



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais

RODOLFO DE SOUZA ZANUTO

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE
SUSTENTABILIDADE DE PROCESSOS DE
USINAGEM**

**CAMPINAS
2016**

RODOLFO DE SOUZA ZANUTO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE SUSTENTABILIDADE DE PROCESSOS DE USINAGEM

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
RODOLFO DE SOUZA ZANUTO E ORIENTADA
PELO PROF. DR. AMAURI HASSUI.


.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2016**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 248968/2013-0/SWE

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Z17a Zanuto, Rodolfo de Souza, 1986-
Avaliação de parâmetros de sustentabilidade de processos de usinagem /
Rodolfo de Souza Zanuto. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Amauri Hassui.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Manufatura. 2. Ruído. 3. Energia. 4. Impactos ambientais. 5. Avaliação
do ciclo de vida. I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of sustainability parameters of machining processes

Palavras-chave em inglês:

Manufacture

Noise

Energy

Environmental impacts

Life cycle assessment

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Amauri Hassui [Orientador]

Anselmo Eduardo Diniz

Rosley Anholon

Alessandro Roger Rodrigues

Armando Ítalo Sette Antonialli

Data de defesa: 29-07-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MANUFATURA E
MATERIAIS

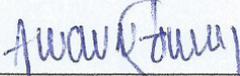
TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE
SUSTENTABILIDADE DE PROCESSOS DE
USINAGEM

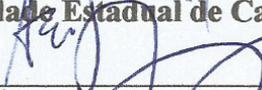
Autor: Rodolfo de Souza Zanuto

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

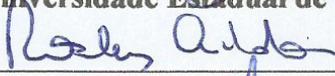
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



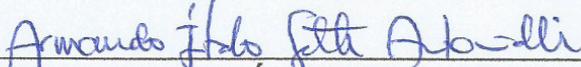
Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Rosley Anholon
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues
Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli
Universidade Federal de São Carlos

Campinas, 29 de Julho de 2016.

Dedico este trabalho primeiramente a DEUS, por ter me concedido a dádiva da vida. À minha amada esposa Luciana, pelo apoio em todas as horas de nossas vidas, aos meus pais, José Luiz e Cleusa, por toda a dedicação em minha criação e a todos os amigos da Unicamp e da universidade da California em Berkeley por terem trazido inspiração e outras diversas formas de contribuição. Serei eternamente grato por tudo.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto a minha homenagem.

Ao meu orientador, prof. Dr. Amauri Hassui, por aceitar ser meu orientador, dividir comigo seus conhecimentos sobre usinagem e incentivar e apoiar minhas ideias.

Ao prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, por ter aberto diversas portas para que meu intercâmbio para a universidade da Califórnia ocorresse.

Ao prof. Dr. David Dornfeld (em memória), por ter me recebido em seu laboratório e dado todo o suporte para o desenvolvimento de minhas pesquisas.

Aos diversos amigos da Unicamp e da universidade da California em Berkeley, por toda amizade e companheirismo nos grupos de pesquisa.

A todos vocês, meu muito obrigado!

“Se não buscarmos o impossível, acabamos por não realizar o possível”

Leonardo Boff

Resumo

A cada dia, o tema sustentabilidade vai atingindo mais áreas da sociedade, chegando mais recentemente também ao sistema industrial, apontado por dados recentes como um dos maiores responsáveis pelo atual cenário ambiental, consumindo grande quantidade de recursos naturais e gerando poluições. O principal conceito da sustentabilidade está em se considerar nas análises a base tripla composta pelos fatores econômicos, ambientais e sociais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, da extração da matéria prima ao pós-uso, além de aplicar o conceito dos 6Rs (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, redesenhar e remanufaturar). No campo da engenharia de processo, um dos maiores desafios desta década é o desenvolvimento de ferramentas para considerações ambientais. Sendo assim, visando quantificar parâmetros de sustentabilidade de uma cadeia de manufatura, foi realizada a usinagem de uma peça por diversos processos de usinagem, fresamento convencional, serramento, lixamento e usinagem CNC, sendo medido primeiramente ruído gerado durante todos os processos, verificando que o único equipamento que ultrapassou o nível sonoro médio de 85db foi a pistola de ar comprimido, utilizada para limpeza na usinagem CNC. Para a usinagem CNC, foram comparadas diferentes estratégias de usinagem em termos de consumo de energia, obtido através de um medidor de energia, três velocidades de corte, dois avanços, dois diferentes tipos de ferramentas e também dois diferentes tipos de máquinas, obtendo uma economia energética de 94% para a estratégia mais otimizada. Por fim, para quantificação dos impactos ambientais gerados no processo de usinagem CNC, foi utilizado um programa de avaliação de ciclo de vida, que apesar de originalmente aplicado ao nível de produto, se mostrou também bastante funcional ao nível de processo, apesar de ainda possuir algumas limitações, como a falta de dados específicos no inventário e do alto desvio padrão, este que pode ser reduzido integrando a energia real consumida ao inventário do programa.

Palavras Chave: Manufatura, ruído, energia, impactos ambientais, avaliação do ciclo de vida.

Abstract

Each day, the sustainability issue gains more importance in all the fields of the society, reaching more recently also the industrial system, as recent data point to as one of the most responsible for the current environmental scenario, consuming large amounts of natural resources and generating pollution. The main concept of sustainability is to consider in the analyzes the triple bottom line, composed of economic, environmental and social factors throughout the life cycle of products, from the extraction of raw materials to after-use, and apply the concept of 6Rs (reduce, reuse, recycle, recover, redesign and remanufacture). In the field of process engineering one of the biggest challenges of this decade is the development of tools for environmental considerations. In order to quantify sustainability parameters of a manufacturing chain, a piece was machined by several machining processes, conventional milling, sawing, grinding and CNC machining, and first measured the level of noise generated during all processes verifying that the only equipment that exceeded the average sound level of 85db was the compressed air pistol, used for cleaning in CNC machining. For the CNC machining, were compared several machining strategies in terms of energy consumption obtained by a powermeter, three cutting speeds, two feeds rate, two different types of tools and also two different types of machines, achieving energy savings of 94% for the most optimized strategy. Finally, to quantify the environmental impacts generated in the CNC machining process, it was used a life cycle assessment program, which although originally applied to the product level, was also quite functional at the process level, despite some limitations such as the lack of specific data in the inventory and the high standard deviation, this which have been reduced by integrating the consumed actual energy into the program inventory.

Key Words: Manufacturing, noise, energy, environmental impacts, life cycle assessment

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Modelo da manufatura de Entradas-Processo-Saídas	21
Figura 2 – Evolução dos paradigmas da manufatura	22
Figura 3 – Ciclo de vida de um produto aplicando-se o conceito dos 6Rs	24
Figura 4 – Categorização de indicadores de sustentabilidade	24
Figura 5 - Criação de valores para elementos de inovação de migração de um estágio da manufatura para outro	25
Figura 6 – Modelo para a implementação do plano de fabricação verde	26
Figura 7 – Pegada de carbono média po funcionário em uma indústria	28
Figura 8 – Modelo de fluxo de materiais e energia para contabilização	29
Figura 9 – Sistema triangular para a manufatura sustentável	30
Figura 10 – Três linhas básicas da sustentabilidade com as ferramentas mais usadas para analisar cada dimensão e lacunas encontradas na literatura para as unir	31
Figura. 11 – Aplicação do ProdSI comparando o desempenho de sustentabilidade de duas gerações do mesmo produto de eletrônica de consumo	32
Figura 12 – Interconexões entre sistema, produto e processo	33
Figura 13 – Exemplos de indicadores em vários níveis de uma organização	34
Figura 14 – Quadro para condução de uma avaliação de ciclo de vida e suas principais aplicações ..	35
Figura 15 – Método para classificação e caracterização de impacto	37
Figura 16 – Visão geral dos mecanismos ambientais que são cobertos pela metodologia CML e sua relação com a área de proteção	39
Figura 17 – Quadro para otimização multi-objetivo de processos de usinagem	43
Figura 18 – Rota para melhorar os processos de empresas em termos de fabricação sustentável	44
Figura 19 – Modelo de Entrada-Processo-Saída para processos de usinagem	45
Figura 20 – Sistema de ranqueamento de sustentabilidade dos seis elementos	47
Figura 21 – Consumo de potência em função do carregamento da máquina para as três categorias: constante, variável e de corte	49
Figura 22 – Modelo da energia específica para o centro de usinagem Mori Seiki NV1500 usinando aço AISI 1018	50

Figura 23 - Distribuição de energia da máquinas-ferramenta para as condições de usinagem de referência	51
Figura 24 – Tempo de processo e consumo de energia para cinco diferentes estratégias de corte	52
Figura 25 – Peça final com detalhes usinados no centro de usinagem	58
Figura 26 – Fluxograma das operações realizadas e máquinas utilizadas	60
Figura 27 – Nível de pressão sonora para a operação de fresamento convencional	63
Figura 28 – Nível de pressão sonora para o aspirador industrial	64
Figura 29 – Nível de pressão sonora para o serramento	65
Figura 30 – Nível de pressão sonora para o lixamento	65
Figura 31 – Nível de pressão sonora para a usinagem CNC do teste 2	66
Figura 32 – Nível de pressão sonora para cada etapa da usinagem CNC	67
Figura 33 - Nível de pressão sonora na usinagem CNC utilizando uma fresa de aço rápido	68
Figura 34 - Vibração gerada pela máquina-ferramenta em uma usinagem CNC	69
Figura 35 – Consumo de energia para uma operação de usinagem CNC	70
Figura 36 - Consumo de energia para cada operação em cada um dos ensaios	75
Figura 37 - Processo de fresamento com todas as entradas consideradas na avaliação de impactos ...	77
Figura 38 - Indicadores de impacto comparando os quatro processos disponíveis no programa mais um considerando o consumo energético real	83
Figura 39 – Indicadores de impacto comparando quatro diferentes estratégias de fresamento e seu fator de impacto médio	85
Figura 40 – Indicadores de impacto e fatores percentuais de impacto avaliando cada entrada de uma única operação de fresamento, para o aço de baixa liga, na micro fresadora, com os dados reais de energia do processo mais eficiente	86
Figura 41 – Indicadores de impacto e fatores percentuais de impacto para a estratégia de usinagem CNC mais eficiente, avaliando a furação (furo de centro mais furo em cheio) e o fresamento	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente	54
Tabela 2 - Composição química dos materiais utilizados	57
Tabela 3 - Ensaios realizados e parâmetros utilizados	61
Tabela 4 - Energia consumida no fresamento	71
Tabela 5 - Energia consumida na furação	73
Tabela 6 - Montante de recursos de entrada para o fresamento de quatro diferentes opções disponíveis no banco de dados consultado	79
Tabela 7 – Comparação da composição química de um aço de baixa liga, do aço P20, do aço H13 e um aço 18/8	81
Tabela 8 – Avaliação do Impacto do ciclo de vida para cada processo	82
Tabela 9 - Montante de recursos de entrada da furação e do fresamento	88
Tabela 10 – Fatores sugeridos para avaliação social do ciclo de vida	90

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida
AGP - Aquecimento Global Potencial
AP - Acidificação Potencial
CCV – Custo do Ciclo de Vida
CLT - Consolidação das Leis Trabalhistas
CNC – Comando Numérico Computadorizado
CO₂ – Dióxido de Carbono
CPOF - Criação Potencial de Ozônio Fotoquímico
DCB - Diclorobenzeno
DCV – Desempenho do Ciclo de Vida
E - Energia elétrica consumida (J)
EA - Esgotamento Abiótico
EP - Eutrofização Potencial
EPAF - Ecotoxicidade Potencial de Água Fresca
EPAM - Ecotoxicidade Potencial de Águas Marinhas
EPCO - Esgotamento Potencial da Camada de Ozônio
EPT - Ecotoxicidade Potencial Terrestre
HSS – *High Speed Steel*
ISO - *International Organization for Standardization*
Mnf - Manufatura
MRR – *Material Removal Rate (mm³/min)*
n - Rotação da ferramenta (rpm)
Sb – Antimônio (Elemento)
SO₂ – Dióxido de Enxofre
TBL – Triple Bottom Line
THP - Toxidade Humana Potencial
TiN – Nitreto de Titânio
UCTE - *Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity*
UV – Ultra Violeta

