que não é recuperada é posteriormente descartada junto com um filtro que é utilizado como elemento filtrante de fluido de corte que retorna para o sistema – que são processos que estão fora das fronteiras do sistema de produto.

4.5 Inventários consolidados do processo

Os dados de ICV consolidados, considerando todas as entradas e saídas do processo, estão representados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados de ICV consolidados

Fluxos		<i>Startup</i>	<i>Standby</i>	<i>Full Load</i>	<i>Shutdown</i>
Eletricidade [em kWh]	total	0,98	2,83	28,26	0,05
	por segundo	0,00336	0,00330	0,00625	0,00333
Fluido de Corte [em litros]	total	-	-	92,40	-
	por segundo	-	-	0,02045	-
Alumínio [em kg]	total	-	-	243,38	-
	por segundo	-	-	0,0539	-
Ferramenta [em unidades]	total	-	-	23	-
	por segundo	-	-	0,00509	-
Ar Comprimido [em Nm ³]	total	-	-	4,5	-
	por segundo	-	-	0,001	-
Alumínio (produto acabado) [em kg]	total	-	-	234,12	-
	por segundo	-	-	0,0518	-
Cavaco [em kg]	total	-	-	9,256	-
	por segundo	-	-	0,00205	-
Fluido de corte (para reuso) [em litros]	total	-	-	92,00	-
	por segundo	-	-	0,0204	-
Efluente líquido [em litros]	total	-	-	0,40	-
	por segundo	-	-	0,0001	-
Ferramenta (para reuso) [em unidades]	total	-	-	22,751	-
	por segundo	-	-	0,00503	-
Ferramenta usada [em unidades]	total	-	-	0,249	-
	por segundo	-	-	0,00006	-
Tempo [em segundos]	total	292	858	4.519	15

Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 AICV e Interpretação dos resultados de ACV

Após ser finalizada a etapa de coleta de dados de ICV, foi realizada a avaliação dos impactos do ciclo de vida do processo estudado. Destaca-se que, para fins de análise dos impactos potenciais totais causados pelo sistema estudado, foram considerados para a modelagem os fluxos totais utilizados ao longo dos modos de uso, pois, desta forma, torna-se possível a interpretação da relevância do fator tempo no desempenho de cada modo de uso, inclusive para que a redução de tempo de execução dos modos de uso possa ser considerada na proposição de cenários futuros de melhoria, o que não seria possível de se fazer caso a modelagem considerasse os fluxos de ICV por segundo.

A primeira avaliação relevante para o estudo referiu-se a um comparativo entre os impactos potenciais, em cada modo de uso, para todas as categorias de impacto avaliadas. A Tabela 12 apresenta os resultados comparativos.

Tabela 12 – Resultados globais de AICV, por modo de uso, alusivo ao ciclo do processo

Categoria de Impacto	Modos de Uso			
	<i>Startup</i>	<i>Standby</i>	<i>Full Load</i>	<i>Shutdown</i>
PMC (em kg CO ₂ -eq.)	3,35E-01	9,66E-01	2.246,67	1,71E-02
PMP (em kg PM _{2,5} -eq.)	5,86E-04	1,70E-03	2,76	2,99E-05
PDF (em kg óleo-eq.)	7,51E-02	2,17E-01	662,15	3,83E-03
PCAD (em m ³)	2,56E-02	7,39E-02	40,76	1,31E-03
PEcAD (em kg 1,4DB-eq.)	5,14E-05	1,49E-04	1,79E-01	2,63E-06
PEuAD (em kg P-eq.)	1,78E-06	5,14E-06	2,32E-03	9,08E-08
PTHc (em kg 1,4DB-eq.)	4,37E-04	1,26E-03	1,91	2,23E-05
PTHnc (em kg 1,4DB-eq.)	2,32E-02	6,71E-02	73,17	1,18E-03
PDM (em kg Cu-eq.)	2,25E-04	6,47E-04	10,53	1,14E-05
PAT (em kg SO ₂ -eq.)	1,82E-03	5,25E-03	8,75	9,26E-05
PET (em kg 1,4DB-eq.)	5,85E-01	1,69	804,92	2,99E-02

Legenda:

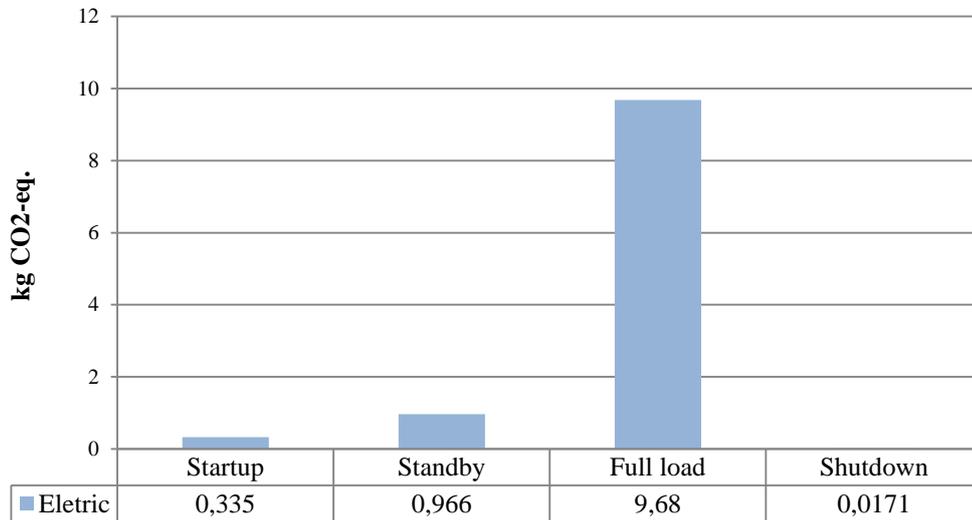
- PMC: Potencial de Mudanças Climáticas;
- PMP: Potencial de Material Particulado;
- PDF: Potencial de Depleção Fóssil;
- PCAD: Potencial de Consumo de Água Doce;
- PEcAD: Potencial de Ecotoxicidade de Água Doce;
- PEuAD: Potencial de Eutrofização de Água Doce;
- PTHc: Potencial de Toxicidade Humana, cancerígena;
- PTHnc: Potencial de Toxicidade Humana, não-cancerígena;
- PDM: Potencial de Depleção de Metal;
- PAT: Potencial de Acidificação Terrestre;
- PET: Potencial de Ecotoxicidade Terrestre.

Fonte: Elaborado pelo autor

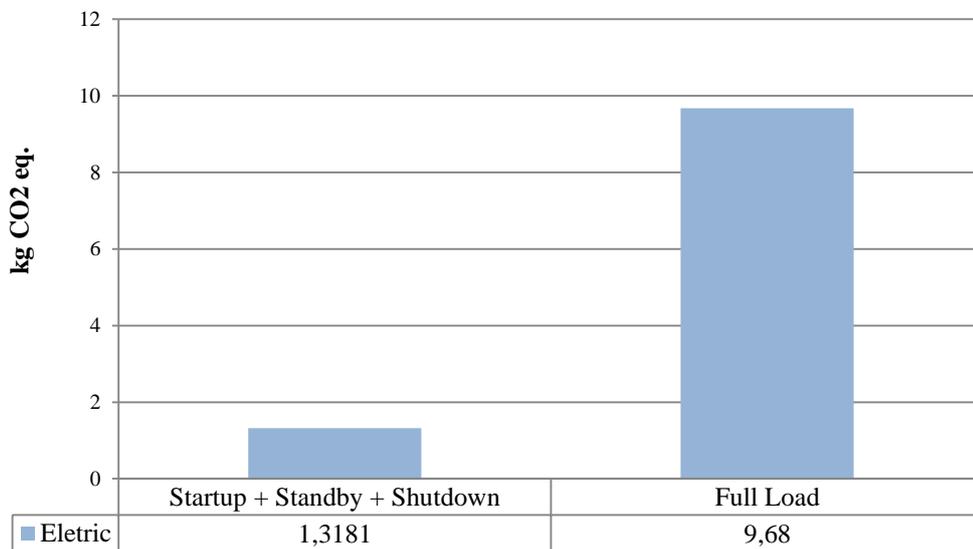
A eletricidade, além de ter sido um *hotspot* ambiental, representou o único fluxo presente em todos os modos de uso do sistema estudado. Por esta razão, foi realizada uma segunda comparação do impacto potencial com foco apenas no consumo da eletricidade. Em paralelo, foi realizada uma análise dos resultados de impactos potenciais causados pelo uso da eletricidade no modo de uso *full load* (em que ocorre a agregação de valor ao objetivo central do sistema, ou seja, a fabricação de tubos de alumínio usinados) e comparado com os resultados dos impactos potenciais causados somando-se os modos de uso *startup*, *standby* e *shutdown* (não-produtivos). Os resultados destes comparativos, por categoria de impacto, estão indicados nas Figuras 14 a 24.

Figura 14 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PMC (em kg CO₂-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



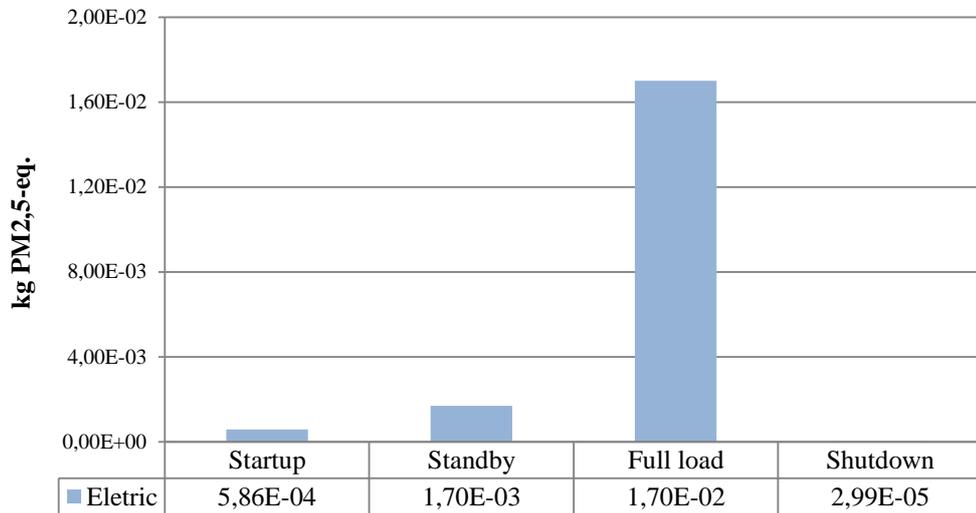
parte b)



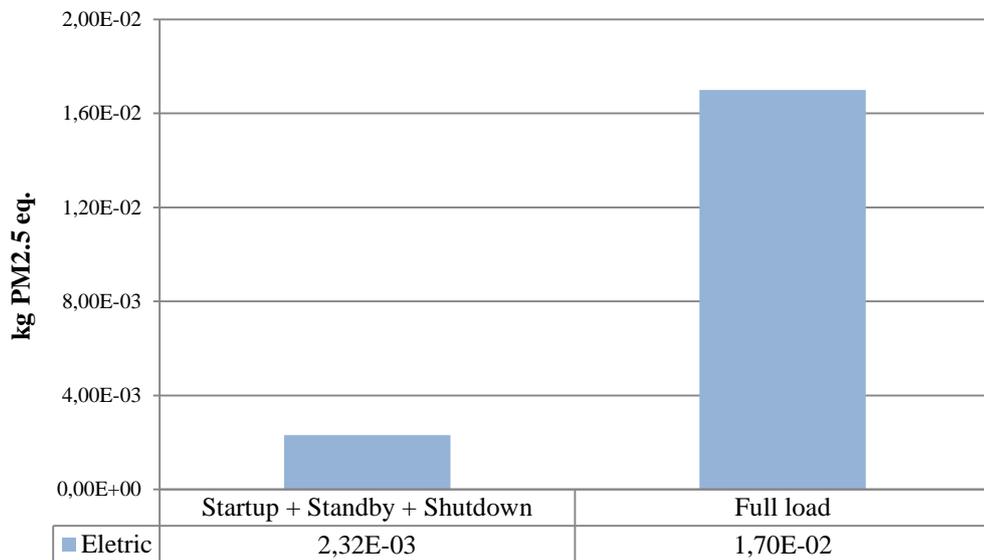
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PMP (em PM_{2,5}-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



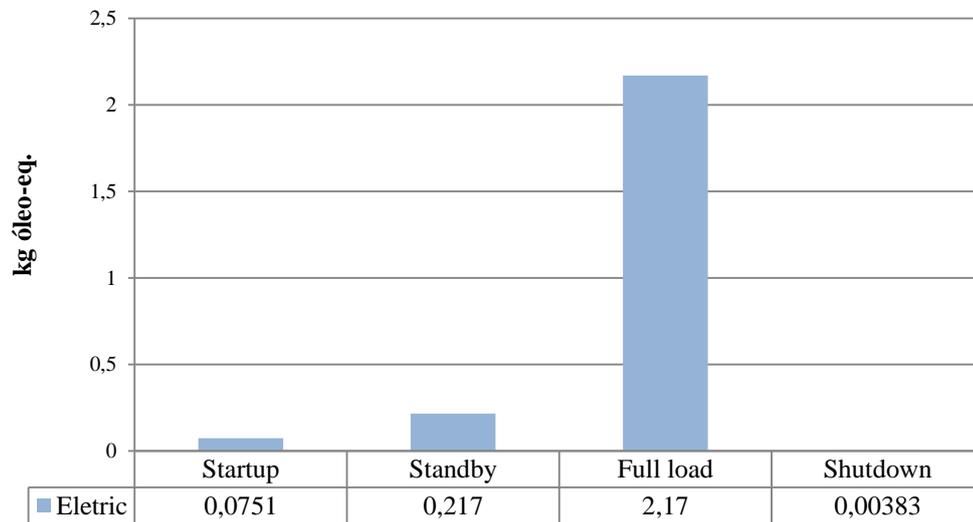
parte b)