V – Volume (mm^3)

v_e - Velocidade Efetiva de Corte (m/min)

v_f - Velocidade de Avanço (mm/min)

z - Número de dentes da fresa

6Rs – Reduzir, Reutilizar, Reciclar, Recuperar, Reprojeta, Remanufaturar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivos Gerais	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
1.2 Estrutura do Trabalho.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 Desenvolvimento da Manufatura	21
2.2 Manufatura Verde e Sustentável	23
2.3 Metodologias para a Manufatura Sustentável	27
2.4 Níveis de Aplicação da Sustentabilidade.....	33
2.5 Avaliação do Ciclo de Vida	34
2.5.1 Histórico da Avaliação do Ciclo de Vida	35
2.5.2 Metodologia para Avaliação do Ciclo de Vida.....	36
2.5.3 Método CML de Caracterização de Impactos	38
2.5.4 Avaliação do Ciclo de Vida em Processos.....	42
2.6 Modelamento de processos de usinagem	43
2.7 Consumo de Energia de processos de usinagem.....	48
2.8 Ruídos de Processos de Usinagem.....	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1 Máquinas e Ferramentas	56
3.2 Materiais.....	57
3.3 Equipamentos e Programas	58
3.4 Planejamento Experimental	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Ruídos dos Processos de Usinagem	63
4.2 Otimização do Consumo de Energia na Usinagem CNC.....	69
4.3 Avaliação do Ciclo de Vida para Operações de Usinagem.....	76
4.3.1 Objetivo da Avaliação do Ciclo de Vida.....	76
4.3.2 Escopo do Estudo	76
4.3.2.1 Função e Unidade Funcional	76

4.3.2.2 Fronteira do Sistema	77
4.3.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida do Fresamento	78
4.3.4 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida do Fresamento.....	80
4.3.4.1 Influência do Material e do Tamanho da Peça.....	81
4.3.4.2 Comparação das Estratégias de Usinagem	84
4.3.4.3 Avaliação das Entradas do Processo	86
4.3.5 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida da Usinagem CNC	87
4.3.6 Avaliação dos Módulos de Impactos Econômicos e Sociais do Ciclo de Vida	90
5 CONCLUSÕES	91
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	92
REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A cada dia que passa, o tema sustentabilidade vai ganhando mais importância em todos os campos da sociedade, devido aos diversos fenômenos que estão ocorrendo no planeta Terra e que viram notícias diariamente em todos os meios de comunicação, como o aquecimento global, poluições ambientais, desaparecimento de diversas espécies de vida, entre outros.

A partir da teoria desenvolvida pelo ambientalista Lovelock (1998), vendo a terra como um superorganismo vivo, Gaia, do qual o ser humano faz parte, esses fenômenos começam a ficar assustadores, levando ecologistas e teólogos a fazerem afirmações do tipo “a terra está doente e ameaçada” (BOFF, 2004).

Pesquisas recentes apontam que 31,8% do consumo mundial de energia no ano de 2013 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015) e 32% das emissões de gases de efeito estufa (21% diretamente mais 11% indiretamente pela produção de eletricidade e geração de calor) no ano de 2010 (PACHAURI e MEYER, 2015) foram atribuídos ao setor industrial. Por fazerem parte deste cenário, companhias de manufatura têm recebido crescente pressão para pensarem além de apenas os benefícios econômicos de seus processos e produtos e considerarem também os efeitos ambientais e sociais dos mesmos (JOUNG *et al.*, 2013).

Apesar de defender uma mudança sistêmica como solução, Capra (2009) aponta para a necessidade de uma legislação ambiental mais rigorosa, atividades empresariais mais éticas e uma tecnologia mais eficiente. Assim, com a consciência global adquirida dos riscos ambientais, bem como as necessidades prementes de competir através da eficiência, os sistemas de manufatura estão envolvidos em um novo paradigma, o da sustentabilidade (DEIF, 2011).

No desenvolvimento e fabricação de novos produtos, sustentabilidade é uma estratégia amplamente aceita em princípios, embora ainda não amplamente praticada. A integração das exigências ambientais e sociais durante todo o ciclo de vida de um produto necessitam de uma nova forma de pensar e novas ferramentas de decisão a se aplicar (KAEBERNICK, KARA e SUN, 2003),

A metodologia mais aceita que vem sendo utilizada para analisar os impactos ambientais de um produto fabricado é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (GARCIA, FERNANDEZ-TORRES e CABALLERO, 2014), principalmente aplicada a produtos, mas também com potencial para ser utilizado como uma ferramenta para análise e desenho de processos (JACQUEMIN, PONTALIER e SABLAYROLLES, 2012), apoiando a decisão com base científica para implementar a fabricação sustentável e verde neste nível (SILVA *et al.*, 2015).

Jacquemin, Pontalier e Sablayrolles (2012) destacam ainda que um dos maiores desafios da presente década no campo da engenharia de sistemas de processo é o desenvolvimento de ferramentas para as considerações ambientais.

Com o intuito de oferecer uma contribuição para o desenvolvimento de ferramentas para quantificação da sustentabilidade em processos, e investigar mais profundamente pontos que ainda limitam a sua utilização mais ampla ao nível do processo, uma ferramenta de avaliação do ciclo de vida comercial foi utilizada para avaliar os impactos ambientais de uma usinagem CNC composta pelas operações de fresamento, furo de centro e furo em cheio, nos aços utilizados para fabricação de moldes e matrizes AISI P20 e AISI H13.

Embora uma avaliação de ciclo de vida pretenda ser baseada na ciência, ela envolve uma série de pressupostos técnicos e escolhas de valores, o que pode tornar uma análise local em nível de processo imprecisa. Um objetivo importante, portanto, é fazer com que essas premissas e escolhas sejam o mais transparentes possível (GUINÉE *et al.*, 2004).

Além do mais, uma avaliação do ciclo de vida LCA concentra-se nos aspectos ambientais dos produtos, e não diz nada sobre as suas características econômicas ou sociais. Os impactos ambientais são frequentemente descritos como "potenciais impactos", já que eles não são especificados no tempo e no espaço e estão relacionados a uma unidade funcional (muitas vezes) arbitrariamente definida (GUINÉE *et al.*, 2004).

Portanto, com a intenção de aumentar a precisão e confiabilidade de decisão do modelo, dados reais de energia foram mensurados e integrados ao programa, investigando sete diferentes estratégias de usinagem.

Uma outra categoria de impacto com alta prioridade para o desenvolvimento metodológico apontada pelo manual de avaliação do ciclo de vida da Comissão Europeia (ILCD, 2010) é o ruído, já que nenhuma abordagem recomendada poderia ser proposta pelo manual, o que motivou também a investigação do nível de ruído da cadeia de usinagem, composta pelas operações de fresamento convencional, serramento, lixamento e a usinagem CNC, além do aspirador de pó industrial e da pistola de ar comprimido, verificando a adequação aos níveis limites estabelecidos pela consolidação das leis trabalhistas do Brasil (CLT).

1.1 Objetivos

Apesar do tema sustentabilidade estar ganhando cada vez mais importância em todos os setores da sociedade, o mesmo ainda carece de modelos mais completos para serem aplicados no nível de processos de usinagem, além de maior divulgação do que já se encontra disponível. Sendo assim, este trabalho tem os seguintes objetivos gerais e específicos:

1.1.1 Objetivos Gerais

- Verificar os principais conceitos para uma manufatura sustentável;
- Identificar modelos e lacunas existentes para uma manufatura sustentável.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar processos de usinagem por meio dos fatores de sustentabilidade ruídos, consumo energético e impactos ambientais;
- Avaliar a aplicabilidade de uma ferramenta de avaliação de ciclo de vida em processos de usinagem.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em 6 seções: introdução, revisão da literatura, materiais e métodos, resultados e discussões, conclusões e referências bibliográficas.

A seção de “Introdução” contextualiza o tema da pesquisa, apontando a importância do tema sustentabilidade dentro da área de processos industriais, além de trazer os objetivos que foram almejados durante a condução da pesquisa.

A seção de “Revisão da Literatura” levanta as principais fontes de informações que são relevantes ao trabalho, tais como o desenvolvimento da manufatura, a manufatura verde e sustentável, metodologias para a manufatura sustentável, níveis de aplicação da sustentabilidade, avaliação do ciclo de vida, modelamento de processos de usinagem, consumo de energia em processos de usinagem e ruídos de processos de usinagem, de modo a fornecer uma base de conhecimento para a discussão dos resultados obtidos.

Em “Materiais e Métodos” são descritos as máquinas, ferramentas, materiais, equipamentos e programas utilizados, bem como é apresentado o modo como os experimentos foram conduzidos.

A seção “Resultados e Discussões” traz os resultados obtidos em termos de níveis de ruído dos processos de usinagem, consumo de energia na usinagem CNC e avaliação dos impactos ambientais por meio de uma avaliação do ciclo de vida da usinagem CNC, sendo que a partir dos experimentos é feita uma discussão dos mesmos com base em observações e no conhecimento apresentado na segunda seção (Revisão da literatura).

A penúltima seção corresponde às “Conclusões”, na qual é apresentada uma síntese das observações e discussões dos resultados.

E por último, em “Referências Bibliográficas” são citadas as fontes utilizadas no trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir são apresentados conceitos e informações relevantes ao trabalho.

2.1 Desenvolvimento da Manufatura

De acordo com Starr (1972), todo sistema de manufatura pode ser dividido em 3 partes: entradas, processo e saídas. Vários tipos de entradas podem ser requeridos e uma grande variedade de saídas podem ocorrer após o processo, que por sua vez é o transformador de entradas em saídas (ISO 9000:2015).

No entanto, conforme a manufatura transforma matéria-prima em produto acabado, resíduos ambientais e emissões indesejadas são também simultaneamente gerados no processo (YUAN, ZHAI e DORNFELD, 2012), além do fato de que também existe o trabalhador nesse sistema, que vem recebendo crescente atenção para que tenha um ambiente de trabalho com práticas adequadas e seus direitos humanos respeitados, como abordado no trabalho de Rokhmawatia, Sathye e Sathye (2015). A Figura 1 mostra o tradicional modelo de manufatura simples de entradas-processo-saídas, considerando também a preocupação atual sobre a consequente emissão de resíduos e desperdícios e também a preocupação com o trabalhador.



Figura 1 - Modelo da manufatura de Entradas-Processo-Saídas (adaptado de STARR, 1972; YAUN, ZHAI e DORNFELD, 2012 e ROKHMAWATIA, SATHYE e SATHYE, 2015).

Conforme mostrado na Figura 1, as entradas principais do processo são os materiais, energia e o trabalho. O processo de transformação na manufatura ocorre através de equipamentos de fábrica, e gera como saída o produto, que é a parte útil, o trabalhador que deve ter seu bem-estar respeitado, além de resíduos e emissões indesejadas.

Conforme discutido por Helu (2013), o desenvolvimento de manufatura tem evoluído de modo que os processos sejam capazes de atender às demandas dos clientes de forma cada vez mais barata, efetiva e rápida, bem como de gerar maior lucro, geralmente focado na melhoria ou da fonte de energia, ou nos meios de fixação e orientação da peça de trabalho e ferramenta, ou no meio para controlar cada um dos três elementos anteriores, de modo que os processos sejam mais capazes de atender às demandas dos clientes de forma mais barata, efetiva e rápida, bem como fazer um maior lucro, resultando na necessidade de equipamentos cada vez mais sofisticados, o que têm permitido o paradigma da manufatura mudar ao longo do tempo, como mostrado na Figura 2.

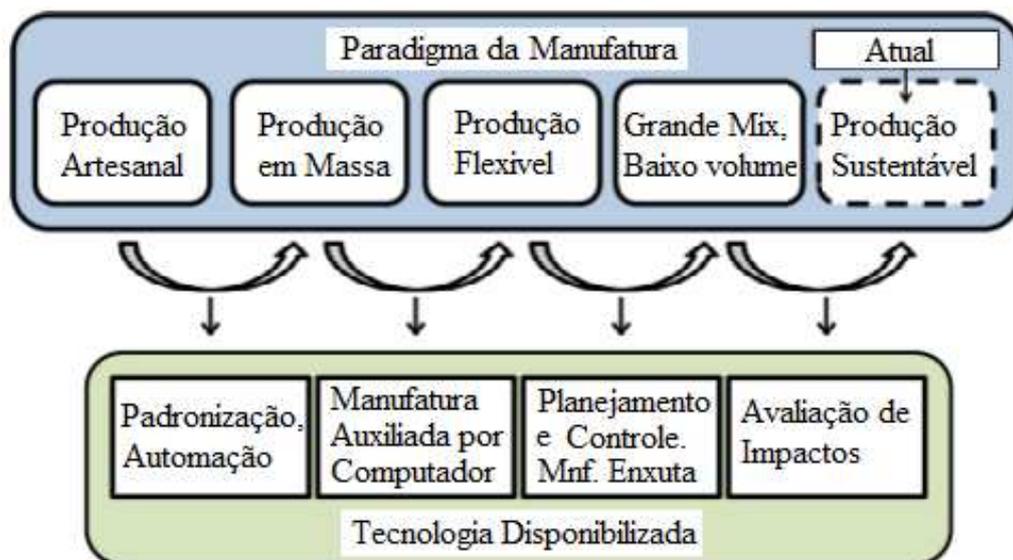


Figura 2 – Evolução dos paradigmas da manufatura (adaptado de Helu, 2013).

Além de apontar a avaliação de impactos como a tecnologia que permitirá superar o paradigma atual, o autor destaca como principais requisitos para integrar a sustentabilidade plenamente na produção o uso dados e informações para a caracterização de fabricação utilizando uma abordagem de sistemas abrangentes, que avalia todos os impactos e fluxos em todos os níveis relevantes do sistema de produção, avaliando o papel da fabricação em todo o ciclo de vida do produto.

Portanto, com a consciência global de hoje em dia dos riscos ambientais, bem como a necessidade de competir através de eficiência, sistemas de manufatura estão evoluídos num novo paradigma, o da sustentabilidade (DEIF, 2011).

2.2 Manufatura Verde e Sustentável

O dicionário Oxford (2014) define sustentável como a capacidade de se manter a uma determinada taxa ou nível. Quando adicionado à palavra manufatura, a organização mundial do comercio define como a criação de produtos manufaturados que utilizem processos e materiais que minimizem os impactos ambientais negativos, conservando energia e recursos naturais, sendo seguros para os funcionários, comunidades e consumidores além de economicamente viáveis.

É também consenso hoje em dia que para uma avaliação plena de sustentabilidade, deve-se considerar todo o ciclo de vida do produto (extração de material, fabricação, utilização e fim de vida), identificando o grau de impacto em cada fase, reduzindo o impacto total, a fim de se evitar mudar problemas de uma fase para outra, além da necessidade de se aplicar o conceito dos 6Rs (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, redesenhar e remanufaturar) (SHUAIB *et al.*, 2014; JAYAl *et al.*, 2010; FINNVEDEN 2009, RICOH, 1994). A Figura 3 ilustra essa economia circular aplicando os 6Rs.



Figura 3 – Ciclo de vida de um produto aplicando o conceito dos 6Rs (adaptado de RICOH 1994; HELU, 2013 e SHUAIB et al, 2014).

Joung *et al.* (2012) apresentam uma categorização de indicadores de sustentabilidade com base na similaridade mútua dividida em cinco dimensões: gestão ambiental, o crescimento econômico, o bem-estar social, o avanço tecnológico e de gestão de desempenho, conforme mostrado na Figura 4.

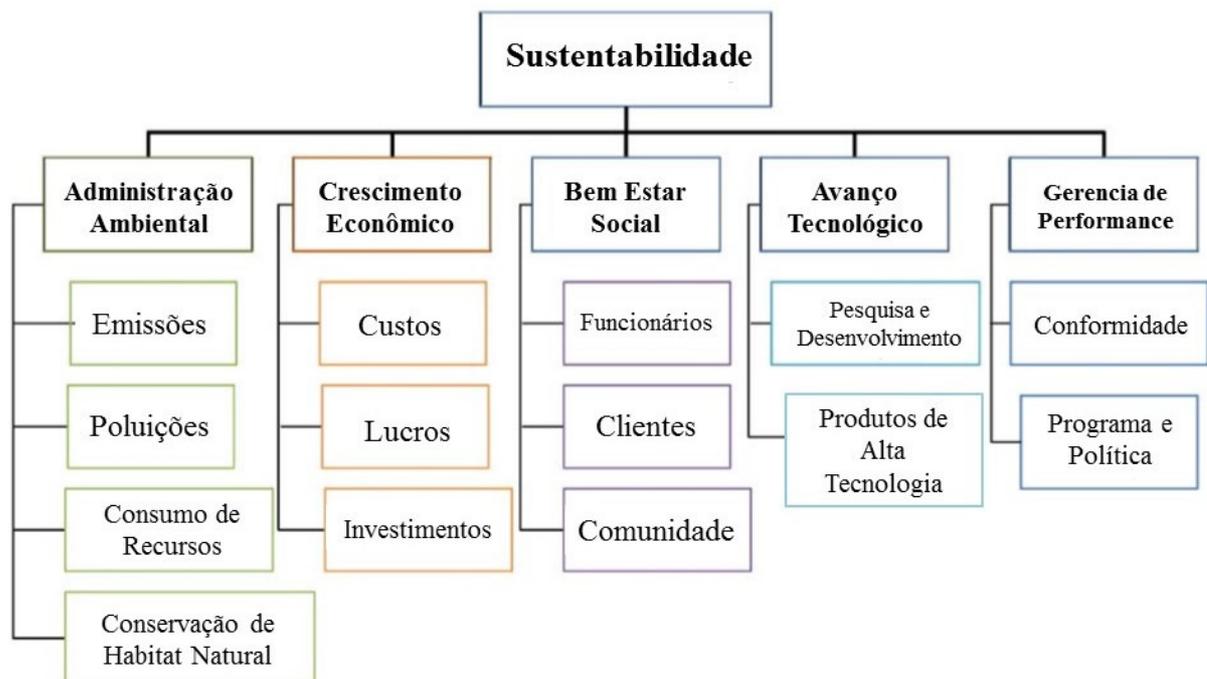


Figura 4 – Categorização de indicadores de sustentabilidade (JONG *et al.*, 2012).

Jawahir e Dillon Jr. (2007) fazem ainda uma divisão sobre o que seria a manufatura verde e a manufatura sustentável, apontando para a criação de novos valores para alguns elementos de inovação (nomeados de 6Rs), conforme mostrado na Figura 5.

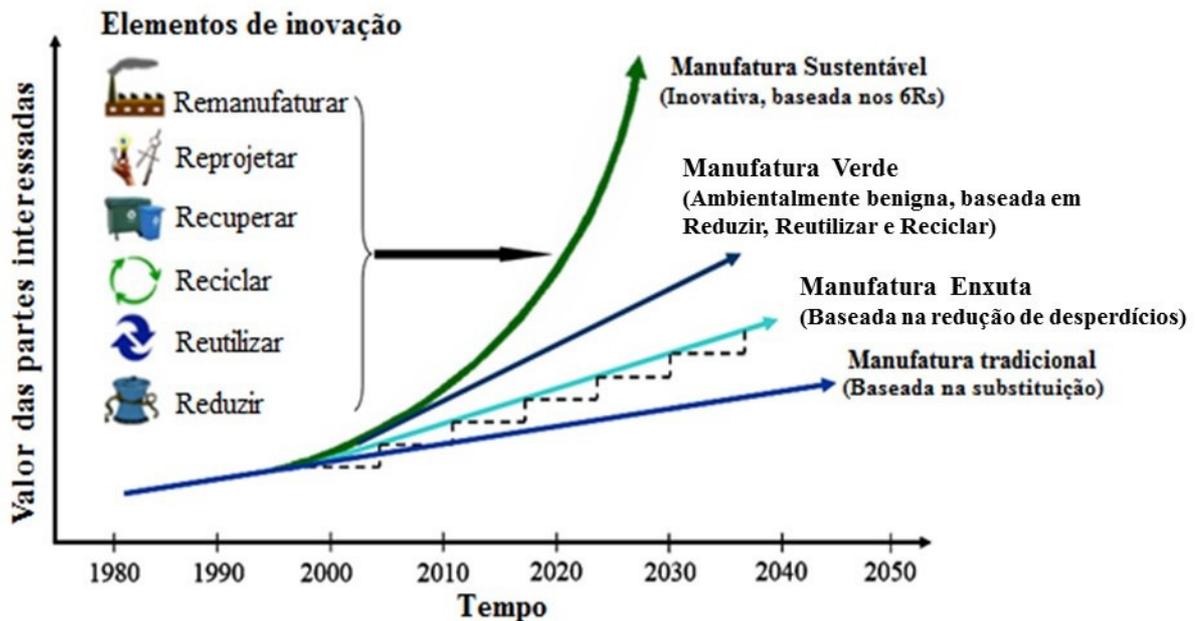


Figura 5 - Criação de valores para elementos de inovação de migração de um estágio da manufatura para outro (Jawahir e Dillon Jr, 2007).

Sendo assim, a palavra "verde", geralmente usada para refletir a uma consciência ambiental amigável, quando é adicionada à fabricação, é usada para descrever a abordagem de fabricação que está consciente dos impactos de seus produtos e processos sobre os recursos ambientais e incluem esses impactos no seu planejamento geral de eficiência e controle (DEIF, 2011).

Deif (2011) propôs um modelo para migrar de uma produção sem considerações ecológicas, para uma mais verde por meio das seguintes etapas: Identifique sua cor (etapa de análise quantitativa, onde através de mapeamentos, questionários e análise de impactos deve-se acessar os níveis de desperdício, de uma cultura verde e ecológica) – Prepare a sua escova (etapa de análise de consumo de materiais, energia e de ciclo de vida com o intuito de se desenvolver planos de melhoria) – Pinte de verde (etapa onde deve ser implementado os planos de manufatura verde) - Mantenha verde (etapa de abordagem organizacional em termos de políticas e orientação, utilizando ferramentas de métricas sustentáveis). A segunda etapa (pinte-verde) é mostrada na Figura 6 de forma detalhada.

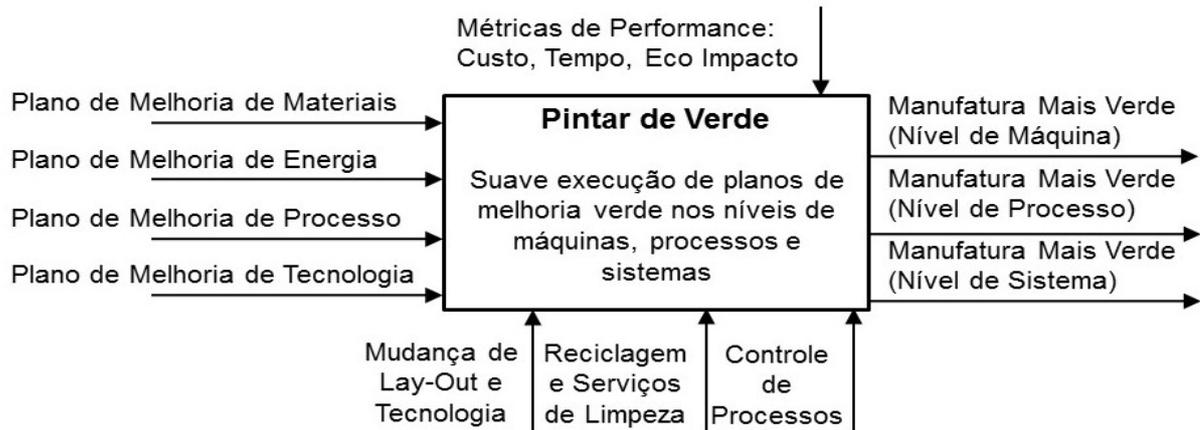


Figura 6 – Modelo para a implementação do plano de fabricação verde (DEIF, 2011).

De acordo com a Figura 6, é possível verificar que uma forma de tornar a manufatura verde em termos de máquina, processo e sistema é implementando planos de melhoria em termos de materiais, energia, processo e tecnologia, o que pode ser conseguido por meio de mudanças de lay-out e tecnologia, reciclagem e serviços de limpeza além de controle de processos, que devem ser quantificados utilizando métricas de performance de custo, tempo e impactos ecológicos.

Faulkner e Badurdeen (2014) sugerem ainda que uma forma natural de migrar de um estágio da manufatura para o outro é observar as melhores práticas utilizadas em um estágio, e como as mesmas podem ser adaptadas aos novos paradigmas, ou seja, de uma manufatura tradicional para uma enxuta, a produção continuou padronizada e automatizada, sendo agregado, no entanto a questão da redução de desperdícios.