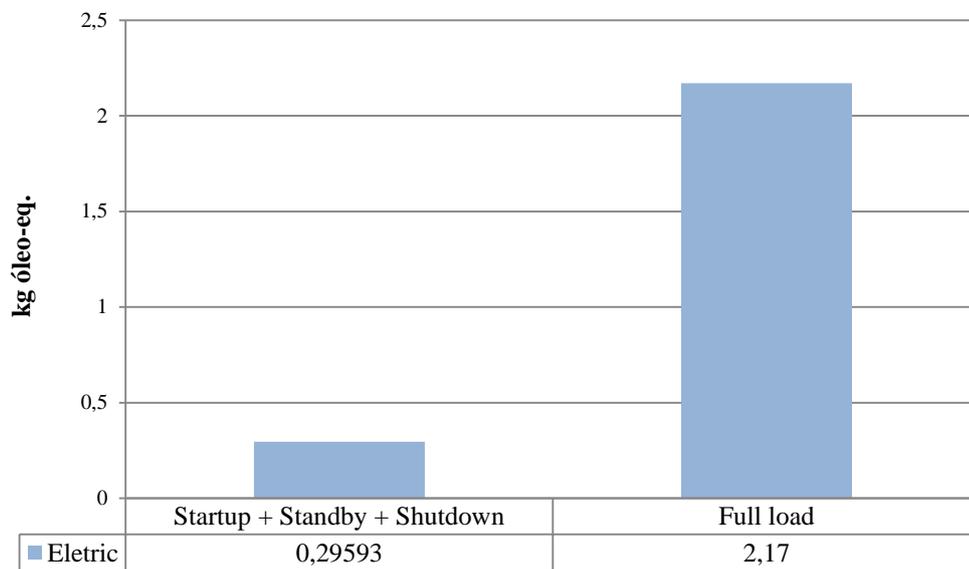
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PDF (em kg óleo-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



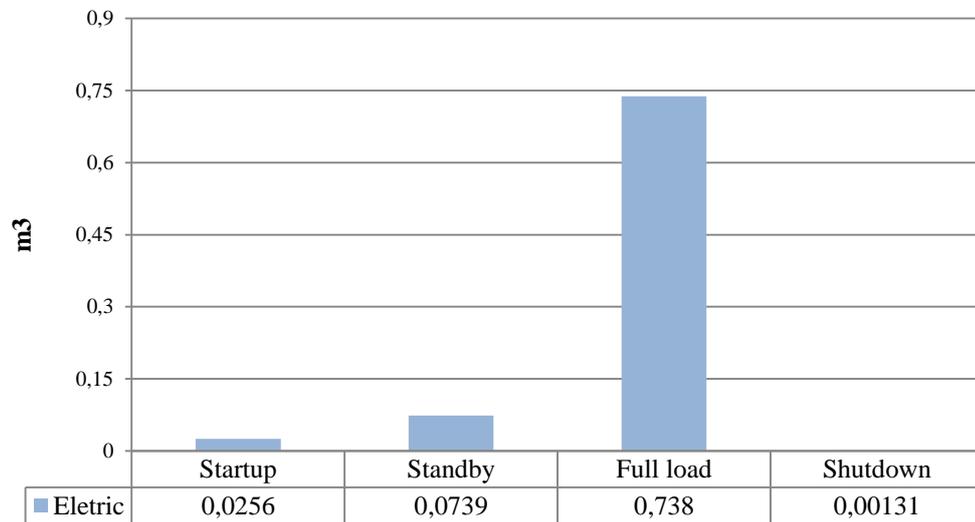
parte b)



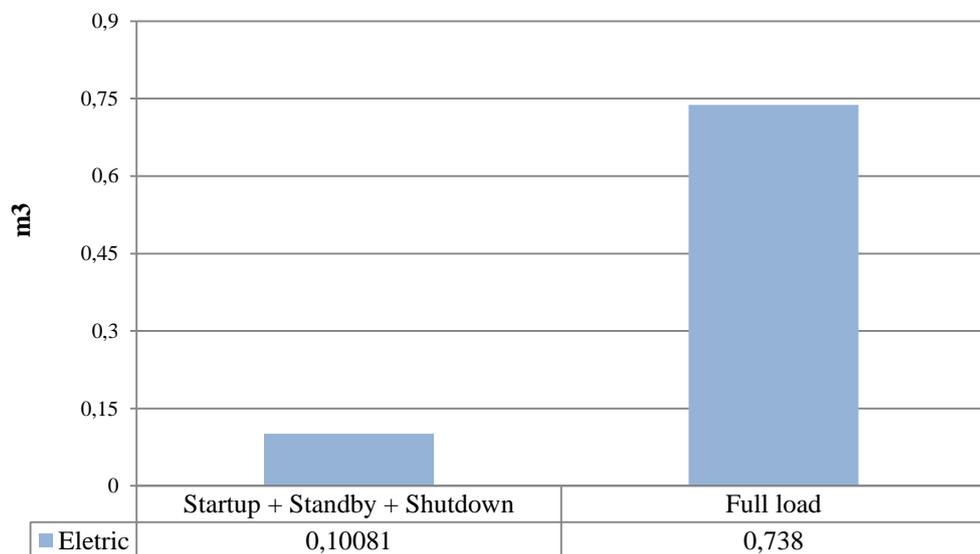
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PCAD (em m³) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



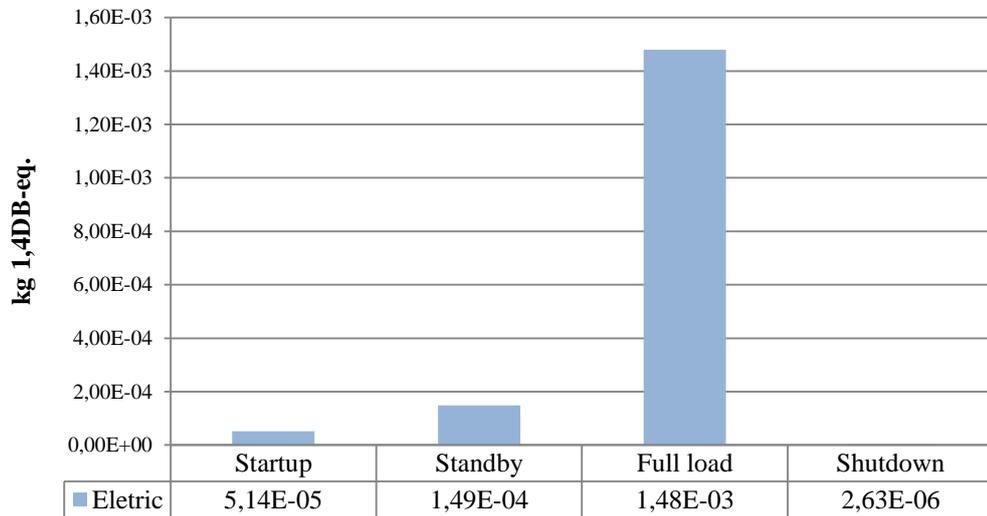
parte b)



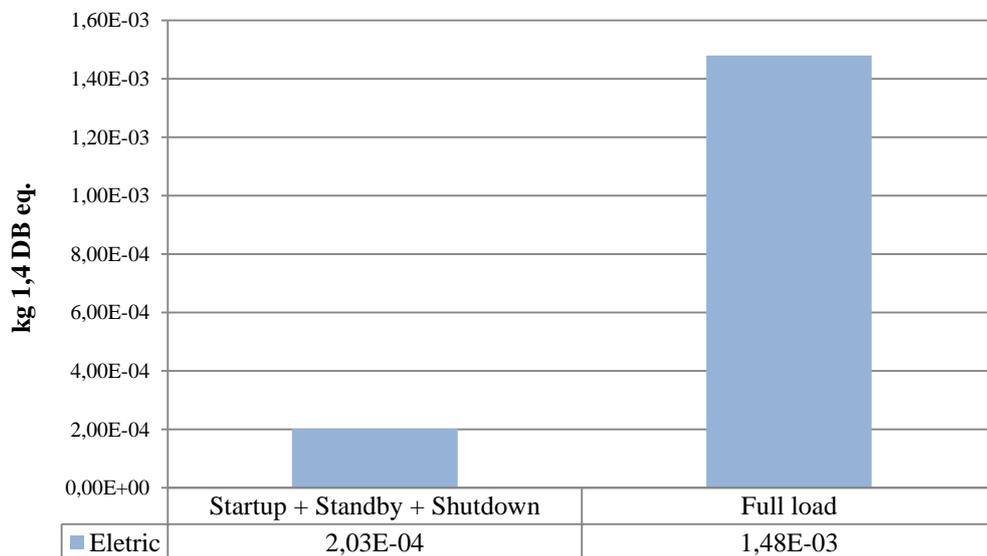
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PEcAD (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



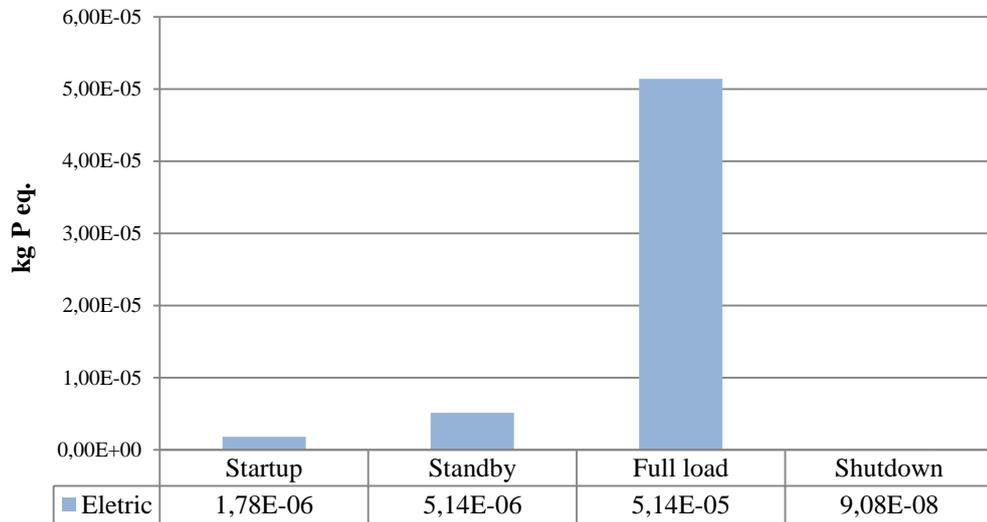
parte b)



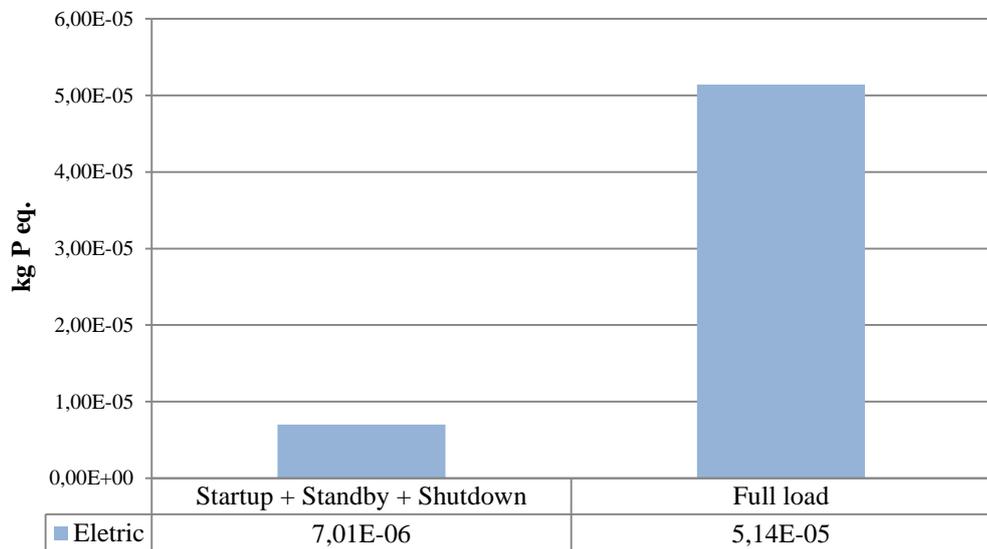
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PEuAD (em kg P-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



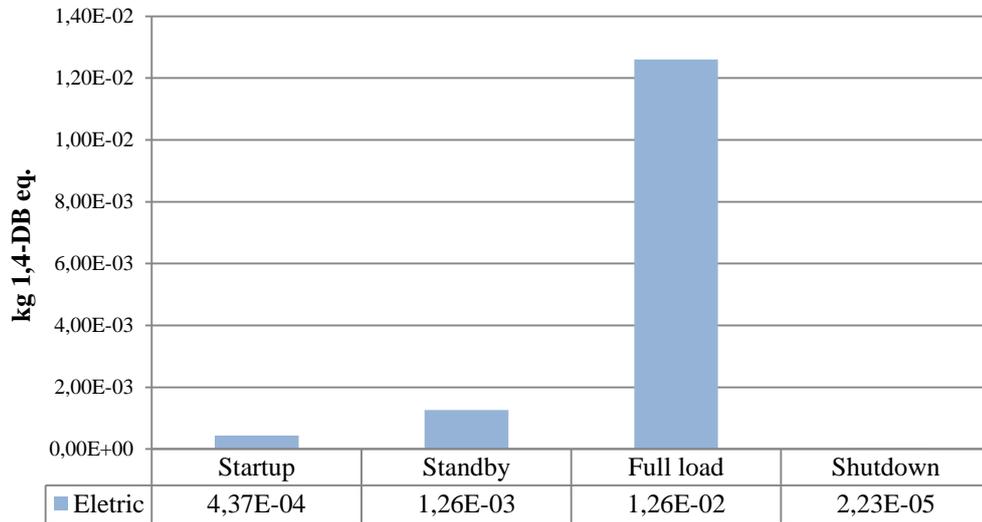
parte b)



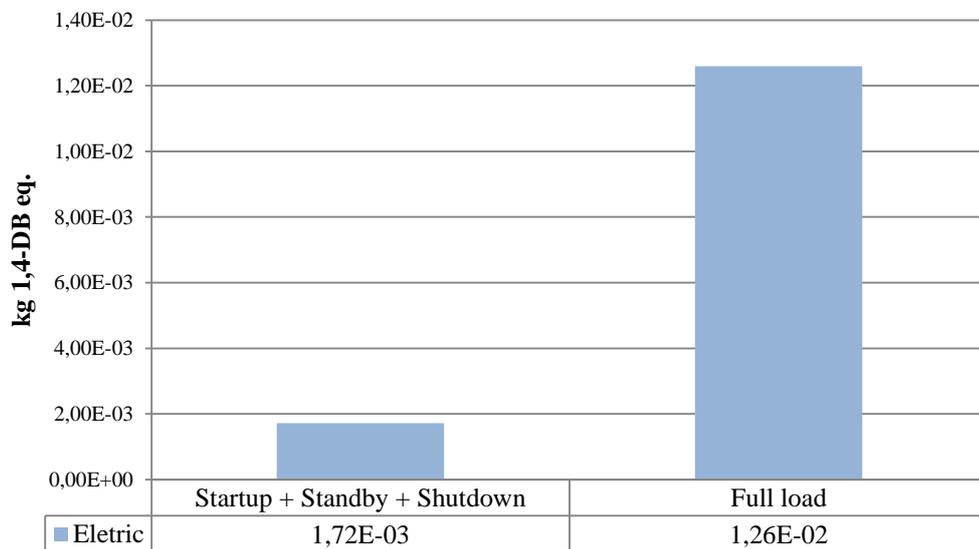
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PTHc (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