Da manufatura enxuta para a verde, além da preocupação com a redução de desperdícios, foram incorporados os conceitos de reciclar e reutilizar (3Rs), se preocupando ainda com as questões ambientais. Já para a manufatura sustentável, mais três Rs foram incorporados, recuperar, reprojeter e remanufaturar, considerando além das questões econômicas (presente desde o início do capitalismo) e ambientais (incorporada com a manufatura verde), também as questões sociais, como já discutido nos capítulos anteriores.

Para a medição de sustentabilidade, os principais conceitos utilizados são a produtividade (relação entre saída por unidade de recursos utilizados) e a intensidade (relação entre o consumo de recursos no uso por unidade de saída) de recursos, na tentativa de dissociar a conexão direta entre o uso de recursos para fabricação e a degradação ambiental. Sendo assim, do ponto de vista da sustentabilidade, o objetivo é maximizar a produtividade dos recursos, minimizando a intensidade de recursos (DORNFELD, 2013).

Sendo assim, como previsto por Eagan e Joeres (2002), em uma escala maior, conforme a sociedade valorizar a qualidade de vida associada com o desenvolvimento sustentável, mover as indústrias em uma direção mais verde até um plano sustentável, aumentará em importância, o que fará que cada vez mais empresas começarão a ver o valor de dissociar seus produtos e processos de fabricação dos impactos ambientais negativos, os movendo para estarem em conformidade com os regulamentos ambientais e reconhecendo vantagens estratégicas de ser “verde” e sustentável.

2.3 Metodologias para a Manufatura Sustentável

A metodologia mais aceita hoje em dia trazendo as questões ambientais para a manufatura é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (GARCIA, FERNANDEZ-TORRES e CABALLERO, 2014). Esta metodologia estuda os aspectos e impactos ambientais potenciais ao longo da vida de um produto (do berço ao túmulo) desde a aquisição da matéria-prima até a produção, utilização e eliminação (ABNT NBR ISO 14040:2009). Uma discussão mais aprofundada sobre este método será realizada no capítulo 2.5.

Uma outra metodologia bastante difundida é o da pegada ecológica (do inglês *ecological footprint*), uma metodologia de contabilidade ambiental que avalia a pressão do consumo das populações humanas sobre os recursos naturais, expressada em hectares globais (gha) (PEGADAECOLOGICA, 2016), ou ainda uma variação dessa que é a pegada de carbono (*carbono footprint*), trazendo o resultado em forma de toneladas de gás carbônico transformados geralmente a partir de um determinado tipo de consumo energético (PEGADADECARBONO, 2016). Um exemplo de aplicação da pegada de carbono em uma indústria é apresentado na Figura 7.

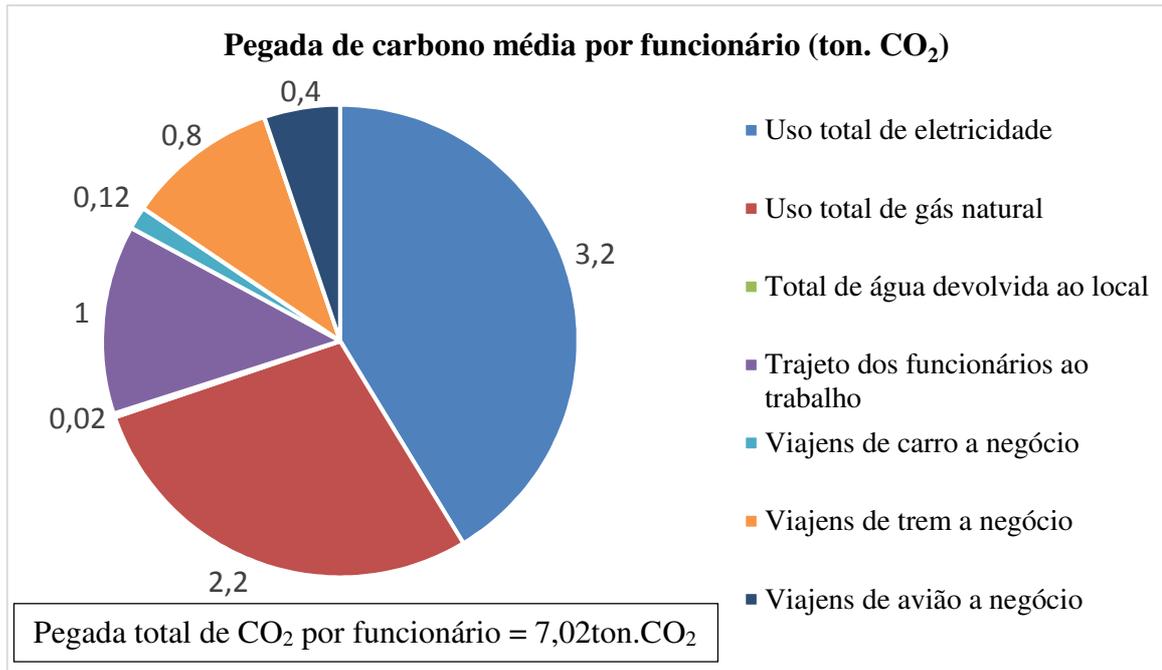


Figura 7 – Pegada de carbono média por funcionário em uma indústria (adaptado de BRE, 2007).

É notado, no entanto, que apesar de ser um método bastante difundido e de fácil aplicação, o mesmo é muito limitado as atividades cotidianas mais comuns, como transportes, consumo de energias e de água, não contendo dados para as atividades industriais mais específicas, como a utilizações de materiais diversos.

Além disso, um produto sustentável não é apenas um produto “ambientalmente amigo”, de modo que o aumento da concorrência e margem de lucro reduzida têm impulsionado muitos fabricantes a usar também a análise do Custo do Ciclo de Vida (CCV) para avaliar a relação custo-benefício das diferentes opções de investimento, como no trabalho realizado por Ribeiro, Peças e Henriques (2013) comparando quatro diferentes configurações de manufatura de um molde plástico, onde além dos custos de fabricação, foram considerados também os custos de manutenção ao longo dos anos, verificando que uma opção mais econômica em termos de fabricação, pode se tornar a manos econômica ao longo do ciclo de vida da peça.

Uma outra abordagem semelhante é a do Desempenho do Ciclo de Vida (DCV), discutida por Helu *et al.* (2011b) onde para os custos monetários totais, se combina o investimento inicial com a confiabilidade, disponibilidade e qualidade. Em seu estudo, os autores quantificam o quanto que o aumento de velocidades de corte e de volume de cavaco removido em um processo de usinagem impactam no custo total de uma peça, concluindo que apesar da economia obtida no processo devido a redução do consumo energético, o custo total

será maior quando acrescido o custo referente a mais rápida danificação dos componentes da máquina ferramenta devido ao maior carregamento.

Apesar de a maioria dos trabalhos abordarem a ACV e o CCV separadamente, já existe também um esforço para unir essas duas dimensões, como no trabalho de Bierer *et al.* (2014) em que os autores utilizam o método da contabilidade do custo do fluxo de material, para tanto, três estágios são necessários: Primeiramente é necessário construir um modelo estrutural de fluxo onde seja visualizado a borda do sistema analisado, os centros de quantificações e o fluxo de material e energia em si, tanto os desejados como os indesejados. O segundo passo é quantificar o fluxo de energia e material e no terceiro e final estágio, todos os fluxos de materiais e energia são convertidos para valores monetários, destacando o curso negativo do uso ineficiente de materiais e energia. A Figura 8 mostra este modelo.

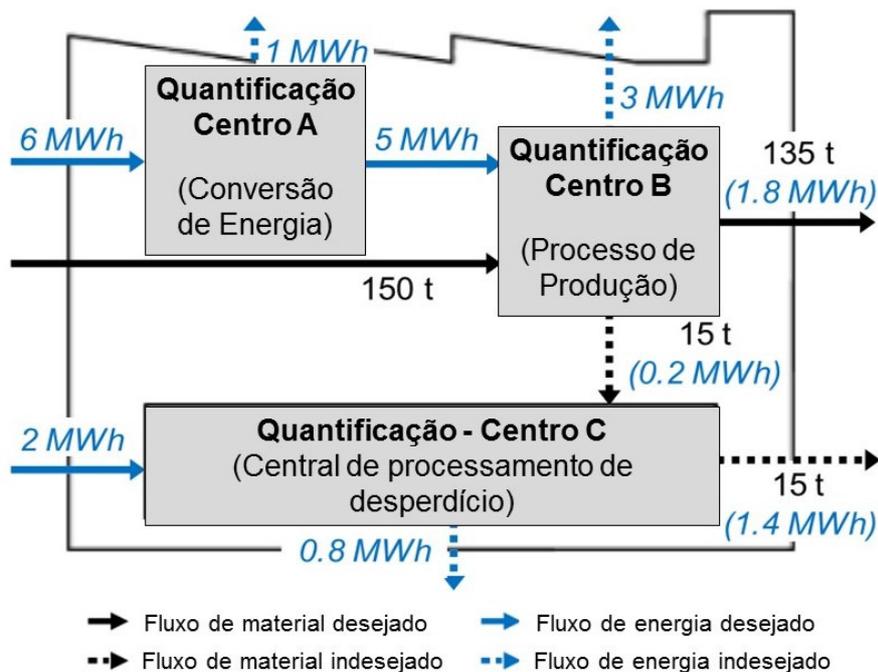


Figura 8 – Modelo do fluxo de material e de energia para contabilização (adaptado de BIERER *et al.*, 2014).

Com a intenção de visualização de possibilidades para uma produção sustentável, Yuan, Zhai e Dornfeld (2012) desenvolveram um sistema triangular que tenta abordar as questões de sustentabilidade de fabricação do ponto de vista da prevenção da poluição, considerando os três principais componentes de fabricação: tecnologia, energia e materiais, como mostrado na Figura 9.

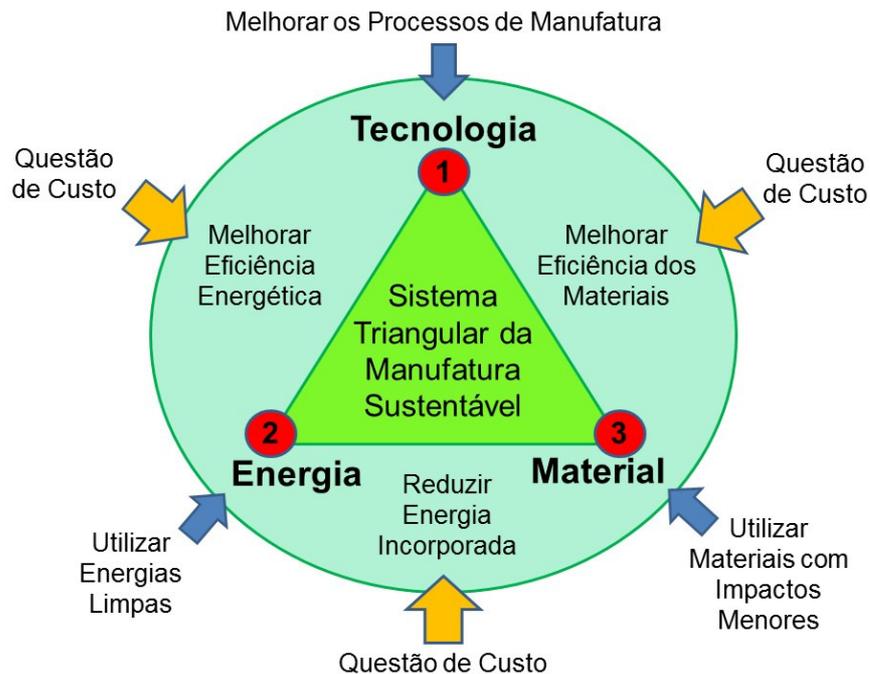


Figura 9 – Sistema triangular para a manufatura sustentável (adaptado de YUAN, ZHAI e DORNFELD, 2012).

Assim como no modelo de Bierer *et al.* (2014), os autores associam a melhoria do sistema de manufatura, que pode ser conseguida por meio da melhoria da eficiente energética e de materiais, redução da energia incorporada ao sistema, melhoria dos processos, além da utilização de fontes de energia mais limpas e materiais com menores impactos ambientais, com a redução de, mostrando que melhorar o sistema como um todo acaba trazendo benefícios também financeiros.