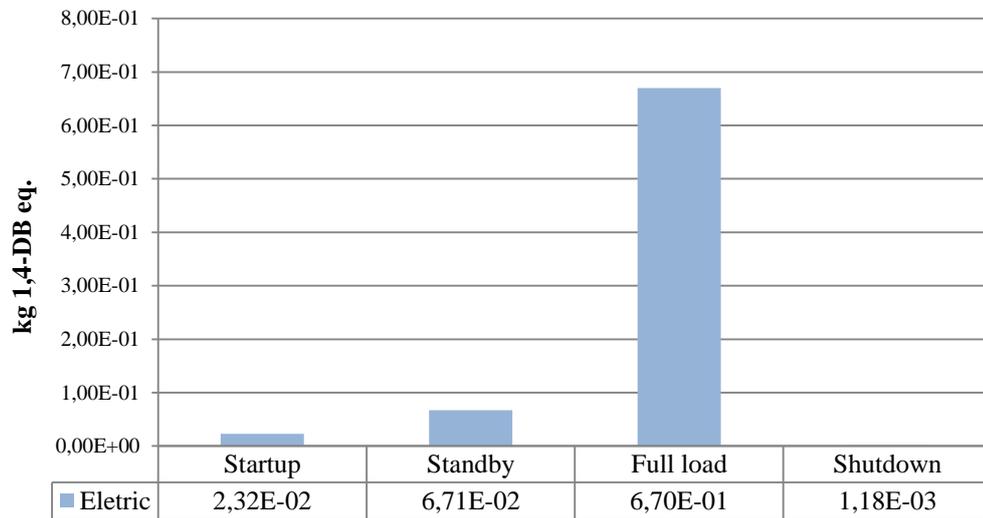
parte b)



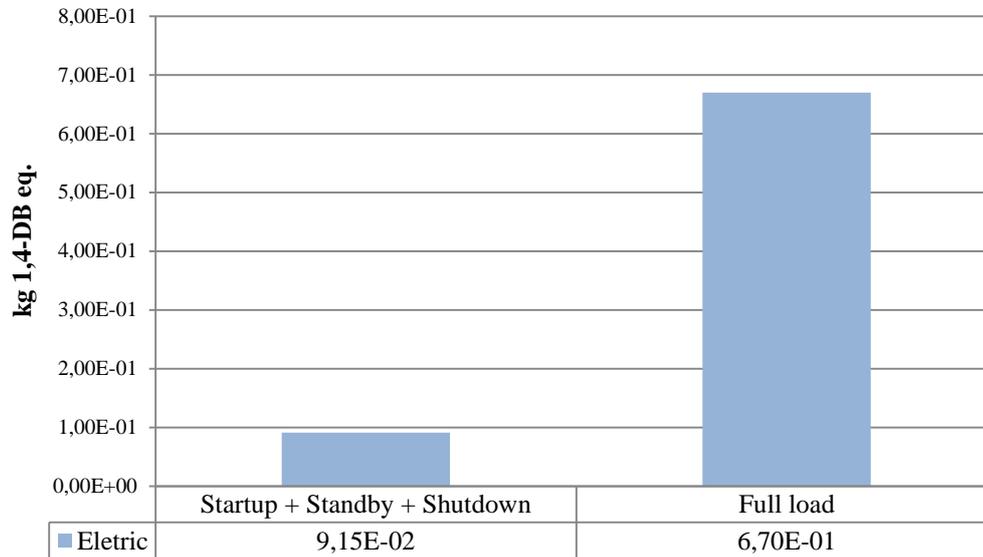
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PTHnc (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



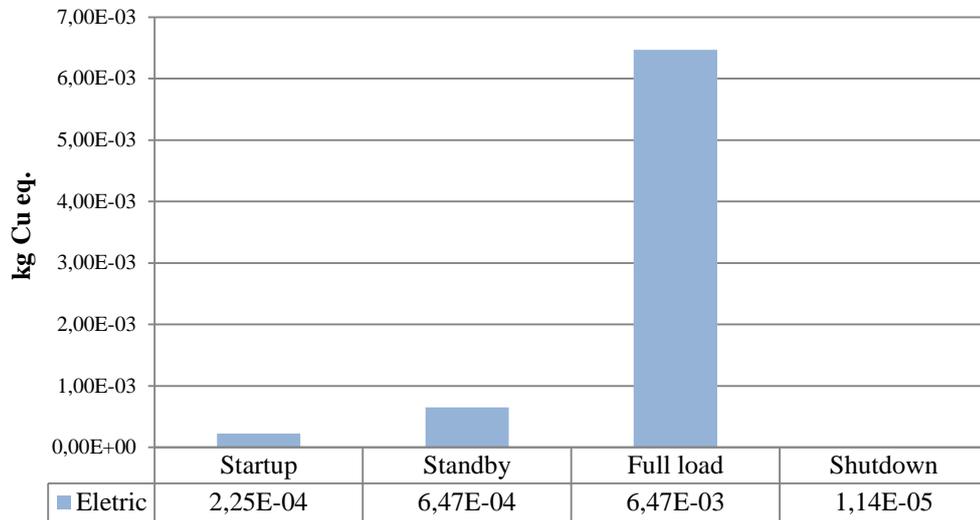
parte b)



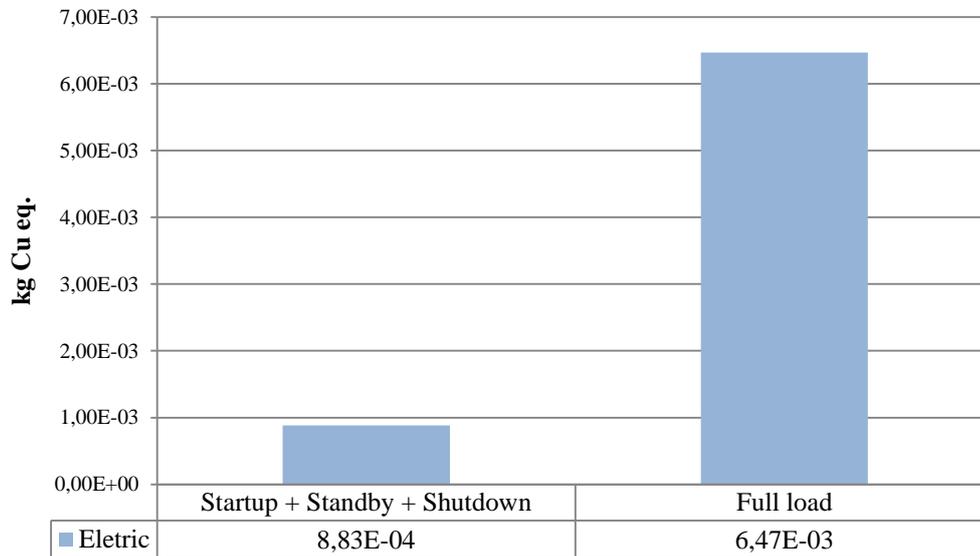
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PDM (em kg Cu-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



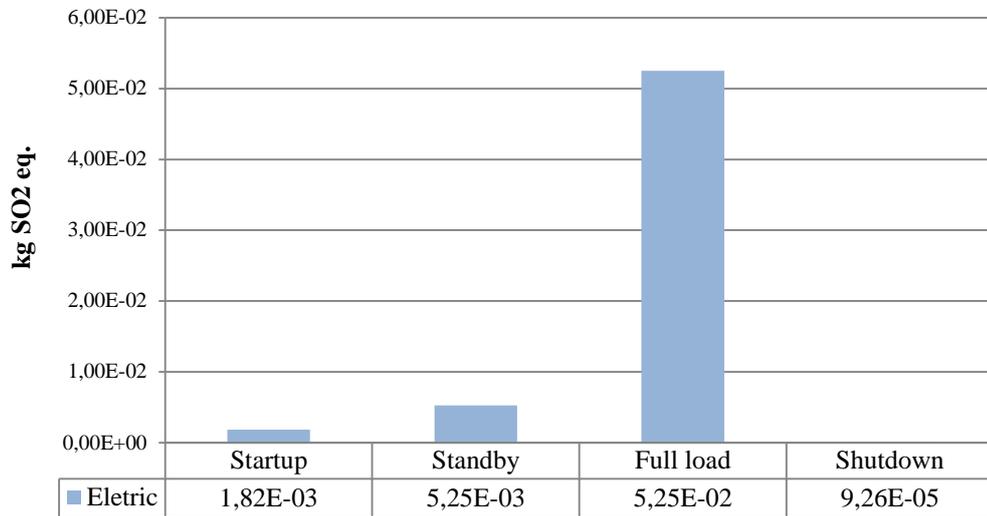
parte b)



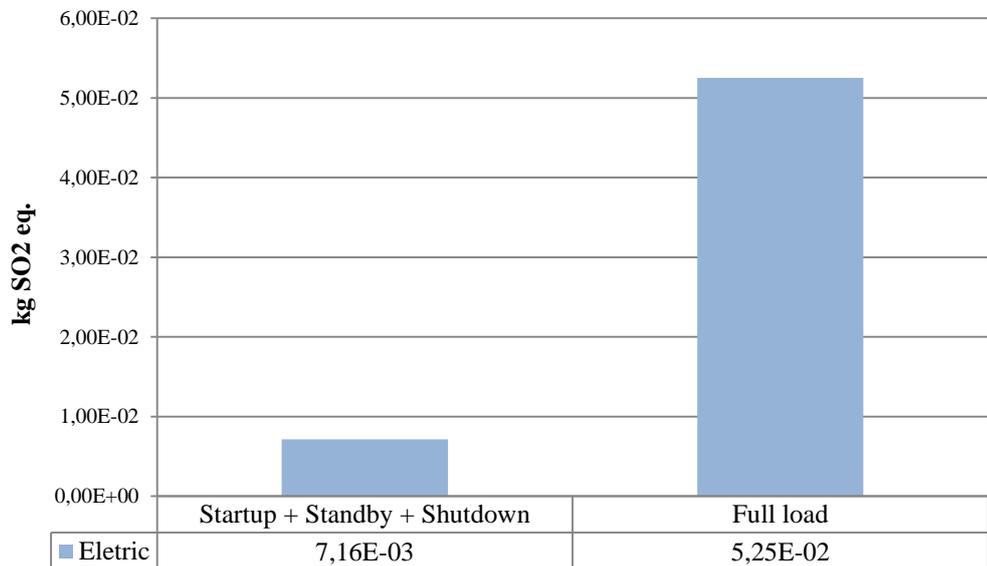
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PAT (em kg SO₂-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



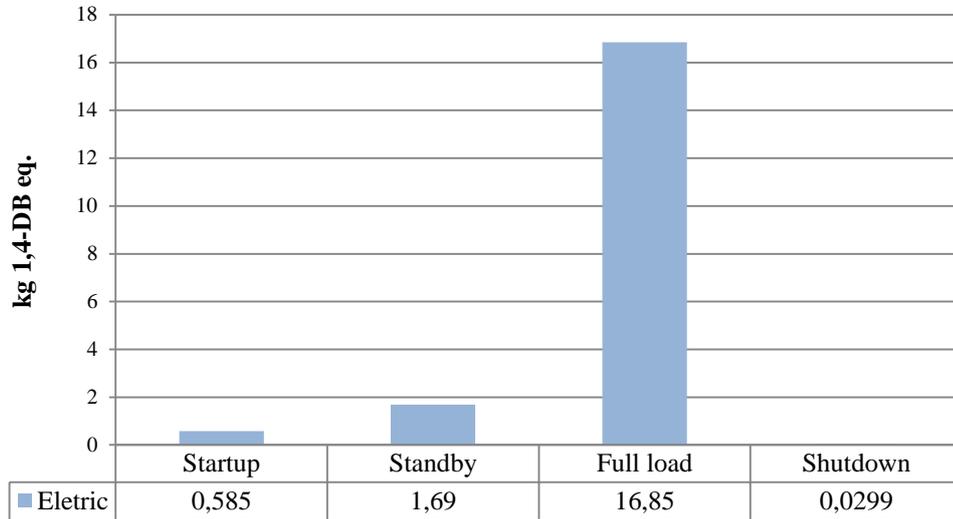
parte b)



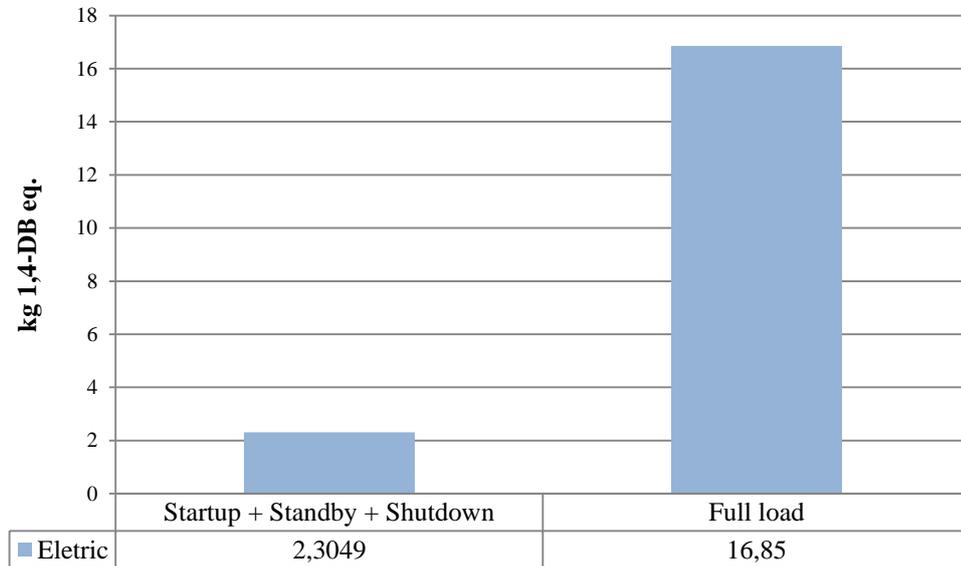
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Perfil ambiental comparativo para a categoria PET (em kg 1,4DB-eq.) devido ao uso da eletricidade: a) impactos desagregados por modo de operação; b) impactos agregados dos modos não produtivos versus modo produtivo

parte a)



parte b)

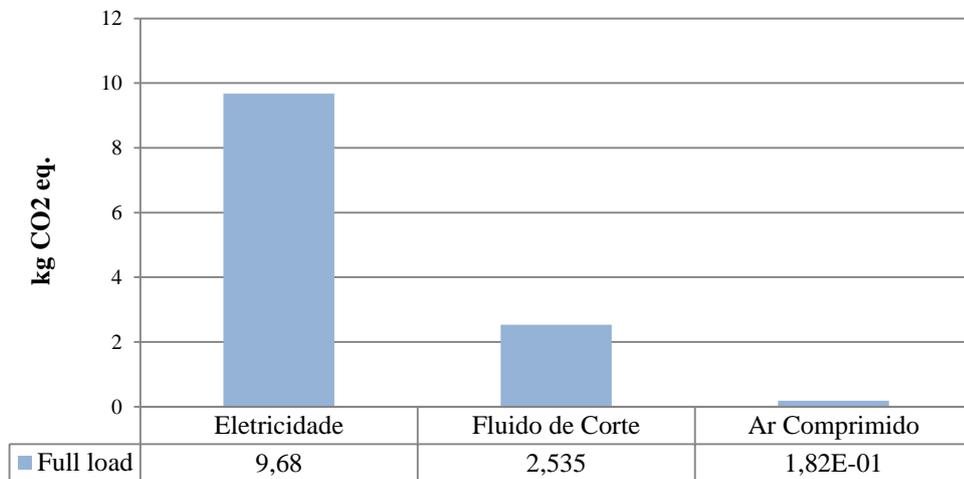


Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nas Figuras 14 a 24, evidenciou-se o modo de uso *full load* como o principal causador dos impactos potenciais em relação ao uso da eletricidade, dentre todos os modos de uso existentes no sistema e para todas as categorias de impacto avaliadas. Os comparativos realizados entre os impactos potenciais causados somente pelo modo de uso *full load* em relação à soma de todos os outros modos de uso juntos evidenciaram ainda mais sua maior incidência. Por esta razão, o uso da eletricidade no modo de uso *full load* apresentou-se como um *hotspot* que deverá receber análises aprofundadas visando à sua redução na proposição de cenários futuros do processo desenvolvido pelo sistema estudado.

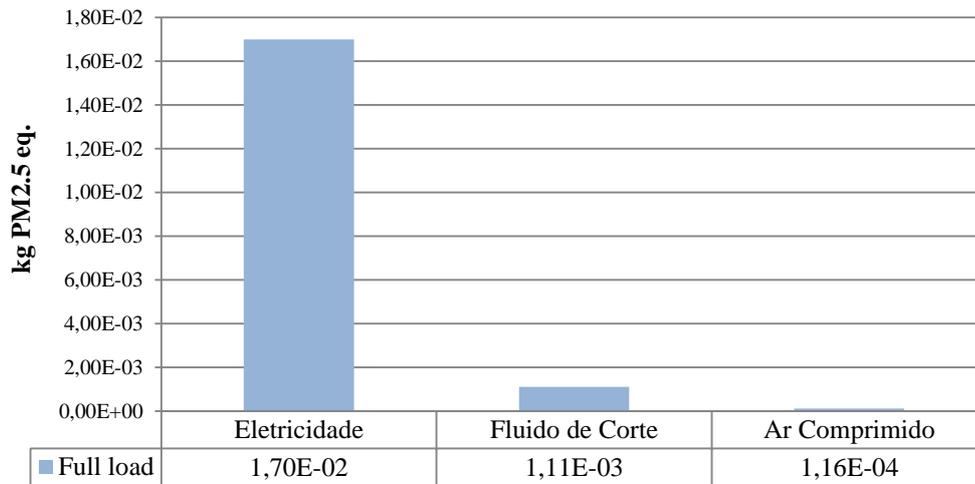
O modo de uso *full load* foi o qual utilizou, além da eletricidade, também os outros fluxos inventariados, tais como o alumínio, o fluido de corte e o ar comprimido. Por esta razão, análises detalhadas dentro deste modo de uso foram realizadas, avaliando-se o impacto causado por cada um dos fluxos utilizados – desconsiderando-se o uso do alumínio, conforme justificado na seção 3.2.7, e, ainda, avaliando-se o percentual de contribuição de cada um dos fluxos em relação ao impacto potencial total causado por este modo de uso. Os resultados de AICV estão apresentados nas Figuras 25 a 35.

Figura 25 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PMC (em kg CO₂-eq.)



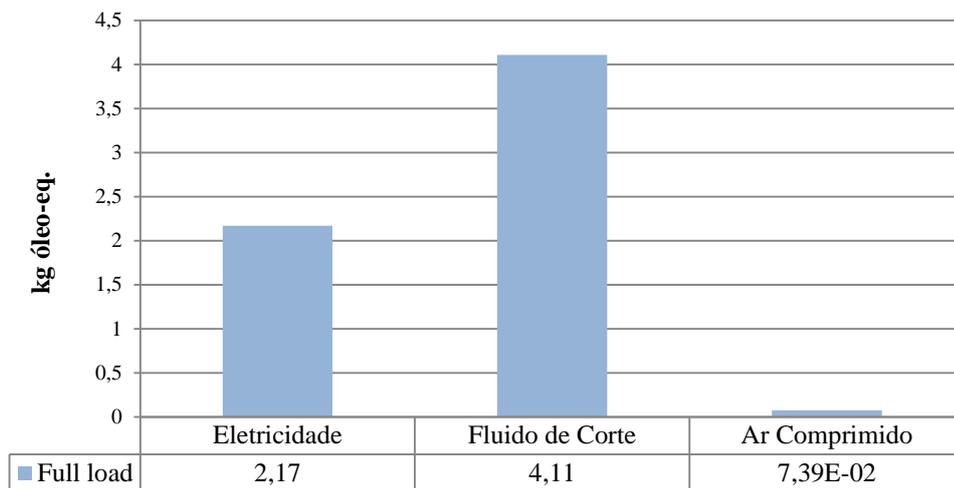
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PMP (em kg PM_{2,5}-eq.)



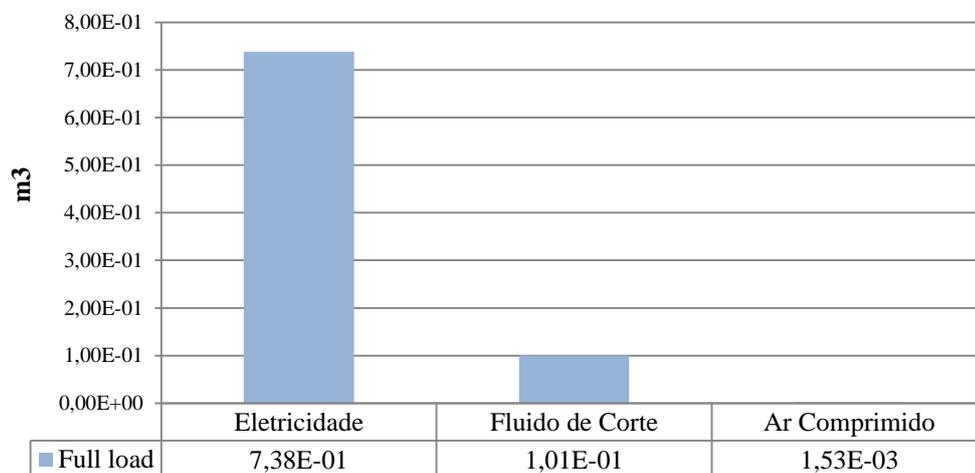
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PDF (em kg óleo-eq.)



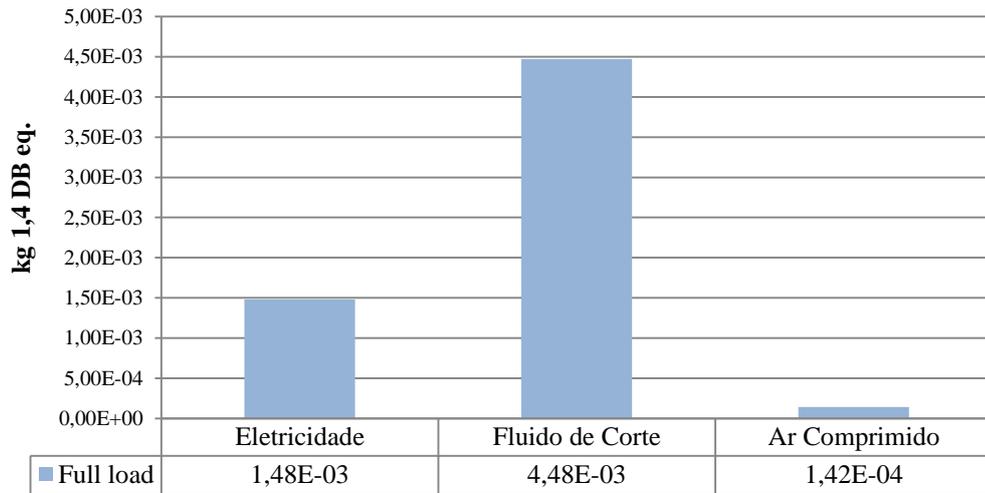
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PCAD (em m³)



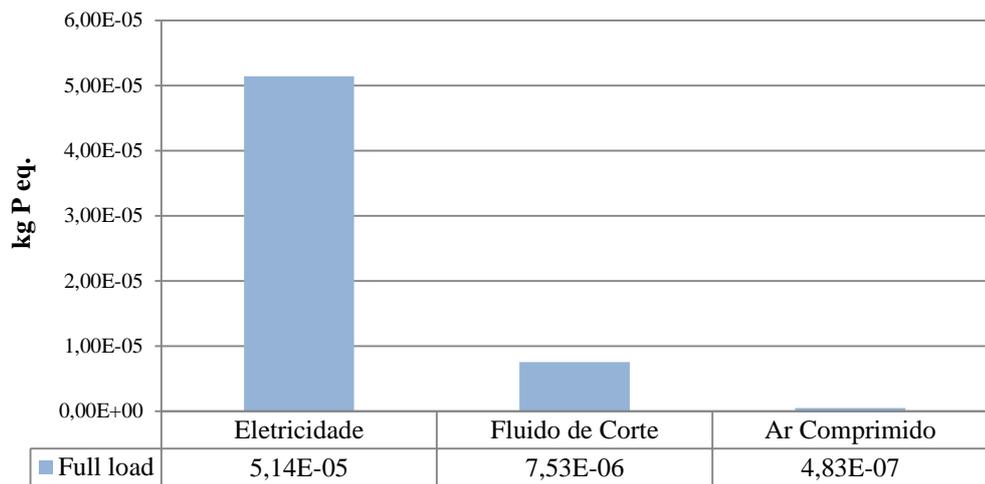
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PEcAD (em kg 1,4DB-eq.)



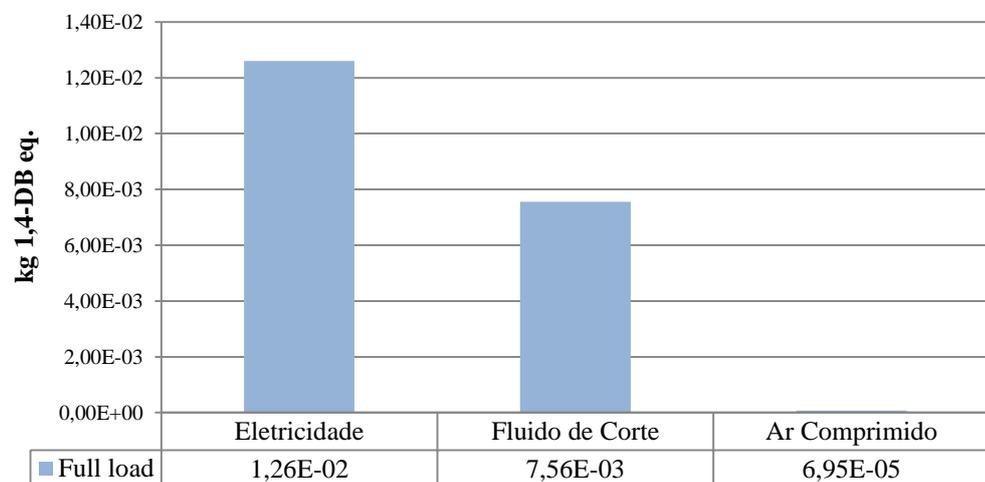
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PEuAD (em kg P-eq.)



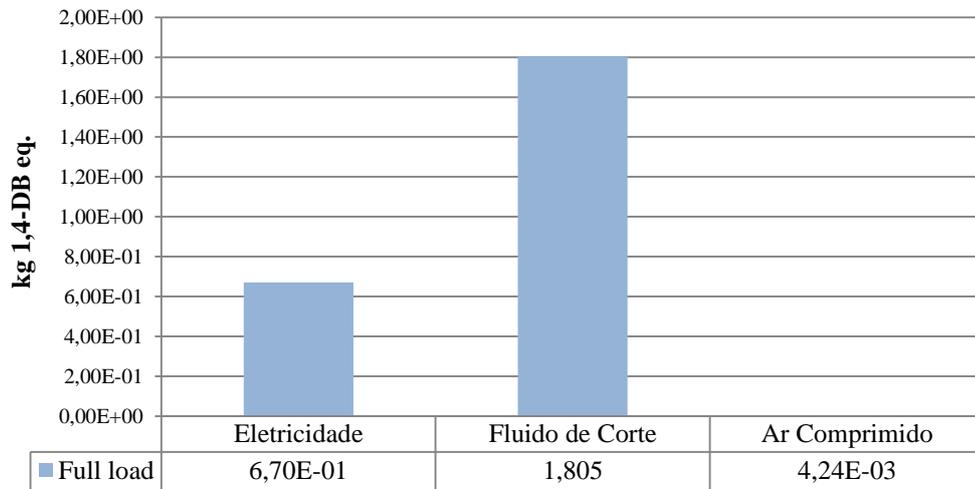
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PTHc (em kg 1,4DB-eq.)



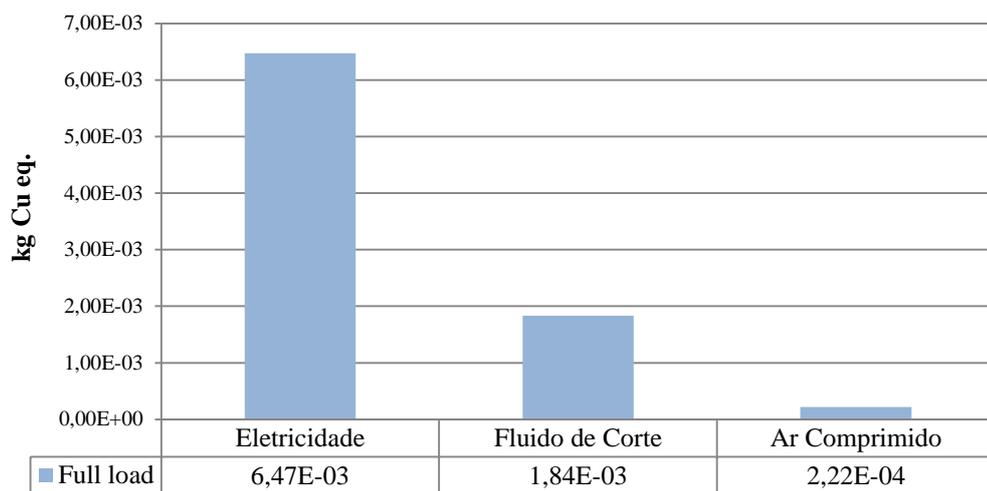
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PTHnc (em kg 1,4-DB-eq.)