No entanto, conclusões retiradas de alguns artigos de revisão feitas sobre esses modelos apresentados e diversos outros (FENG, JOUNG e LI, 2010; HOOGMARTEENS *et al.*, 2014; SHUAIB *et al.*, 2014; FAZENI, LINDORFER e PRAMMER, 2014) revelam que apesar de um grande progresso já alcançado na área, ainda existem algumas lacunas que precisam ser construídas a fim de se criar uma dimensão verdadeiramente sustentável, composta pelas três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômica e social), conhecidas como as Três Linhas Básicas da sustentabilidade (ou TBL – do *inglês Triple Bottom Line*), que são a identificação e quantificação da dimensão social, além das diferentes métricas utilizadas para quantificar as dimensões econômica e ambiental. A Figura 10 mostra as ferramentas mais utilizadas para avaliar cada dimensão e as lacunas encontradas (pontos que ainda precisam ser desenvolvidos) para criar uma dimensão sustentável completa.

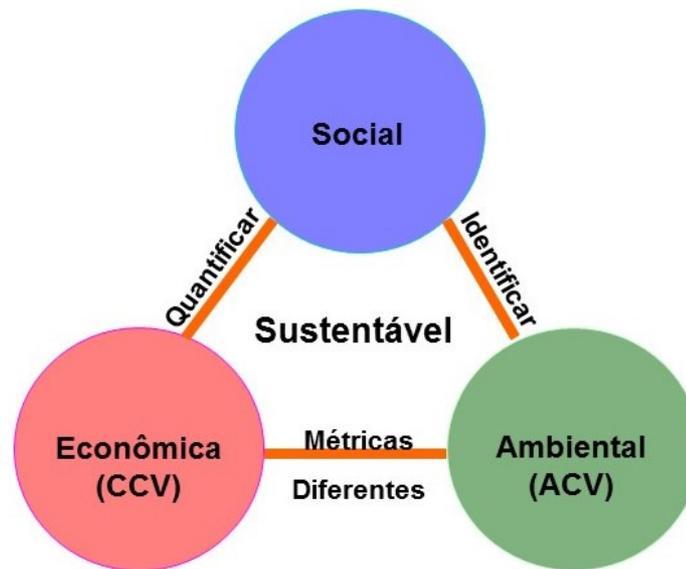


Figura 10 – Três linhas básicas da sustentabilidade com as ferramentas mais usadas para analisar cada dimensão e lacunas encontradas na literatura para as unir.

Em termos de aspectos econômicos e ambientais, percebe-se que a principal dificuldade para a união deles são as diferentes métricas utilizadas (CCV usa valor monetário e ACV usa unidades físicas, como energia, massa, volume), além da necessidade de um grande banco de dados ao longo do ciclo vida (HOOGMARTEENS *et al.*, 2014). De acordo com o aspecto social, percebe-se que esses são geralmente ignorados, provavelmente porque são difíceis de identificar e quantificar (SHUAIB *et al.*, 2014). Shuaib *et al.*, (2014) também apontam para a frequente falta de algum(s) estágio(s) do ciclo de vida ou a não-consideração dos 6Rs.

Um outro modelo interessante é o do Índice de Sustentabilidade de Produtos (ProdSI), uma espécie de modelo multi objetivo que se destina a incorporar todos os três aspectos-chave da produção sustentável (Três Linhas Básicas, ciclo de vida total do produto, e 6R), permitindo a comparação entre diferentes produtos, como exemplo mostrado na Figura 11.

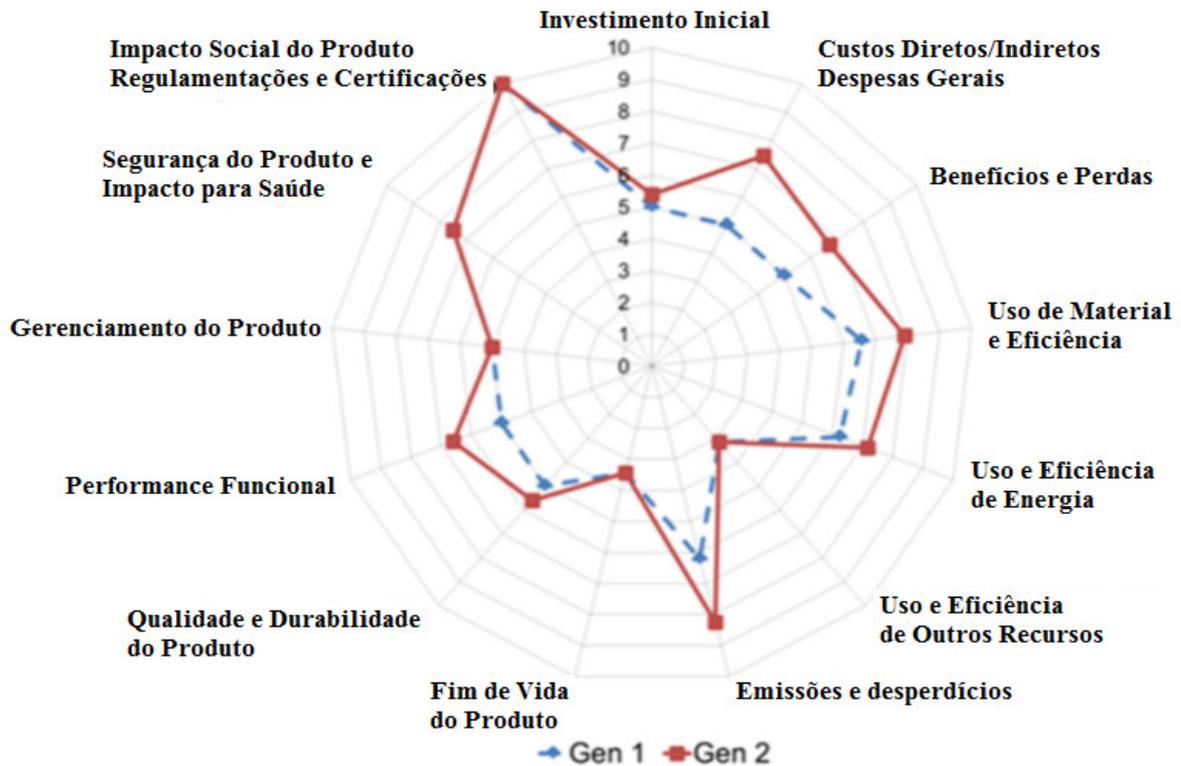


Figura 11 – Aplicação do ProdSI comparando o desempenho de sustentabilidade de duas gerações do mesmo produto de eletrônica de consumo (Shuaib *et al.*, 2014).

No estudo apresentado na Figura 11, os autores avaliaram e compararam o desempenho de sustentabilidade de duas diferentes gerações do mesmo produto de eletrônica de consumo, apresentando os resultados em um modelo muito interessante e abrangente que permite visualizar a comparação de todos os fatores analisados, e a conclusão de que o produto da segunda geração "Gen 2" teve desempenhos de sustentabilidade melhor do que o da primeira "Gen 1", uma vez que todos os fatores analisados receberam notas melhores. Nesse exemplo, valores de referência foram estabelecidos com base nas gerações anteriores do mesmo produto, normas, regulamentos e opinião de especialistas. Porém, nota-se em outras aplicações semelhantes (DE SILVA *et al.*, 2009; GUPTA *et al.*, 2010; DREHER *et al.*, 2009) uma grande divergência para o processo de especificação de métricas, avaliação e ponderação, mostrando que este ainda é um procedimento bastante pessoal.

Acrescenta-se ainda, que seria muito mais difícil tirar uma conclusão desse modelo se algumas métricas fossem melhores e outras piores, em razão da diversidade de unidades, uma vez que não existe um único método de normalização que possa ser aplicado a todas as métricas, por causa da heterogeneidade das métricas de sustentabilidade individuais (GUINÉE *et al.*, 2004).

2.4 Níveis de Aplicação da Sustentabilidade

Apesar de ser o objetivo deste trabalho discutir o que é ser sustentável no nível de processos de fabricação, um esforço para tornar a fabricação mais sustentável deve considerar questões não apenas neste nível, mas também no de produtos e de sistema (JAYAL et al, 2010), uma vez que geralmente um produto é fabricado por meio de uma série de operações e processos de montagem, chamados cada um de unidades operacionais (CHOI, KAEBERNICK e LAI, 1997).

Como já discutido nos capítulos anteriores, um produto irá ainda consumir recursos e gerar resíduos e emissões para o sistema nas suas diversas fases durante ao longo do ciclo de vida. Sendo assim, a Figura 12 foi construída ilustrando as interconexões de um processo com o produto e o sistema.

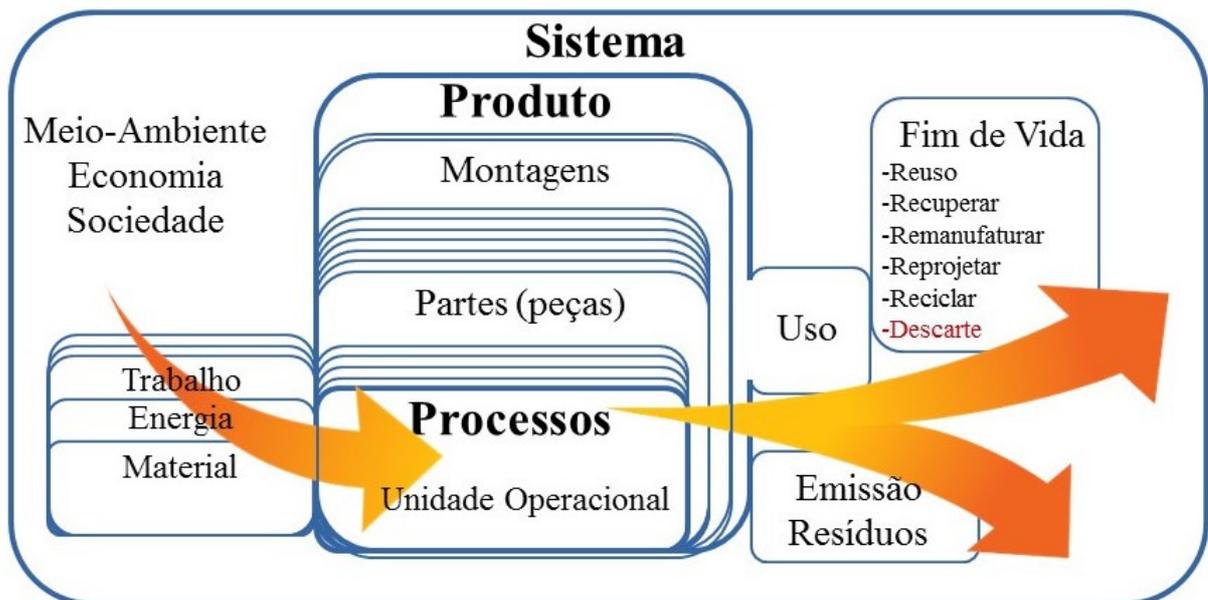


Figura 12 – Interconexões entre sistema, produto e processo.

De um ponto de vista organizacional, um indicador pode ser colocado em diferentes níveis de uma organização, já que a maioria das organizações têm uma estrutura hierárquica, por exemplo, em uma fábrica existem níveis de máquina, célula de trabalho, montagem ou linha de produção, fábrica, empresa e cadeia de suprimentos (FENG, JOUNG e LI, 2010). A Figura 13 mostra alguns exemplos de indicadores, em diversos níveis de agregação de valor, desde um nível baixo, como por exemplo o uso de materiais e energia no nível de máquina ferramenta,

até níveis mais elevados em uma organização de manufatura, como o uso de materiais perigosos contidos na cadeia produtiva.



Figura 13 – Exemplos de indicadores em vários níveis de uma organização (FENG, JOUNG e LI, 2010).

2.5 Avaliação do Ciclo de Vida

Avaliação do ciclo de vida é uma técnica para quantificar os aspectos e impactos ambientais potenciais associados com um produto (fabricado e consumido), ao longo de sua vida, desde a aquisição da matéria-prima até a produção, utilização e eliminação, sendo padronizada pelas ABNT NBR ISO 14040 (Princípios e Estrutura) e ABNT NBR ISO 14044 (Requisitos e Orientações). De acordo com essas padronizações, uma avaliação do ciclo de vida deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados. A Figura 14 mostra o quadro de avaliação do ciclo de vida e as suas principais aplicações.



Figura 14 – Quadro para condução de uma avaliação de ciclo de vida e suas principais aplicações (adaptado da ABNT NBR ISO 14040:2009).

2.5.1 Histórico da Avaliação do Ciclo de Vida

De acordo com Guinée (2011), que apresentou uma revisão sobre a história da avaliação do ciclo de vida, os primeiros estudos que utilizaram esta ferramenta, ainda que de forma parcial, começaram a surgir no final dos anos 1960 e início dos anos 1970, em um período chamado de "décadas de concepção" (1970-1990), caracterizada por uma grande divergência de abordagens, terminologias e resultados.

No segundo período (1990-2000), chamado de "década de padronização", a avaliação do ciclo de vida começou se tornar parte de documentos e legislação política, envolvendo inclusive a Organização Internacional de Normalização (ISO), a partir de onde muitos métodos começaram a ser desenvolvidos, tais como CML 1992, o ponto final ou a abordagem danos.

O terceiro período (2000-2010), chamado de "década de elaboração", agências europeias e norte-americanas começaram a pôr em prática as avaliações de ciclo de vida e melhorar as ferramentas de apoio, caracterizando uma década de divergência de métodos novamente, já que a ISO nunca teve como objetivo padronizar o método em detalhes, o que

leva o autor a propor como desafio para a década atual, selecionar e fazer com que a infinidade de modelos esteja disponível para as diferentes questões.

2.5.2 Metodologia para Avaliação do Ciclo de Vida

De acordo com as normalizações ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044, a avaliação do ciclo de vida deve incluir as seguintes seções: definição dos objetivos e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. Cada seção será definida a seguir de acordo com essas normas.

Ao definir o objetivo de uma ACV, devem ser indicados de forma precisa a aplicação pretendida, os motivos para a realização do estudo, a audiência pretendida, isto é, para quem os resultados do estudo são destinados além de definir se os resultados se destinam a ser utilizados em afirmações comparativos.

Na definição do escopo devem ser consideradas e claramente descritas, a função (características de performance), a unidade funcional (para proporcionar uma referência para a qual os dados de entrada e de saída são normalizados no sentido matemático) e a fronteira do sistema (determina quais processos unitários devem ser incluídos dentro da avaliação), garantindo que o alcance, a profundidade e o detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para resolver o objetivo declarado.

Em alguns casos, o objetivo e o escopo do estudo podem ser revistos devido a limitações imprevistas, restrições ou como resultado de informações adicionais. Tais modificações, juntamente com a sua justificativa, devem ser documentadas.

Para a inclusão no inventário, os dados qualitativos e quantitativos devem ser recolhidos para cada unidade de processo contida dentro dos limites do sistema. Os dados recolhidos, quer sejam medidos, calculados ou estimados, são utilizados para quantificar as entradas e saídas de uma unidade de processo. É sabido que esse é um item especialmente crítico em relação a disponibilidade de dados, já que os bancos de dados estão sendo desenvolvidos em vários países, e o formato para bancos de dados ainda está sendo padronizado, sendo que na prática, os dados são muitas vezes obsoletos, incomparáveis ou de qualidade desconhecida (GUINÉE et al., 2004).

As principais ferramentas que vem sendo utilizadas para acessar bancos de dados de ACV e realizar análise do ciclo de vida são o SimaPro e o gabi (HERRMANN E MOLTESEN,

2015), ferramentas essas que são comerciais. Há, no entanto, também ferramentas livres disponíveis, que são fornecidos por diferentes instituições, como a OpenLCA por exemplo, que é um programa de ACV e pegada ambiental criado pela GreenDelta em 2006, com uma ampla gama de recursos e muitos bancos de dados disponíveis (OPENLCA, 2016).

Há ainda muitos bancos de dados de ACV livres e comerciais disponíveis, que são fornecidos por diferentes instituições (OPENLCA, 2016). No site da Nexus (2016) por exemplo, criado pela openLCA, é possível obter diversas bases de dados livres e também para compra, sendo o Ecoinvent o mais famoso banco de dados de ACV em todo o mundo, usado por cerca de 4.500 usuários em mais de 40 países. O banco de dados contém dados de inventário internacional de ciclo de vida industrial no fornecimento de energia, extração de recursos, fornecimento de material, produtos químicos, metais, agricultura, serviços de gestão de resíduos, e serviços de transporte (NEXUS, 2016).

A fase de avaliação de impactos envolve a conversão dos resultados do inventário do ciclo de vida, para unidades comuns e a agregação dos resultados convertido dentro de uma mesma categoria de impacto, utilizando fatores de caracterização que variam de acordo com o método utilizado, como discutidos por Slapnik *et al.* (2015). A Figura 15 mostra um exemplo de um processo de classificação e caracterização de impactos.

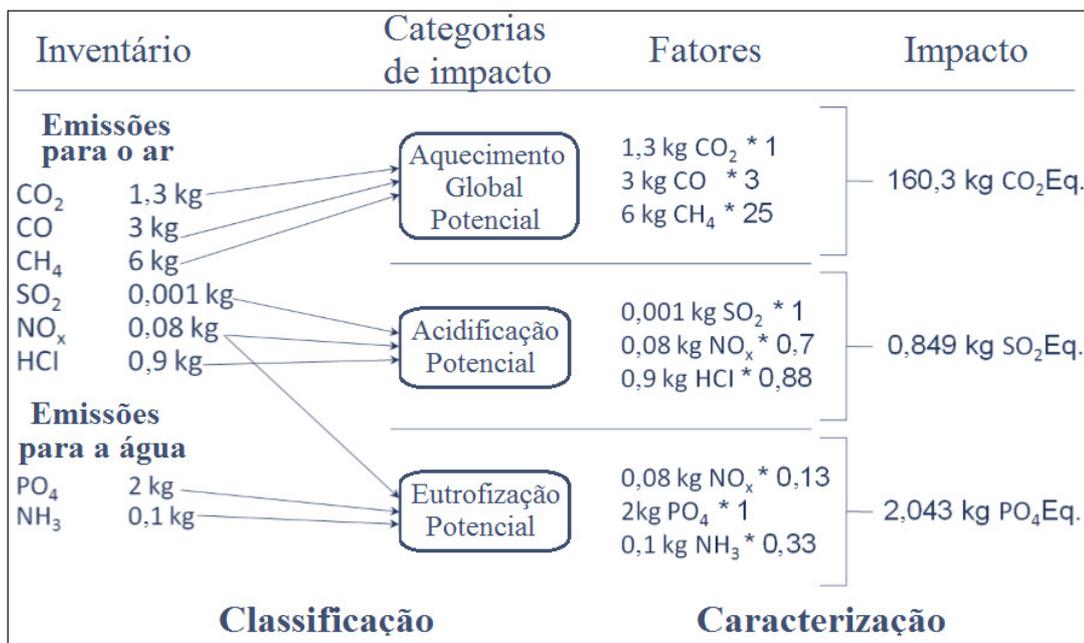


Figura 15 – Método para classificação e caracterização de impactos (GABI, 2010).

Como pode ser observado na Figura 15, um impacto é caracterizado a partir do inventário de emissões, que são classificados em diversas categorias de impacto, podendo ainda

uma emissão contribuir para mais do que uma categoria, como os óxidos de nitrogênio (NO_x) que contribuem para a categoria de acidificação e eutrofização potencial. O próximo passo é atribuir fatores de multiplicação para cada elemento dentro de uma categoria de impacto, com o intuito de convertê-los para uma base comum, como por exemplo o aquecimento global, que é quantificado em termos de dióxido de carbono (CO_2) potencial, além de outros gases, como o metano, recebendo neste caso o fator de multiplicação 25.

Existem diferentes métodos de caracterização que podem ser utilizados para a realização de uma avaliação de impacto do ciclo de vida, tais como TRACI ou CML. Estes métodos são continuamente pesquisados e desenvolvidos por diferentes grupos científicos baseados em diferentes metodologias com diferentes categorias de impacto (GABI, 2010). No capítulo 2.5.4 o método CML será detalhado mais profundamente.

Por fim, a fase de interpretação dos resultados compreende vários elementos, como a identificação dos problemas significativos com base nos resultados das fases anteriores, uma avaliação que considera a integralidade, a sensibilidade e a consistência das verificações, além das conclusões, limitações e recomendações.

2.5.3 Método CML de Caracterização de Impactos

CML é uma metodologia do centro de estudos ambientais da universidade de Leiden, na Alemanha, que se concentra em uma série de categorias de impactos ambientais, expressas em termos de emissões para o ambiente. O método inclui as etapas de classificação, caracterização e normalização de impactos (GABI, 2010). A Figura 16 mostra os diversos mecanismos ambientais abordados pelo método, além das áreas de proteção que cada um deles se relacionam.

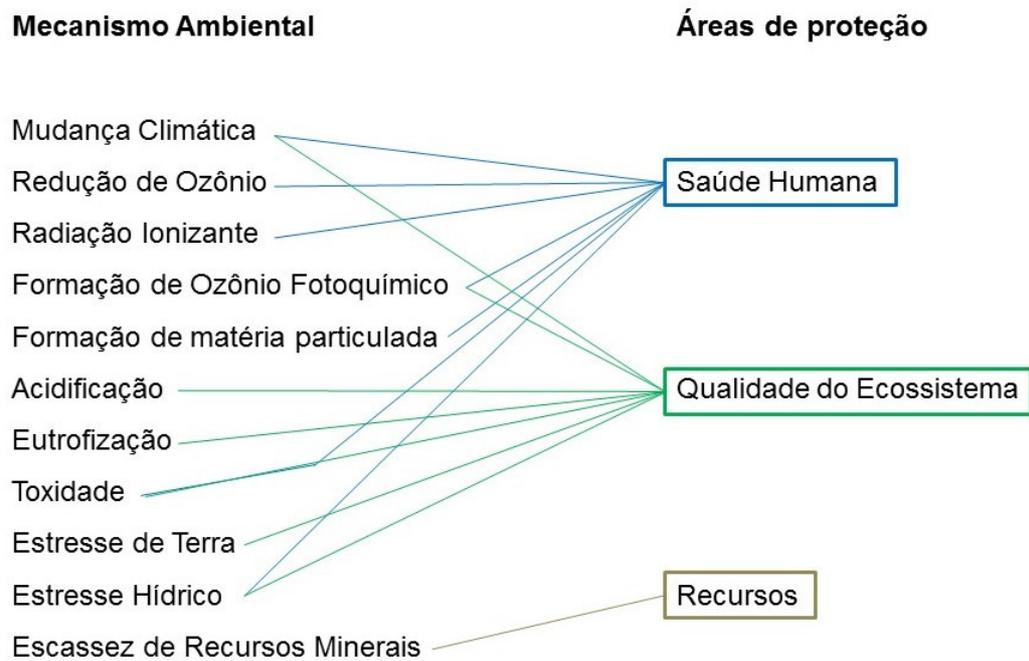


Figura 16 – Visão geral dos mecanismos ambientais que são cobertos pela metodologia CML e sua relação com as áreas de proteção (Verones *et al.*, 2016).

Como pode ser verificado na Figura 16, treze mecanismos ambientais são abordados pelo método e três áreas de proteção consideradas (a saúde humana, a qualidade do ecossistema e os recursos), sendo que um mecanismo ambiental pode se relacionar com mais do que uma área de proteção, como a mudança climática que impacta a saúde humana e também a qualidade do ecossistema. A seguir serão apresentados cada um dos mecanismos citados, de acordo com Verones *et al.*, 2016.

- **Mudança Climática:** A causa e efeito da mudança climática começa com a emissão de um gás de efeito estufa para a atmosfera, o aumento da concentração desses gases faz com que a capacidade de reter radioatividade da atmosfera aumente, resultando em uma maior absorção da energia solar na atmosfera, fazendo com que a temperatura global aumente, afetando a saúde humana, bem como os ecossistemas naturais (terrestre e aquático). O Painel Internacional sobre mudança climática (IPCC) fornece fatores de caracterização chamados de aquecimento global potencial absoluto, que podem ser usados para comparar diferentes gases de efeito estufa, sendo expressos em quilograma de CO₂ equivalente para um tempo de 100 anos. **Redução de Ozônio:** A camada de ozônio na estratosfera absorve uma grande parte da radiação ultra violeta (UV) nociva proveniente do sol. Em situação natural, o ozônio está sendo continuamente formado e destruído, No entanto, uma série de produtos químicos sintéticos que contêm grupos de

flúor, bromo e cloro, chamados de substâncias destruidoras do ozono, podem aumentar muito a taxa de destruição, levando a uma redução da espessura da camada de ozono, o que faz com que mais radiação UV atinja a superfície da Terra, o que pode levar a efeitos adversos para a saúde humana (como câncer de pele e catarata) e para o ecossistema (que não é considerado). A Organização Meteorológica Mundial (OMM) relata a redução de ozônio potencial para 21 substâncias diferentes, que foram utilizadas para o cálculo dos fatores de caracterização e que representam a quantidade de ozônio destruído por uma substância durante todo o seu tempo de vida em relação à quantidade de ozônio destruído pelo CFC-11 durante todo o seu tempo de vida.