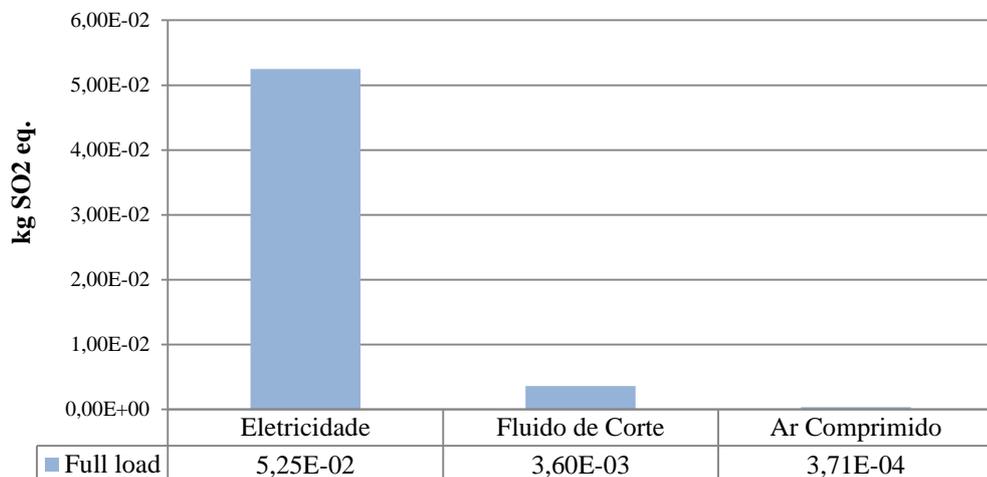
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PDM (em kg Cu-eq.)



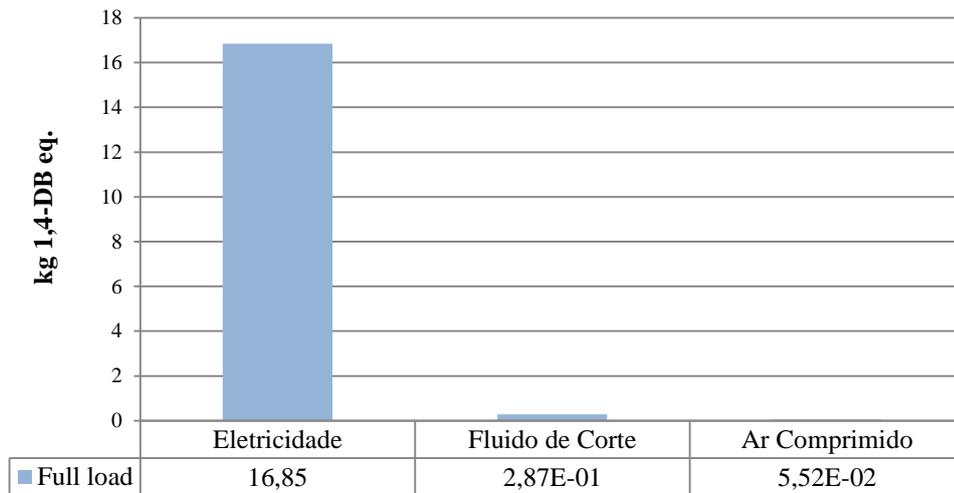
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PAT (em kg SO₂-eq.)



Fonte: Elaborado pelo autor

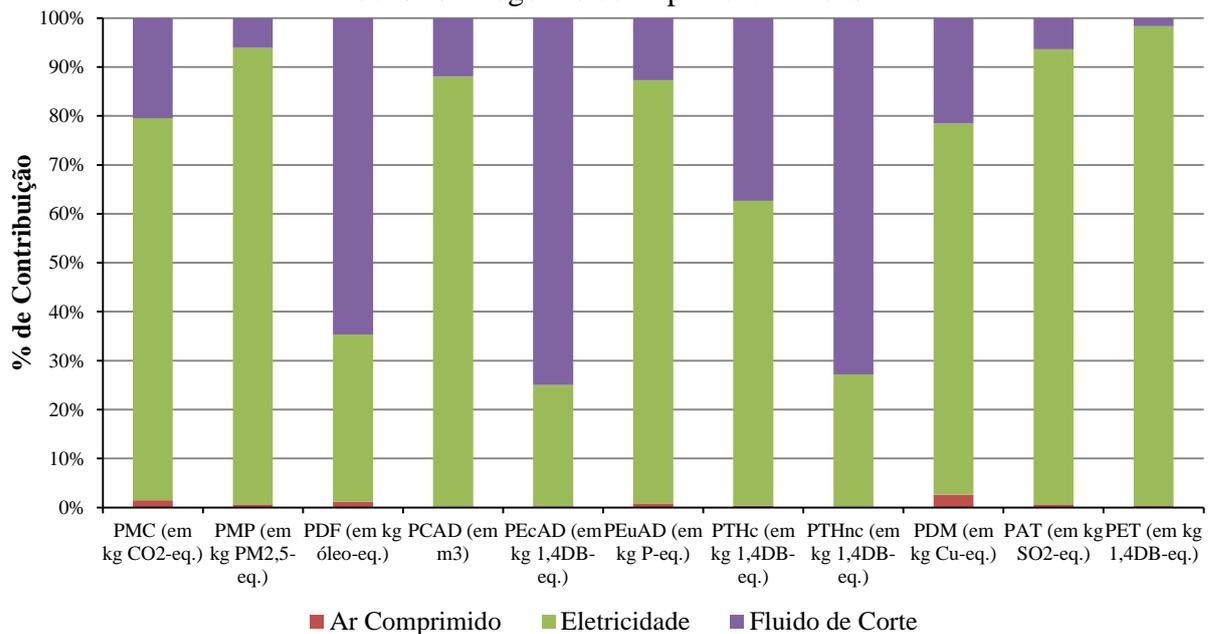
Figura 35 – Impacto potencial do modo *full load* na categoria PET (em kg 1,4DB-eq.)



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se analisar os resultados detalhados no modo de uso *full load*, foi evidenciado o potencial de impacto do uso da eletricidade e do fluido de corte superiores ao do uso do ar comprimido, sendo que, em algumas categorias de impacto, a eletricidade se destaca como o fluxo mais impactante e, em outras, o fluido de corte se destaca. A contribuição relacionada ao uso de cada um dos fluxos é evidenciada na Figura 36, em que se buscou apresentar graficamente o percentual de contribuição de cada fluxo nos impactos potenciais calculados para cada categoria de impacto e em cada estudo de caso.

Figura 36 – Análise de contribuição, no modo *full load*, de cada fluxo de consumível para todas as categorias de impacto avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Em razão da identificação da eletricidade e do fluido de corte como os principais *hotspots* no modo de uso *full load*, ações futuras deverão ser propostas visando à redução de seus usos. Tais ações e os benefícios da sua implementação serão apresentados nas seções 4.6.1 e 4.6.2.

4.6.1 Análise de sensibilidade da ACV

Ao se realizar a análise de sensibilidade no processo estudado, buscando-se prever o resultado a ser alcançado em função de alterações nos parâmetros ou nas atividades em um processo, propostas de cenários futuros foram desenvolvidas visando a averiguar os benefícios da implementação de tais propostas.

A primeira proposta refere-se à busca pelo fornecimento de matéria-prima bruta com menor sobremetal a ser usinado. Foram calculados os benefícios alcançados com a proposição da redução de 10% e de 25% do sobremetal atualmente existente nos tubos de alumínio, em razão destes percentuais de redução serem exequíveis por parte dos fornecedores da matéria-prima, garantindo a viabilidade de se analisar as melhorias resultantes no processo, oriundas desta proposta. Destaca-se que a redução de sobremetal, e conseqüente redução no fluxo de alumínio, também impactaria positivamente nos consumos de eletricidade e de fluido de corte, ou seja, exatamente nos fluxos identificados como *hotspots* do sistema.

Em seguida, objetivando-se a uma ação visando à redução especificamente no consumo de eletricidade, destaca-se que a movimentação do cabeçote para a troca de ferramentas entre uma suboperação e outra representou 22,2% do tempo total do ciclo. Esta informação indica que grande parte do ciclo de usinagem foi consumida sem a realização do objetivo central do processo, que é a usinagem do produto. Visando a reduzir, portanto, a proporção da participação da movimentação dentro do ciclo de usinagem para a geração dos produtos acabados, objetivando-se que o consumo dos fluxos presentes no sistema ocorra em atividades que agreguem valor ao objetivo central do processo, propõe-se que o sistema passe a realizar a usinagem de seis tubos de alumínio em um único ciclo, ao invés de usinar os atuais três tubos de alumínio. Tal proposta é perfeitamente exequível, visto que a área interna de trabalho do equipamento, onde ocorre a usinagem, absorve a ampliação da quantidade de peças por ciclo proposta.

Além destes cenários propostos com cada uma das melhorias apresentadas, foi, também, realizada uma proposta de cenário futuro agregando-se as duas melhorias propostas,

ou seja, incorporando-se a redução de 10% e de 25% do sobremetal a ser usinado, somada à fabricação de seis tubos de alumínio por ciclo.

Destaca-se que as ações de melhorias propostas visando a cenários futuros seriam aplicadas no modo de uso *full load*, visto que é o modo de uso que utiliza todos os fluxos consumíveis no sistema estudado e, principalmente, por ser o fluxo que apresenta o maior potencial de impacto ambiental. A Tabela 13 apresenta os dados de ICV estimados para cada um dos cenários futuros propostos comparados com os dados de ICV do cenário atual.

Tabela 13 – Dados estimados de ICV, no modo *full load*, para os cenários futuros propostos

Fluxos		<i>Full Load</i>					
		Atual	Sobremetal 10% menor	Sobremetal 25% menor	Ciclo com 6 peças	Ciclo com 6 peças + Sobremetal 10% menor	Ciclo com 6 peças + Sobremetal 25% menor
Eletricidade	total	28,26	27,53	26,39	51,26	49,74	47,47
[em kWh]	por segundo	0,006254	0,006241	0,006208	0,00638	0,00636	0,00633
Fluido de Corte	total	92,40	89,60	85,4	184,8	179,20	170,80
[em litros]	por segundo	0,02045	0,02031	0,02009	0,02300	0,0229	0,0228
Alumínio	total	243,38	242,69	241,66	486,76	485,38	483,32
[em kg]	por segundo	0,0539	0,0550	0,0568	0,0606	0,0621	0,0644
Ferramenta	total	23	23	23	23	23	23
[em unidades]	por segundo	0,00509	0,00521	0,00541	0,00286	0,00294	0,00307
Ar Comprimido	total	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
[em Nm3]	por segundo	0,00100	0,00102	0,00106	0,00056	0,00057	0,00060
Alumínio (produto acabado)	total	234,12	234,12	234,12	468,25	468,25	468,25
[em kg]	por segundo	0,0518	0,0531	0,0551	0,0583	0,0599	0,0624
Cavaco	total	9,256	8,567	7,535	18,512	17,134	15,070
[em kg]	por segundo	0,00205	0,00194	0,00177	0,00230	0,00219	0,00201
Fluido de corte (para reuso)	total	92,00	89,21	85,03	184,00	178,42	170,06
[em litros]	por segundo	0,0204	0,0202	0,0200	0,0229	0,0228	0,0227
Efluente líquido	total	0,40	0,39	0,37	0,80	0,78	0,74
[em litros]	por segundo	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Ferramenta (para reuso)	total	22,751	22,767	22,795	22,495	22,533	22,590
[em unidades]	por segundo	0,00503	0,00516	0,00536	0,00280	0,00288	0,00301
Ferramenta usada	total	0,249	0,233	0,205	0,505	0,467	0,410
[em unidades]	por segundo	0,00006	0,00005	0,00005	0,00006	0,00006	0,00005
Tempo	total	4.519	4.411	4.251	8.034	7.820	7.501
[em segundos]							

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando-se os resultados apresentados, foi possível evidenciar importantes benefícios resultantes das melhorias aplicadas nos *hotspots* identificados no sistema estudado, voltadas, portanto, à redução no consumo de eletricidade e de fluido de corte. As melhorias obtidas em cada cenário proposto foram detalhadas e são apresentadas a seguir. É importante destacar que, para efeito de cálculos do percentual de melhoria entre o cenário atual e os cenários propostos, e devido à existência de cenários em que se propõe a fabricação de seis tubos de alumínio por ciclo ao invés de três, foi necessário se utilizar como referência os consumos necessários para a obtenção de três tubos de alumínio em todos os cenários, visando ao balanceamento dos dados. Desta forma, para os cenários em que se fabricam seis tubos de alumínio por ciclo, os consumos totais foram divididos por dois.

Ainda, a fim de se indicar a redução na duração dos ciclos em cada cenário proposto, também foi calculado o percentual de melhoria no consumo de tempo em cada cenário. Os resultados detalhados destes comparativos estão apresentados na Tabela 14:

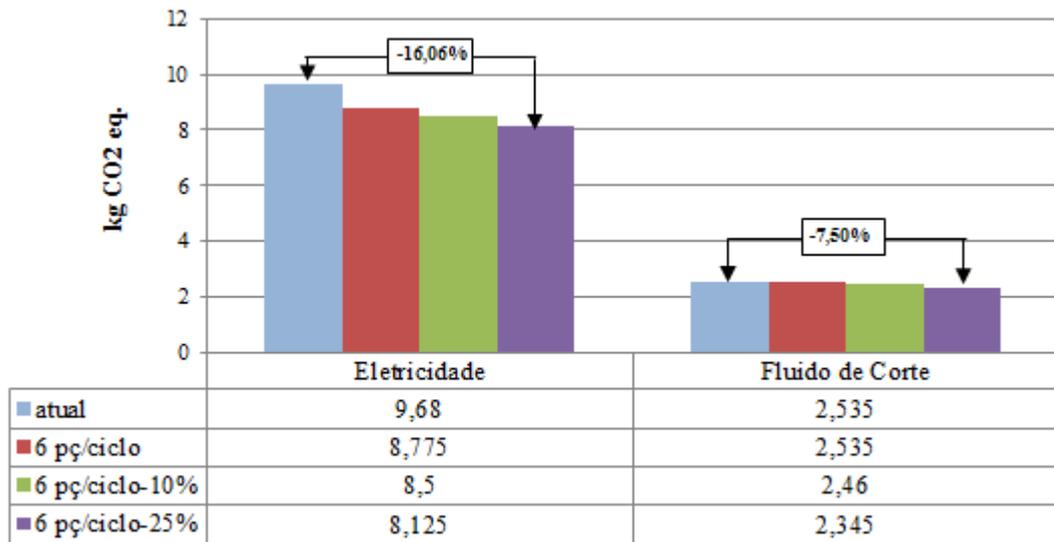
Tabela 14 – Percentual de melhoria nos consumos estimados, resultantes da implementação dos cenários futuros propostos