- **Radiação Ionizante:** Radionuclídeos podem ser liberados durante uma série de atividades humanas como no ciclo do combustível nuclear ou ainda durante a mais convencional geração de energia, como a queima de carvão. Radionuclídeos aerotransportados podem ser inalados por seres humanos, ou acabar em água doce e ser ingeridos. Quando os radionuclídeos entram em decadência, eles liberam radiações ionizantes, que provoca alterações no DNA dos seres humanos, o que por sua vez pode levar a diferentes tipos de cancro e defeitos de nascimento. Efeitos semelhantes deve ser esperado em outros organismos vivos, mas os danos aos ecossistemas não são quantificados até o momento, sendo a saúde humana a única área de proteção. Diferentemente da maioria dos outros fatores de caracterização, o dano não é expresso por kg de emissões, mas sim por Bq (Becquerel), que é o número de núcleos de átomos que se decompõem por segundo.
- Formação de Ozônio Fotoquímico:** A via de causa e efeito de formação de ozônio começa com uma emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) ou compostos orgânicos voláteis (NMVOC) para o ambiente, seguindo para a atmosfera e se transformando em ozônio através de reações químicas com o ar, podendo ser inalado pelos seres humanos ou absorvido pelas plantas, levando a um aumento do número de casos de mortalidade e danos graves para a saúde humana, bem como o desaparecimento de espécies vegetais e danos graves para os ecossistemas terrestres. O dano causado na saúde humana é definido como a mudança anual de doenças por ano de todos os habitantes, devido a uma mudança na emissão de uma substância x em determinada região, sendo determinado de forma similar considerando os danos causados a um ecossistema terrestre em termos de espécies florestais e de pastagens naturais.
- **Formação de Matéria Particulada:** A via de causa e efeito de formação de partículas começa com uma emissão de NO_x , NH_3 , SO_2 , ou $\text{PM}_{2,5}$ primário para o ambiente,

seguindo para a atmosfera, sofrendo reações químicas com o ar e sendo transformados em aerossóis secundários, que podem ser inalados por parte da população humana, levando a um aumento do número de casos de mortalidade e de danos graves para a saúde humana. O dano causado na saúde humana é definido como a mudança anual de doenças por ano de todos os habitantes, devido a uma mudança na emissão de uma substância x em determinada região.

- Acidificação: Poluentes acidificantes têm uma ampla variedade de impactos sobre o solo, águas subterrâneas, águas de superfície, organismos biológicos, ecossistemas e materiais (edifícios). Exemplos incluem a mortalidade de peixes em lagos escandinavos, a degradação de florestas e o desmoronamento de materiais de construção. Os principais poluentes acidificantes são o SO₂, NO_x e NH_x, afetando, portanto, o meio ambiente, o ambiente feito pelo homem, a saúde humana e os recursos naturais (tópico consultado de Guinée *et. al.*, 2004, pois está faltando no relatório do CML consultado).
- Eutrofização de Água Fresca: Ocorre devido à descarga de nutrientes no solo ou em corpos de água doce e o aumento subsequente nos níveis de nutrientes (ou seja, de fósforo e nitrogênio), aumentando assim a absorção de nutrientes pelos organismos autótrofos, tais como cianobactérias e algas e, finalmente, as perdas potenciais para a biodiversidade. O fator de caracterização para a eutrofização de água é determinado com base nas emissões de P para o solo agrícola, a água doce ou pela erosão do solo para cada ecorregião do mundo.
- Ecotoxicidade: Esta categoria de impacto abrange os impactos das substâncias tóxicas nos ecossistemas aquáticos, terrestres e de sedimentos, sendo a área de proteção o ambiente natural (e recursos naturais). É calculada em termos de quilogramas de diclorobenzeno equivalente. É notado, no entanto, que a discussão sobre a caracterização das categorias de impacto para toxicidade relacionada está longe de ser resolvida (tópico consultado de Guinée *et. al.*, 2004, pois está faltando no relatório do CML consultado).
- Estresse de Terra: O método é baseado na orientação da UNEP-SETAC sobre a avaliação do impacto do uso global da terra na biodiversidade sobre a área de proteção da qualidade do ecossistema. A abordagem proposta por Chaudhary *et al.* (2015) apud Verones *et al.*, (2016) usando a relação espécie por área rural é usada para o cálculo dos fatores de ecoregiões específicas para a perda de biodiversidade tanto para a ocupação do solo como para a transformação.
- Estresse hídrico: Água para produção de alimento é uma das principais questões globais e a irrigação é um fator limitante na agricultura. Abastecimento alimentar é uma parte

vital das necessidades humanas e contribui ainda com o surgimento de outras doenças. Enquanto muitos fatores contribuem para este problema, reduzida disponibilidade de água causada pelo consumo de água leva a redução da disponibilidade para a produção de alimentos e as consequentes perdas de rendimento. O stresse hídrico é geralmente definido pela razão do total anual das retiradas de água doce à disponibilidade hidrológica.

- **Escassez de Recursos Minerais:** Os recursos minerais são importantes matérias-primas em diversos setores industriais. O declínio de um minério pode ser usado como um indicador para uma série de impactos sociais, por exemplo, maior quantidade de um minério produzido implica mais resíduos (resíduos de rocha, rejeitos) a ser tratado. O fator de caracterização é calculado como o excedente de mineral que será extraído no futuro por unidade de mineral extraído.

2.5.4 Avaliação do Ciclo de Vida em Processos

No campo das aplicações em processos, Azapagic e Clift (1999) escreveram uma revisão sobre avaliações de ciclo de vida nos campos de seleção, modelagem e otimização, mostrando vários trabalhos datando a partir de 1995, apontando que o principal problema reside em encontrar as melhores estratégias e escolher a melhor alternativa em um ambiente de decisão com múltiplos e muitas vezes conflitantes objetivos.

Desde então, o número de trabalhos lançando avaliações de ciclo de vida e as indústrias de processo tem apenas aumentado, como pode ser visto nos artigos de revisão de Jacquemin *et al.* (2012) e Fazeni *et al.* (2014), que apesar de reconhecerem realizações significativa na área, os autores consideram a avaliação de ciclo de vida uma abordagem promissora em fase precoce para aplicações em processos (FAZENI *et al.*, 2014), com muitos desafios para o futuro em áreas de desenvolvimento, controle, operações, modelagem, integração e apoio de métodos e ferramentas (JACQUEMIN *et al.*, 2012).

Finalmente, destaca-se que a avaliação do ciclo de vida para a análise de processos industriais ainda não está espalhadas, no entanto está se tornando cada vez mais atraente e importante nos dias de hoje para o desenvolvimento de um novo, melhorado e integrado método e ferramentas, a fim de incluir mais considerações ambientais e desenvolver uma forma mais sustentável para a indústria de processos (GILLANI, 2013).

2.6 Modelamento de processos de usinagem

O objetivo principal na modelagem da operação de usinagem é desenvolver uma capacidade de previsão de desempenho para usinagem, a fim de facilitar um planejamento eficaz para atingir a máxima produtividade, qualidade e custo (VAN LUTTERVELT *et al.*, 1998). Com relação ao nível de processos de usinagem, os critérios de otimização mais comumente utilizados são a taxa de remoção de material, rugosidade superficial, força de corte, vida de ferramenta e potência consumida (GOPARSAMY *et al.*, 2009).

No entanto, a otimização de um único fator tem um valor limitado para uma condição de corte ótima em um ambiente onde objetos diferentes e contraditórios devem ser atingidos simultaneamente. Na verdade, muitas vezes a melhora de um fator de usinagem só é possível com a piora de outros, levando ao desenvolvimento de modelos multiobjetivos, como o apresentado por Yan e Li (2013), na Figura 17.

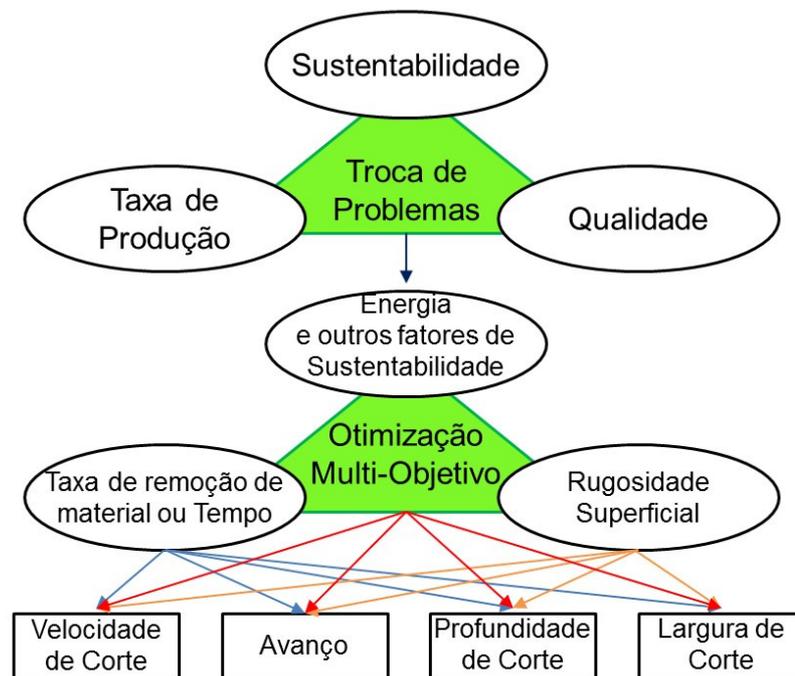


Figura 17 – Quadro para otimização multi-objetivo de processos de usinagem (adaptado de YAN e LI, 2013).

De acordo com o modelo da Figura 17, pode ser observado que para um processo de usinagem ser considerado sustentável, o mesmo deve se preocupar na otimização da taxa de produção, o que impacta diretamente no custo de uma peça, mas também com a qualidade, que pode trazer custos extras de produção (como refugos) e também de pós-produção (como peças

de baixo rendimento na fase de uso), sem negligenciar os fatores ambientais (como o consumo de energia. Um parâmetro de corte que mostra bem essa problemática é a velocidade de avanço, uma vez que seu aumento gera redução no tempo de produção de uma peça, mas também piora na rugosidade superficial da mesma, como discutido por Diniz, Marcondes e Coppini (2010).

Com relação ao processo, percebe-se um grande esforço feito em termos de otimização e eficiência de recursos. Xianchun *et al.* (2006) desenvolveram um método para melhorar a rota de processos de empresas em termos de fabricação sustentável que, a partir de informações prévias do processo em questão, modifica as informações do processo e, se necessário, seleciona um fluxo de processo para as melhores características de desenvolvimento sustentável (Figura 18).

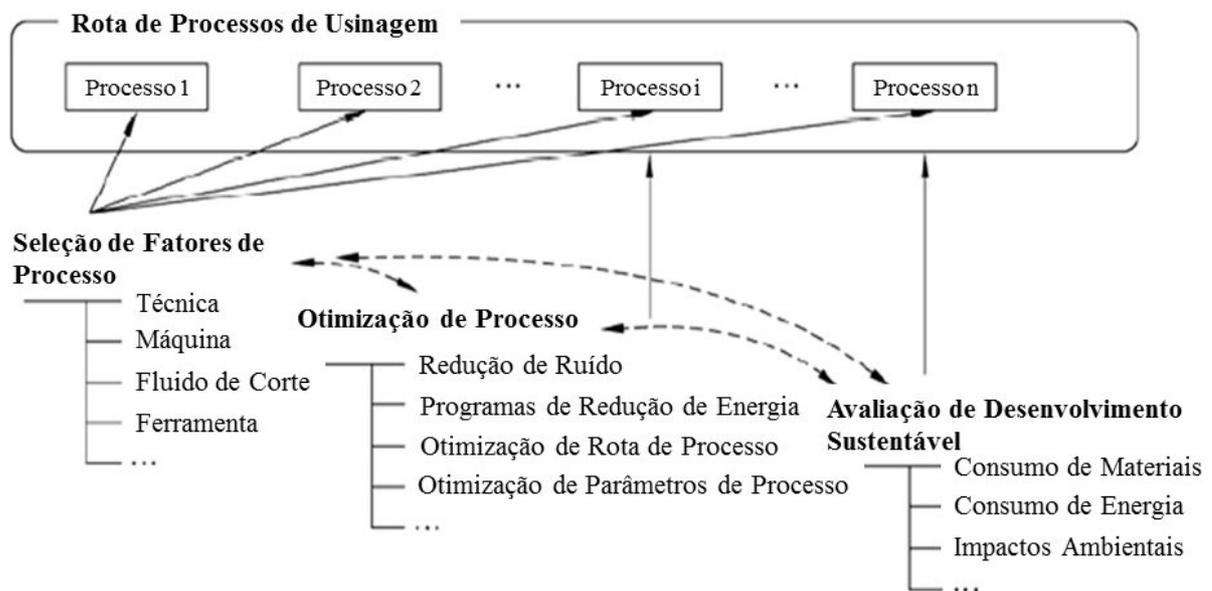


Figura 18 – Rota para melhorar os processos de empresas em termos de fabricação sustentável (XIANCHUN *et al.*, 2006).