	Sobremetal 10% menor	Sobremetal 25% menor	Ciclo com 6 peças	Ciclo com 6 peças + Sobremetal 25% menor
Consumo de Eletricidade (em %)	2,58	6,62	9,31	16,01
Consumo de Fluido de Corte (em %)	3,03	7,58	0,00	7,58
Consumo de Tempo (em %)	2,39	5,93	11,11	17,01

Fonte: Elaborado pelo autor

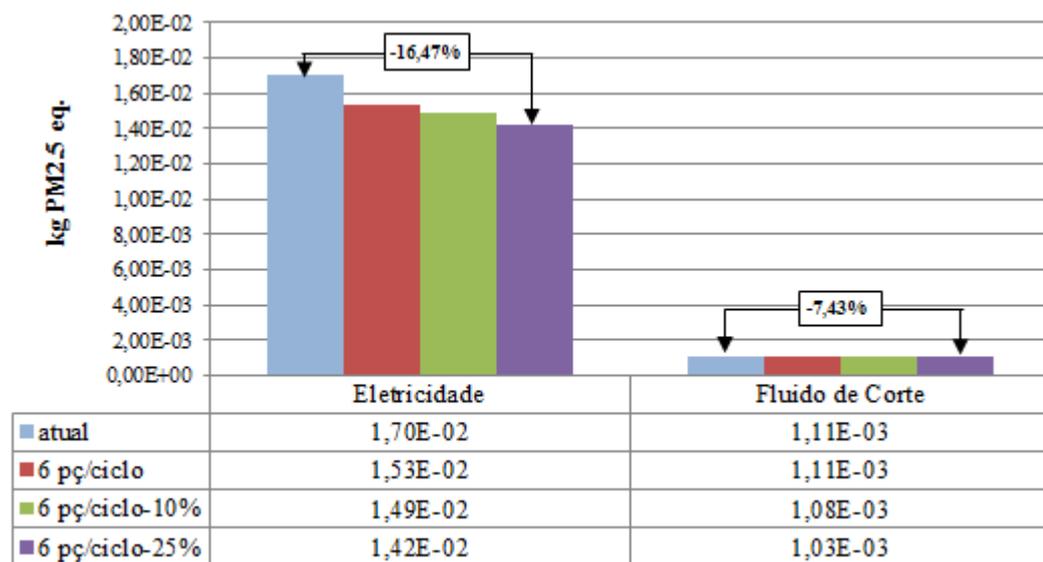
Em sequência, com a finalidade de se analisar os benefícios relacionados ao perfil ambiental do sistema estudado, a serem obtidos com a implementação de cada uma das melhorias apresentadas, as Figuras 37 a 47 apresentam os resultados comparativos da AICV, focados nos *hotspots* identificados, ou seja, a eletricidade e o fluido de corte, para cada cenário proposto em relação ao cenário atual, além de indicarem o percentual de melhoria entre o cenário atual e o cenário mais adequado dentre os propostos.

Figura 37 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PMC (em kg CO₂-eq.)



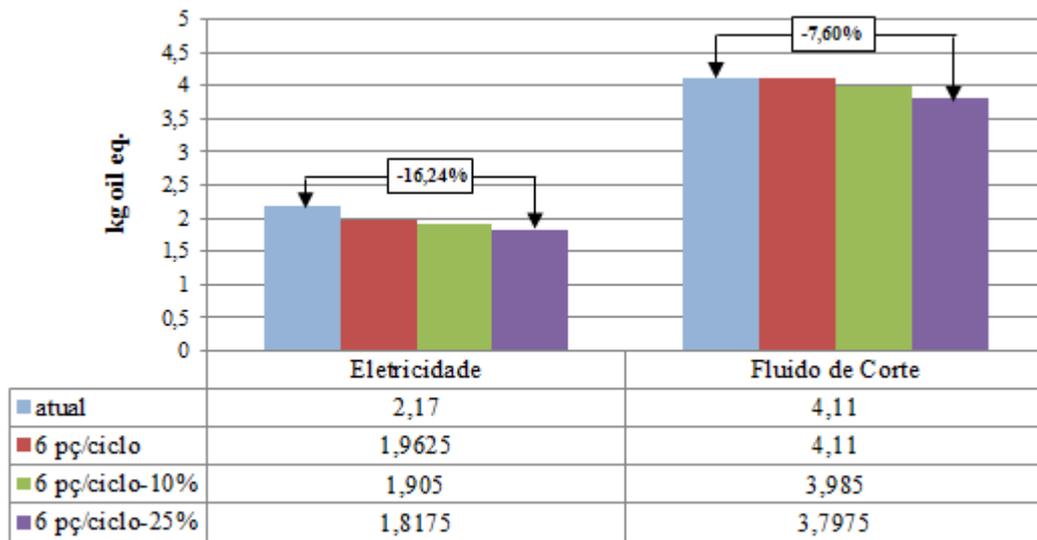
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PMP (em kg PM_{2,5}-eq.)



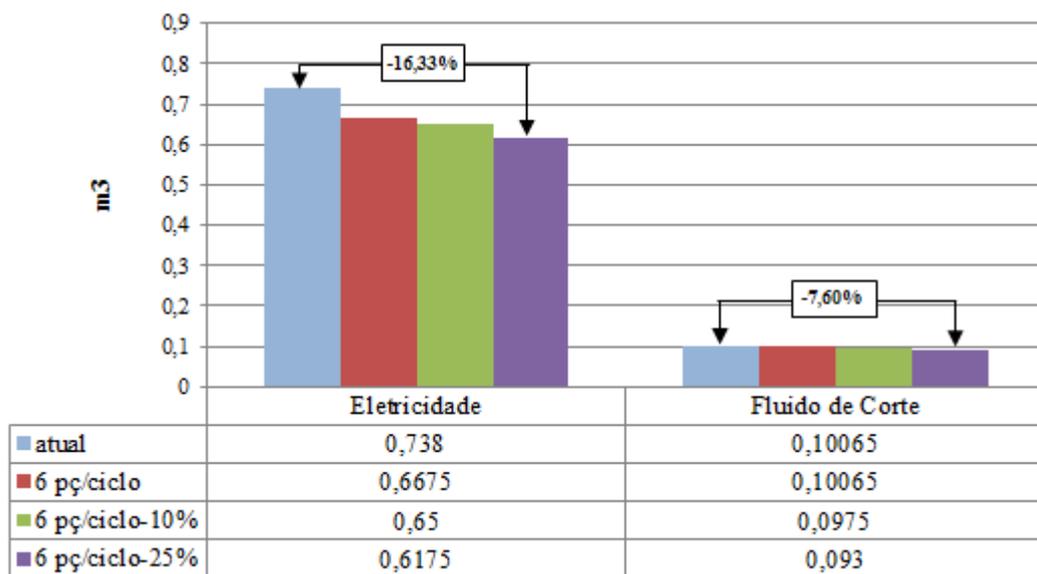
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PDF (em kg óleo-eq)



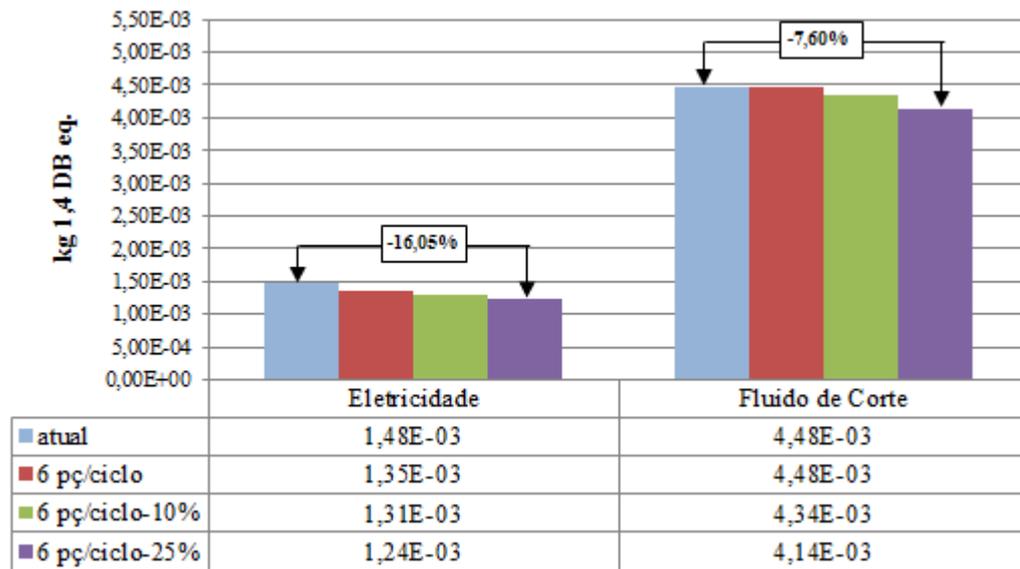
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PCAD (em m³)



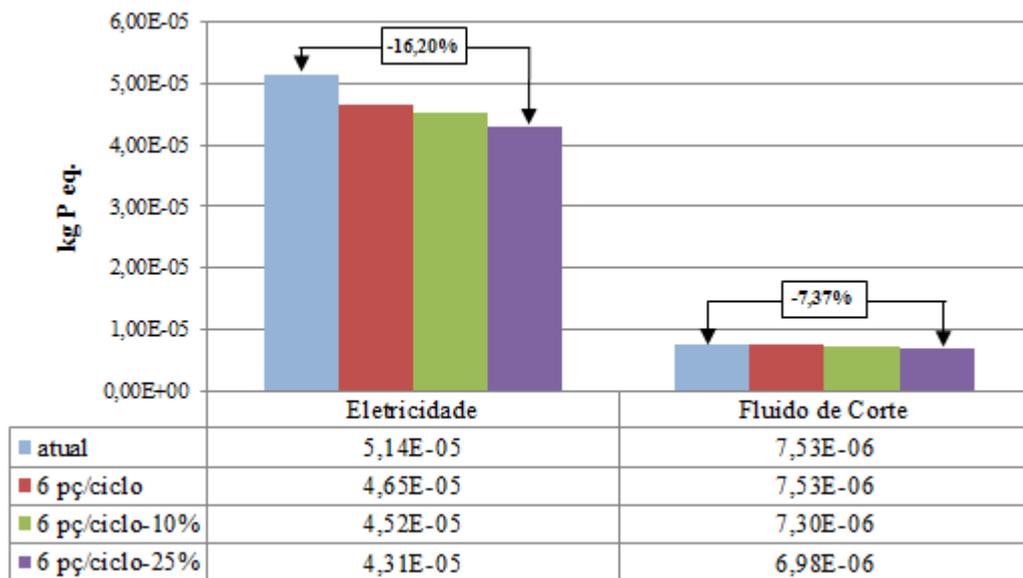
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PEcAD (em kg 1,4DB-eq.)



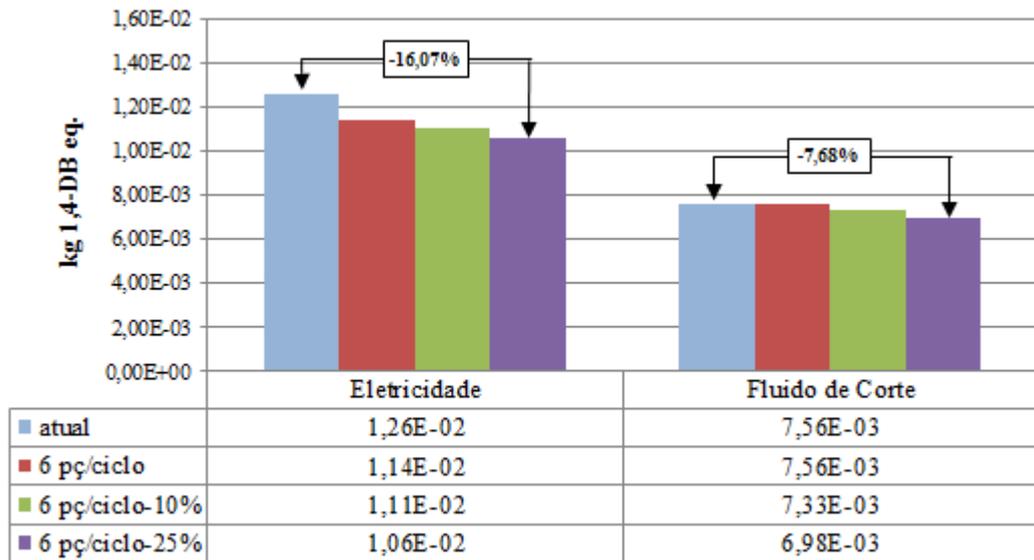
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PEuAD (em kg P-eq.)



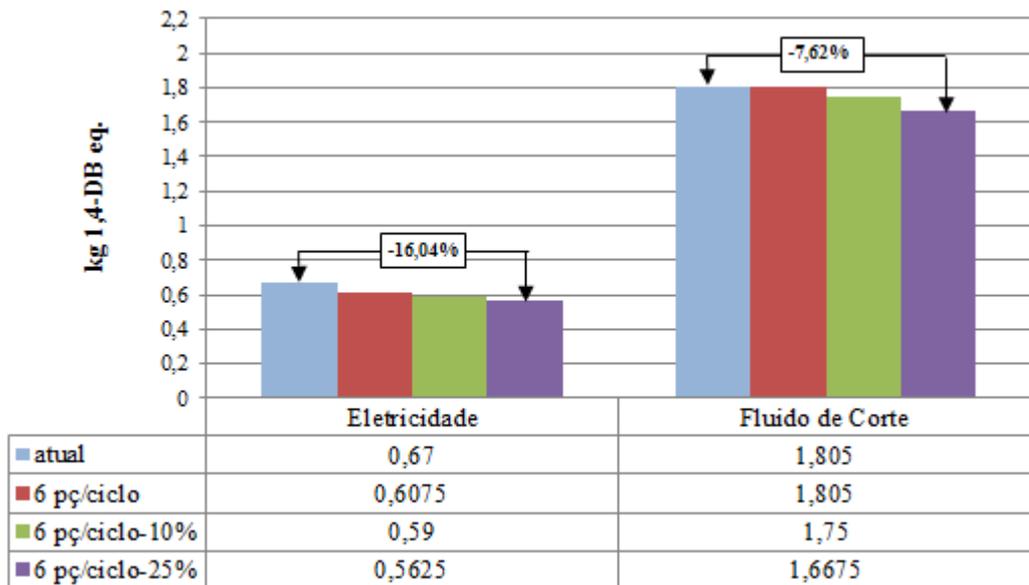
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PTHc (em kg 1,4DB-eq.)



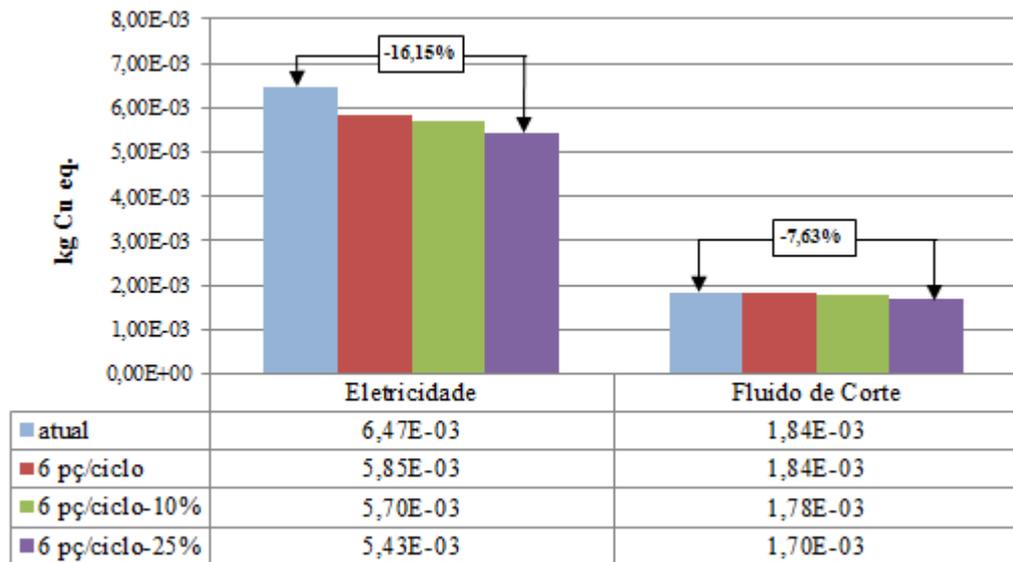
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 44 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PTHnc (em kg 1,4DB-eq.)



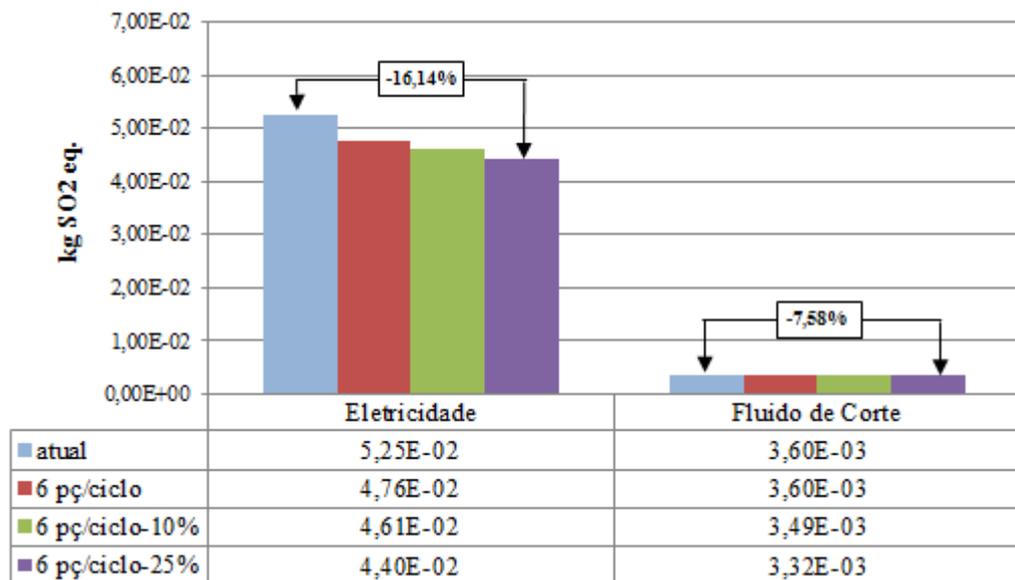
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PDM (em kg Cu-eq.)



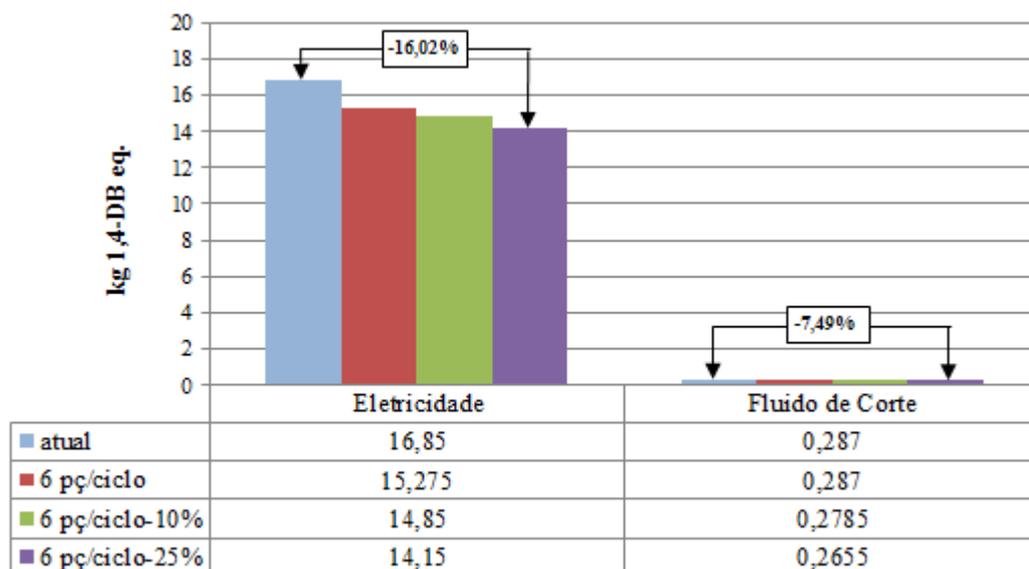
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 46 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PAT (em kg SO₂-eq.)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 47 – Estimativa de impacto potencial comparativo entre os cenários atual e futuros, no modo de uso *full load*, na categoria PET (em kg 1,4DB-eq.)



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, baseando-se na análise dos benefícios estimados relacionados ao perfil ambiental do sistema, mediante análise dos resultados comparativos de AICV, conclui-se que o cenário que apresenta os melhores resultados refere-se à implementação da aquisição de matéria prima com redução de 25% do sobremetal a ser usinado, somada à implementação da fabricação de seis tubos de alumínio por ciclo. Verifica-se que a implementação deste cenário irá proporcionar melhorias na faixa compreendida entre 16,02% e 16,47% em relação aos impactos causados pelo uso da eletricidade, e entre 7,37% e 7,68% pelo uso do fluido de corte.

Constata-se, por fim, ao se analisar os benefícios proporcionados pelas ações propostas visando a cenários futuros de fabricação, que, além das grandes vantagens obtidas em relação ao perfil ambiental do sistema estudado, tais ações proporcionam melhorias também nos resultados representados por outras métricas além das ambientais, como as métricas econômicas, envolvendo os custos de produção, e outras voltadas à gestão da produção, relacionadas a índices de produtividade, de disponibilidade de máquina, entre outros. Um indicador utilizado para se representar a relação entre o desempenho ambiental e o econômico é o índice de ecoeficiência, que foi utilizado nesta dissertação para se medir o impacto das ações propostas em relação a essas métricas distintas.

4.6.2 Avaliação da ecoeficiência do processo

Por meio do índice de ecoeficiência, foi analisada a ecoeficiência do processo estudado, com o objetivo de se realizar análises sobre o sistema na relação entre seu desempenho econômico e o seu desempenho ambiental. Ainda, foi possível se identificar o impacto no índice de ecoeficiência do sistema com a implementação das melhorias propostas para os cenários futuros.

Para a realização desta análise, foram considerados e somados os potenciais de impactos ambientais, em cada categoria de impacto, causados ao longo de um dia completo de produção, visto que, em um dia de produção, os equipamentos operam em todos os modos de uso (*startup*, *full load*, *standby* e *shutdown*), sendo alguns deles realizados em mais de uma oportunidade, e também considerada e somada a quantidade total de tubos de alumínio fabricados ao longo de um dia completo de produção. Mediante a coleta dessas informações, a Equação 3 foi utilizada para cálculo do índice de ecoeficiência.

$$iE = \frac{\sum npç}{\sum PIA_k} \quad (3)$$

Sendo:

iE = índice de ecoeficiência (em nº de peças produzidas / unidade de impacto potencial);

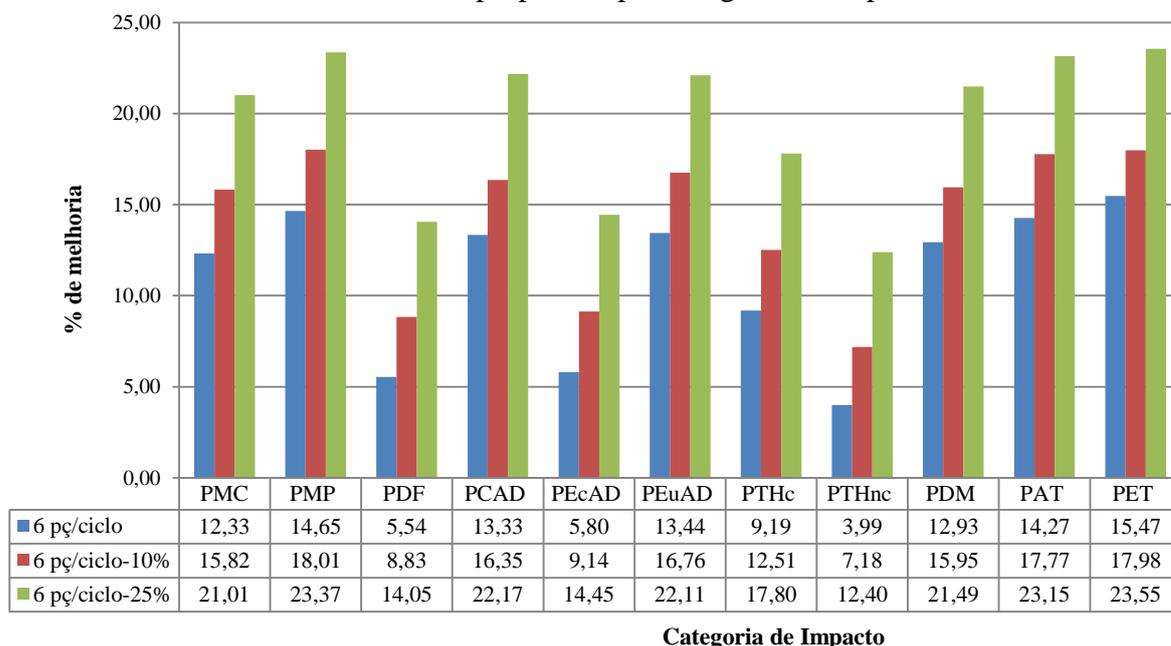
$npç$ = quantidade total de peças fabricadas em um dia de trabalho (em unidades);

PIA_k = potencial de impacto ambiental (em função da categoria de impacto avaliada k , podendo ser expresso em unidades de kg CO₂-eq., kg PM_{2,5}-eq., kg óleo-eq., m³, kg 1,4DB-eq., kg P-eq., kg Cu-eq., kg SO₂-eq.).

A Figura 48 apresenta os percentuais de melhoria no índice de ecoeficiência obtidos mediante a equação estabelecida, resultantes do comparativo entre o o cenário atual e cada um dos os cenários futuros propostos, para cada categoria de impacto avaliada.

Os comparativos realizados evidenciam que as propostas de melhorias apresentadas para os cenários futuros oferecem grandes benefícios para a ecoeficiência do sistema estudado, em ambos os estudos de caso, visto que a implementação da fabricação de seis peças por ciclo somada à implementação da redução de 25% de sobremetal a ser usinado proporciona a melhoria de mais de 20% no índice de ecoeficiência do sistema em diversas categorias de impacto, sendo que, no pior caso, o percentual de melhoria é de 12,40%.

Figura 48 – Comparativo do percentual de melhoria no índice de ecoeficiência entre o cenário atual e os cenários propostos, por categoria de impacto



Fonte: Elaborado pelo autor

Adicionalmente, em razão de o índice de ecoeficiência considerar questões econômicas como uma de suas variáveis, a análise sobre este indicador proporcionou, ainda, a constatação de que os índices de produtividade e de disponibilidade de máquina também foram positivamente influenciados, por meio da implementação das melhorias propostas. No cenário atual, o processo realizado proporciona a fabricação de 15 tubos de alumínio por dia, enquanto que, com as melhorias propostas, será possível a fabricação de 18 tubos de alumínio por dia, com quantidades similares de horas de trabalho. A quantidade de horas de trabalho por dia, que representa a taxa de ocupação diária da máquina, está representada na Tabela 15. Na mesma tabela, são apresentadas, ainda, a quantidade diária de peças produzidas no processo e a produtividade do processo, expressa em peças por hora.

Tabela 15 – Comparativo entre cenários segundo a ocupação e a produtividade diária

Cenários	Tempo [horas]	Produção [peças]	Produtividade [peças / hora]
Atual	7,31	15	2,05
Ciclo com 6 peças	7,34	18	2,45
Ciclo com 6 peças + Sobremetal 10% menor	7,16	18	2,51
Ciclo com 6 peças + Sobremetal 25% menor	6,89	18	2,61

Fonte: Elaborado pelo autor

Evidencia-se, portanto, com a ampliação da fabricação de 15 para 18 peças por dia, uma melhoria de 20% no volume de produção diário do sistema, além da melhoria de 27,3% no índice de produtividade, comparando-se o cenário mais produtivo com o cenário atual. Mediante a este resultado, será obtida, além desta melhoria no indicador de produtividade do sistema produtivo, também a melhoria em outra métrica de fundamental importância para o desempenho da empresa, relacionada ao custo de fabricação, que conseqüentemente impactará de forma positiva o custo total do produto colocado no mercado.

Ainda, o aumento do volume de produção diária constatada influencia diretamente na taxa de ocupação do sistema, visto que, considerando-se 20 dias produtivos por mês, ou seja, cinco dias de produção por semana e quatro semanas por mês, a produção máxima ofertada pelo cenário atual é de 300 peças por mês. Utilizando-se qualquer um dos cenários propostos, em que a produtividade diária é de 18 peças por dia, verifica-se que, para a fabricação da mesma quantidade de 300 peças por mês ofertada pelo cenário atual, seriam necessários somente 16,67 dias de trabalho, ao invés de 20 dias necessários pelo cenário atual. Desta forma, conclui-se que, com a implementação dos cenários propostos, além de todos os benefícios já apresentados anteriormente, há ainda a possibilidade de o sistema não operar por 3,33 dias por mês. Esta não necessidade de operação do sistema proporcionaria benefícios relacionados aos custos de processo, mas também benefícios relacionados às métricas ambientais, visto que tal não necessidade de operação durante 3,33 dias por mês resultará em não geração de impactos ambientais ao longo deste período, devendo ser considerados não apenas aqueles relacionados ao sistema em estudo nesta dissertação, mas também outros que se encontram fora das fronteiras do sistema estudado, como a depreciação do equipamento, a logística (transporte e movimentação) de peças, a alocação de operários, entre outros. Por outro lado, caso opte-se pela utilização dos 3,33 dias por mês que passariam a ficar disponíveis, estes poderiam ser utilizados para a produção de outros produtos da cadeia de fornecimento do mesmo parque fabril, influenciando positivamente na flexibilidade do sistema produtivo, em função da ampliação das possibilidades relacionadas a tempos e métodos e ao *APS (Advanced Planning and Scheduling)*.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos ao longo desta dissertação, apresentam-se as seguintes conclusões:

- A Revisão Bibliográfica desenvolvida apresentou que estudos voltados ao tema *GM* demonstram forte ascensão nos anos mais recentes, com predominância em processos de usinagem, o que reforçou a relevância e viabilidade da realização desta dissertação. Observou-se, ainda, que pesquisas envolvendo a aplicação de ACV em processos de manufatura estão consideravelmente estabelecidas, em função da destacável quantidade de publicações relacionadas a este tema, especialmente ao longo dos últimos cinco anos apurados. Porém, mais escassas foram as publicações envolvendo a avaliação detalhada de processos em nível de seus modos de uso e subunidades, o que motivou a realização deste trabalho;
- A aplicação do conceito de *GM* alinhado à técnica de ACV possibilitou a avaliação do desempenho ambiental dos processos estudados, resultando na identificação dos seus principais *hotspots* que, com a implementação das melhorias propostas, visando a cenários futuros de fabricação, apresentados mediante análise de sensibilidade de ambos os estudos de caso, resultarão em processos que atendem ao objetivo de torná-los mais ecoeficientes;
- A realização da AICV mediante diversas categorias de impacto foi importante para a identificação da eletricidade e do fluido de corte como os *hotspots* do sistema, visto que, para algumas categorias de impacto, a eletricidade foi o principal *hotspot*, enquanto que para outras, o fluido de corte se apresentou como o principal *hotspot*. Na literatura referente à *GM*, a maior parte dos estudos ainda se concentra apenas em avaliar a categoria de PMC. Em função esta constatação, este trabalho contribuiu para reafirmar a necessidade de se avaliar mais categorias em impacto ao se estudar processos de manufatura;
- O cenário futuro proposto que absorve a aplicação de todas as melhorias propostas alcançará, em média, 16,16% de melhoria no desempenho ambiental do sistema em relação ao uso da eletricidade e de 7,55% em relação ao uso do fluido de corte. Tais resultados, frente à literatura atual envolvendo *GM* e ACV, consolidam os benefícios alcançados no desempenho ambiental de sistemas de manufatura sob a perspectiva de

LCT, obtidos por meio da aplicação de ações que visam a melhorar o *design* dos processos de produção, tornando-os ambientalmente mais sustentáveis;

- Além das avaliações relacionadas ao perfil ambiental do sistema, também foram avaliados indicadores segundo outras métricas, os quais possibilitaram a observação de benefícios adicionais oriundos da implementação das melhorias propostas. Ao se analisar o índice de ecoeficiência, observaram-se melhorias que alcançarão até 23,55% com a implementação das ações propostas. Em relação ao volume de produção diária do sistema, observou-se a ampliação de 20%, além da melhoria de 27,3% no índice de produtividade do processo, expressa em peças por hora. E, ainda, em relação à taxa de ocupação do sistema, evidenciou-se a melhoria de 16,67%. Esses resultados mostram que é possível agregar maior valor aos sistemas produtivos por meio de uma produção mais sustentável, afinal, por meio da *GM* integrada à *ACV*, foi possível, além da obtenção de melhorias relacionadas aos impactos do ciclo de vida, contribuir também para o alcance de melhores resultados nas métricas clássicas da Engenharia de Produção relacionadas a custo, tempo e flexibilidade;
- Como limitação da pesquisa, ao se realizar o comparativo entre os processos desempenhados nos EC-1 e EC-2, evidenciou-se a similaridade em relação aos equipamentos e subunidades, aos consumos, aos métodos de usinagem e à sequência de usinagem, resultando na não identificação de superioridade de desempenho de um estudo de caso em relação ao outro, não permitindo, conseqüentemente, a realização de um *benchmarking* entre os processos;
- Como recomendações para trabalhos futuros, a busca pelo emprego de tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 para o desenvolvimento de estudos voltados à *GM* é identificada como uma forte aliada para a realização das atividades, especialmente na fase de coleta de dados de *ICV*, visando a reduzir a complexidade e o consumo de recursos humanos e de tempo para o seu desenvolvimento.

6 REFERÊNCIAS

ALLEN, D.; BAUER, D.; BRAS, B.; GUTOWSKI, T.; MURPHY, C.; PIWONKA, T.; SHENG, P.; SUTHERLAND, J.; THURSTON, D.; WOLFF, E. Environmentally benign manufacturing: trends in Europe, Japan, and the USA. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 124, p. 908-920, 2002.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14045. **Gestão ambiental – Avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto – Princípios, requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, ISO, 2014.

BEKKER, A. C. M.; VERLINDEN, J. C. Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 438–447, 2018.

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.

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.

CURKOVIC, S. Environmentally responsible manufacturing: the development and validation of a measurement model. **European Journal of Operational Research**, v. 146, n. 1, p. 130-155, 2003.

DAHMUS, J. B.; GUTOWSKI, T. G. An environmental analysis of machining. **Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo**, Anaheim, California, USA, p. 643-652, 2004.

DEIF, A. M. A system model for green manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1553-1559, 2011.

DIAZ, N.; HELU M.; JAYANATHAN, S.; CHEN, Y.; HORVATH, A.; DORNFELD, D. Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments. **Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology**, ISSST, 2010.

DORNFELD, D. Moving towards green and sustainable manufacturing. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 1, n. 1, p. 63-66, 2014.

DORNFELD, D.; YUAN, C.; DIAZ, N.; ZHANG, T.; VIJAYARAGHAVAN, A. Introduction to green manufacturing. In: DORNFELD, D. (ed.). **Green manufacturing: fundamentals and applications**. 1^a ed. Berkeley: Springer, cap. 1, p. 1-23, 2013.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014.

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, n. 2, p. 587-609, 2012.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context**. First edition, November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union; 2011.

FILLETI, R. A. P. **Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

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.

FIRMINO, A. S.; MERGULHÃO, R. C.; OLIVEIRA, J. A.; SILVA, D. A. L. Green manufacturing in machining processes: a systematic review based on life cycle thinking. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, 8., 2019, San José. **Anais da Conferencia Internacional Análisis de Ciclo de Vida**. San José: 2019.

FLORIDA, R. L. Lean and green: the move to environmentally conscious manufacturing. **California Management Review**, v. 39, p. 80-105, 1996.

GARCIA, F. L.; MORIS, V. A. S.; NUNES, A. O.; SILVA, D. A. L. Environmental performance of additive manufacturing process – an overview. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24(7), p. 1166-1177, 2018.

GARETTI, M.; TAISCH, M. Sustainable manufacturing: trends and research challenges. **Production Planning & Control: The Management of Operations**. v. 23, p. 83-104, 2012.

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

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The eco-indicator99**: a damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report. Amersfoort: Pré-Consultants b.v., 3^a ed., 2001.

GOVINDAN, K.; DIABAT, A.; MADAN SHANKAR, K. Analyzing the drivers of green manufacturing with fuzzy approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 182-193, 2015.

GUINÉE, J. B. **Life cycle assessment**: an operational guide to the ISO standards. LCA in perspective – operational annex to guide. Netherlands: Centre for Environmental Science. Leiden University, 2001.

GUNGOR, A.; GUPTA, S. M. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. **Computers and Industrial Engineering**, v. 36(4), p. 811–853, 1999.

GUPTA, R. K.; PUROHIT, R.; RANA, R. S.; DIPAK, S.; MISHRA, A. A Review On Green And Sustainable Manufacturing & Their Impact on Social, Economical, Environmental Prospects. **International Journal on Applications in Science, Engineering & Technology**, v.1, n.1, p. 8-12, 2015.

GUTOWSKI, T. G.; ALLWOOD, J. M.; HERRMANN, C.; SAHNI, S. A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 38, p. 81–106, 2013.

GUTOWSKI, T. G.; MURPHU, C.; ALLEN, D.; BAUER, D.; BRAS, B.; PIWONKA, T.; SHENG, P.; SUTHERLAND, J.; THURSTON, D.; WOLFF, E. Environmentally benign manufacturing: observations from Japan, Europe and the United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 1-17, 2005.

IBICT. **O que é SICV Brasil?** Disponível em <http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv>. Acesso em: 28 de set 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy and Air Pollution**. Paris, 2016.

JABBOUR, C. J. C. Esverdeando a manufatura: dos fundamentos conceituais ao estudo de múltiplos casos. **Produção**, p. 365–378, 2013.

JACQUEMIN, L.; PONTALIER, P.; SABLAYROLLES, C. Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 1028–1041, 2012.

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.

KAMALAKANTA, S.; BERGMAN, R.; ROSENBAUM, S. A.; GU, H.; LIANG, S. Life cycle assessment of forest-based products: a review. **Sustainability**, v. 11, n. 17, p. 1-30, 2019.

KELLENS, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI), part 1: Methodology description. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 69-78, 2012a.

KELLENS, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI), part 2: Case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 242-251, 2012b.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. F. R.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.

LIFE CYCLE INITIATIVE. **What is Life Cycle Thinking?** Disponível em <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/what-is-life-cycle-thinking>. Acesso em: 30 de set 2019.

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

LIU, F.; YIN, J.; CAO, H.; HE, Y. Investigations and practices on green manufacturing in machining systems. **Journal of Central South University of Technology**, v. 12, n. 50475062, p. 18-24, 2005.

MA, K.; SMITH, T.; LAVERNIA, E. J.; SCHENUNG, J. M. Environmental Sustainability of Laser Metal Deposition: The Role of Feedstock Powder and Feedstock Utilization Factor. **Procedia Manufacturing**, v. 7, p. 198-204, 2017.

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.

MITTAL, V. K.; SANGWAN, K. S. Assessment of hierarchy and inter-relationship of barriers to environmentally conscious manufacturing adoption. **World Journal of Science, Technology and Sustainable Development**, v. 10, n. 4, p. 297-307, 2011.

MITTAL, V. K.; SANGWAN, K. S. Prioritizing drivers for green manufacturing: Environmental, social and economic perspectives. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 135-140, 2014.

OBERLE, B.; BRINGEZU, S.; HARTFIELD-DODDS, S.; HELLWEG, S.; SCHANDL, H.; CLEMENT, J. **Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want (A Report of the International Resource Panel)**. United Nations Environment Programme, 2019.

ONU-WCED. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. Geneva: ONU - WCED, 1987.

OVERCASH, M.; GRIFFING, E. V.; VOZZOLA, E.; TWOMEY, J.; FLANAGAN, W.; ISAACS, J. Advancements in Unit Process Life Cycle Inventories (UPLCI) Tools. **Procedia CIRP**, v. 69, n. May, p. 447–450, 2018.

PENG, S.; LI, T.; WANG, X.; DONG, M.; LIU, Z.; JUNLI, S.; ZHANG, H. Toward a Sustainable Impeller Production Environmental Impact Comparison of Different Impeller. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S216–S229, 2017.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: Uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 3, p. 222–240, 2012.

REHMAN, M. A. A.; SHRIVASTAVA, R. L. Green manufacturing (GM): Past, present and future (a state of art review). **World Review of Science, Technology and Sustainable Development**, v. 10, n. 1–3, p. 17–55, 2013.

RIBEIRO, J. A.; VEIGA R. T. Proposição de uma escala de consumo sustentável. **Revista de Administração**, v. 46, p. 45–60, 2011.

ROMVALL, K.; WIKTORSSON, M.; BELGRAN, M. Competitiveness by integrating green perspective in production - a review presenting challenges for research and industry. In: **Flexible Automation and Intelligent Manufacturing**, FAIM, California, USA, 2010.

RUSINKO, C. A. Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 54, n. 3, p. 445–454, 2007.

SAHOO, K.; BERGMAN, R.; ALANYA-ROSENBAUM, S.; GU, H.; LIANG, S. Life Cycle Assessment of Forest-Based Products: A Review. **Sustainability**, v. 11, n. 17, p. 4722, 2019.

SANGWAN, K. S.; MITTAL, V. K. A bibliometric analysis of green manufacturing and similar frameworks. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 26, n. 4, p. 566–587, 2015.

SARKIS, J. Manufacturing strategy and environmental consciousness. **Technovation**, v. 15, n. 2, p. 79–97, 1995.

SARKIS, J. A methodological framework for evaluating environmentally conscious manufacturing programs. **Computers & Chemical Engineering**, v. 36, p. 793–810, 1999.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. Cologne/Geneva: World Economic Forum, 2016.

SELES, B. M. R. P. Os motivadores e barreiras da adoção da green manufacturing: uma revisão sistemática. **XXIII Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, SP, Brasil, 2016.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, D. A. L. **Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e do monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso**. 2016. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, D. A. L.; FILLETI, R.A.P.; CHRISTOFORO, A.L.; SILVA, E.J.; OMETTO, A.R. Application of Life Cycle Assessment (LCA) and Design of Experiments (DOE) to the monitoring and control of a grinding process. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 508-513, 2015.

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, 2016.

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.

SILVA, D. A. L.; OLIVEIRA, J. A.; FILLETI, R. A. P.; OLIVEIRA, J. F. G.; 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.; 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, 2016.

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 - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 57-60, 2017.

SINGH, A.; SINGH, B.; DHINGRA, A. K. Drivers and barriers of green manufacturing practices: a survey of Indian industries. **International Journal of Engineering Sciences**, v. 1, n. 1, p. 5-19. 2012.

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

SUSTAINABLE MANUFACTURING INITIATIVE. **What does sustainable manufacturing mean to Australia?** The CSIRO Future Manufacturing Flagship, 2011.

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, , p. 1-10, 2011.

VENTURA, R. **Mudanças no perfil de consumo no Brasil**: principais tendências nos próximos 20 anos. Rio de Janeiro: Macroplan – Prospectiva, Estratégia & Gestão, 2010.

WALTER, S. A.; BACH, T. M. Inserção de pesquisadores entrantes na área de estratégia: análise das relações de autoria e temas estudados no período de 1997-2010. **Revista Eletrônica de Administração**, v. 19, p. 165-191, 2013.

YOON, H.; KIM, M.; JANG, K.; AHN, S. Future perspectives of sustainable manufacturing and applications based on research databases. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 17, n. 9, p. 1249-1263, 2016.

ZHANG, H.; ZHAO, F. Reusable unit process life cycle inventory for manufacturing : gas metal arc welding. **Production Engineering**, v. 13, p. 89–97, 2019.

ZHOU, L.; LI, F.; ZHAO, F.; JIANFENG, L.; SUTHERLAND, J. H. Characterizing the effect of process variables on energy consumption in end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 101, p. 2837–2848, 2019.