De acordo com o modelo apresentado na Figura 18, a melhoria de um processo em termos de desenvolvimento sustentável deve passar pelas seguintes etapas: seleção de fatores de processo (técnica, máquina, etc), otimização do processo (redução do consumo de energia, nível de ruído, etc) e avaliação de desenvolvimento sustentável (em termos de consumo de energia e materiais, impactos ambientais, etc), tudo isso para todos os processos envolvidos na rota de usinagem.

No entanto, conforme os processos de usinagem começam a se preocupar em sua aplicação com os princípios de sustentabilidade, medições precisam ser definidas, a fim de determinar o nível de sustentabilidade relativo. Pusavec *et al.* (2010) avaliaram e compararam

diferentes estratégias, levando em consideração diversos parâmetros econômicos, sociais e ambientais, concluindo que, embora o custo inicial e esforços envolvidos com alternativas sustentáveis de usinagem serem maiores (neste caso, comparando usinagem com fluido em abundância, com crio-usinagem e usinagem assistida por jato de alta pressão), eles podem oferecer benefícios de sustentabilidade significativa como ciclos de produção mais curtos e menor custo necessário pós fabricação.

Um outro modelo híbrido, proposto por Zhi-Gang, Hua e Ming (2008), apresenta uma análise de entradas e saídas para uma operação de usinagem, popularizada pela primeira vez por Wassily Leontief, Prêmio Nobel em 1973 (FINNVEDEN, 2009). Nesse modelo, Zhi-Gang, Hua e Ming (2008) agregam o consumo de recursos no nível de processo aos impactos ambientais, de modo a formar um modelo combinado que permite a identificação de oportunidades de redução de impactos ambientais por meio de análise de consumo de recursos. A estrutura esquemática representativa está mostrada na Figura 19.



Figura 19 – Modelo de Entrada-Processo-Saída para processos de usinagem (adaptado de ZHI-GANG, HUA e MING, 2008 e DEIF, 2011).

Deif (2011) salienta ainda que diversos desperdícios podem ser reduzidos, controlados, eliminados, ou ainda prevenidos, ganhando em importância do primeiro ao último, o que tende a tornar o processo ecologicamente e também financeiramente eficiente, já que produzir o mesmo produto com menos recursos é uma excelente estratégia para se fazer dinheiro, além de se trazer geralmente como consequência também um ganho em qualidade e também de marketing.

Os autores Zhi-Gang, Hua e Ming (2008), desenvolveram também a Equação 1 para o modelo apresentado na Figura 17, onde X são as entradas, I é a matriz identidade, A são as substâncias que não sofrem mudança após o processo, B são as novas substâncias formadas e Y as saídas.

$$X = (I - A)^{-1}BY \quad (1)$$

Apesar de ser um método muito interessante para identificar os elementos envolvidos num processo de usinagem, observa-se que esse tipo de modelo carece de significância dos resultados, uma vez que, tal como sugerido por Capra (2009), para uma análise sistêmica completa, além das três perspectivas de análise convencional (material, processo e forma)] é necessário considerar também uma quarta dimensão, a do significado (associada com valores humanos).

Quantificando em termos de sustentabilidade os resultados que poderiam ser obtidos, por exemplo, por um modelo de entradas e saídas, um modelo híbrido foi adaptado à ideia mostrada na Figura 11 no nível do processo de usinagem. Nesse modelo, mostrado na Figura 20, os autores (WANIGARATHNE *et al.* (2004) apud JAYAL *et al.* (2010) levam em consideração para o ranqueamento fatores econômicos (custo de usinagem), ambientais (impactos ambientais, consumo de energia e gestão de resíduos) e sociais (segurança operacional e saúde pessoal).

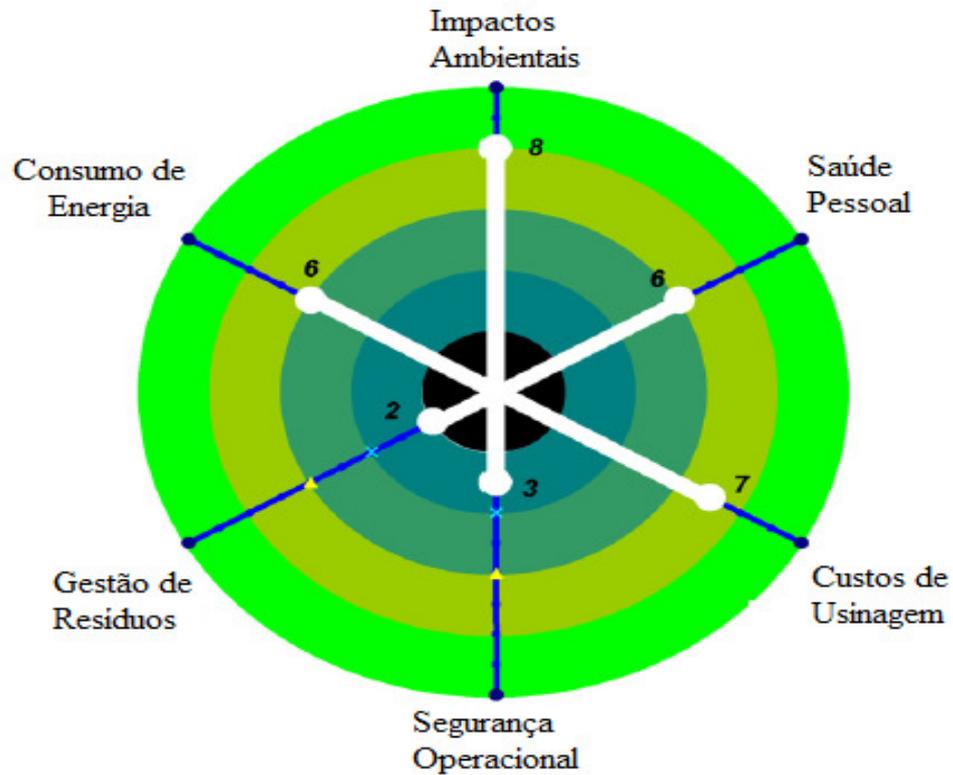


Figura 20 – Sistema de ranqueamento de sustentabilidade dos seis elementos (WANIGARATHNE *et al.* (2004) apud JAYAL *et al.* (2010)).

Granados, Jawahir e Fernandez (2009) desenvolveram ainda, como uma primeira aproximação, a pontuação geral de sustentabilidade para um processo de usinagem, construída como uma função combinada determinística (custo de usinagem, gestão de resíduos e consumo de energia) e não-determinística (impacto ambiental, segurança no trabalho, saúde pessoal) de elementos de sustentabilidade. A Equação 2 apresenta esse modelo.

$$S = C_{SHE} \cdot S_{SHE} + C_{Op} \cdot S_{Op} \quad (2)$$

Nessa equação, S_{SHE} representa o índice de sustentabilidade para segurança, saúde e meio ambiente, S_{Op} representa a sustentabilidade operacional do processo baseada no custo de usinagem, consumo de energia e gerenciamento de resíduos, e C_{SHE} e C_{Op} são fatores de ponderação relevantes. O que representa um desafio nesse modelo é que, enquanto o segundo grupo pode ser modelado utilizando técnicas analíticas e numéricas em razão de sua natureza relativamente

determinística, o primeiro grupo requer meios não-deterministas, tais como a lógica fuzzy (JAWAHIR e JAYAL, 2011).

Pelo ponto de vista de tecnologias de produção, Pusavec, Krajnik e Kopac (2010) apontam como formas de melhorar o desempenho de sustentabilidade, reduzir o consumo de energia de processos de usinagem, minimizar o desperdício (gerar menos resíduos e aumentar a reutilização ou reciclagem de resíduos), utilizar os recursos de forma eficiente, utilizar materiais recicláveis ou reutilização de componentes de máquinas-ferramentas, melhorar a gestão dos fluidos, cavacos, óleos lubrificantes e óleos hidráulicos (melhorando a performance ambiental, de saúde e de segurança), e adotar métodos de avaliação do ciclo de vida.

Sendo assim, conforme a literatura pode sugerir, diversos modelos já se encontram disponíveis para serem aplicados para quantificação de processos de usinagem, para se otimizar um ou mais fatores. No entanto, ainda não se verifica uma padronização quanto a pesos e ponderações das análises, o que se acredita ser possível atingir aplicando ferramentas de avaliação de ciclos de vida, já disponíveis, porém mais utilizadas ao nível de produtos, também ao nível de processos.

2.7 Consumo de Energia de processos de usinagem

O constante aumento na demanda de energia mundial, devido a sua escassez, restrições quanto a emissões de carbono inclusive com legislações regulamentadoras, além das implicações sociais de sua produção, vem trazendo a questão de economia de energia para dentro das indústrias manufatureiras (YAN e LI, 2013; ABELE, BRAUN E SCHRAML, 2015). Em particular, máquinas-ferramenta de corte utilizadas nos processos de fabricação consomem significativamente mais energia em comparação com outros tipos de máquinas-ferramenta, tais como lasers ou máquinas de solda (FRAUNHOFER, 2012).

A demanda de energia de uma máquina ferramenta pode ser classificada em três categorias: constante (equipamentos auxiliares que consomem energia a uma taxa especificada independente do processo), variáveis (consumida pelos componentes da máquinas-ferramenta controlados pelo operador) e de corte (determinada pelo tipo de material, taxa de remoção de material e ferramenta de corte). A Figura 21 mostra o consumo de potência em função do carregamento da máquina para as três categorias, mostrando que um incremento no

carregamento causa um incremento na potência de corte, mantendo constante latência de tara (composta pela potência constante mais a variável).

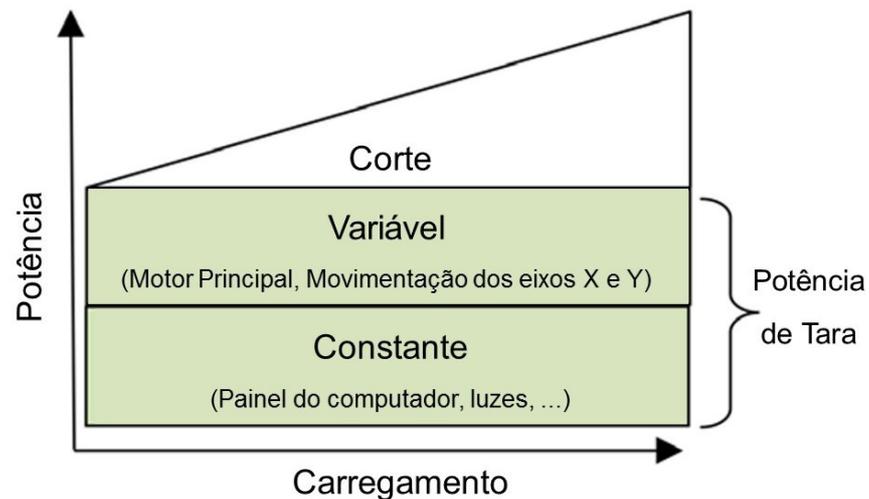


Figura 21 - Consumo de potência em função do carregamento da máquina para as três categorias: constante, variável e de corte (adaptado de DAHMUS e GUTOWSKI, 2004).

Além da implementação de alterações de projeto das máquinas-ferramenta, o consumo de energia durante o uso pode ser reduzido através da seleção de parâmetros de processo otimizados (DIAZ *et al.*, 2010). Pesquisas indicam que o acompanhamento e a avaliação do consumo de energia são abordagens básicas que podem ser utilizadas para realizar economia de energia (YOON *et al.*, 2014).

Uma forma de prever o consumo específico de energia, é através da taxa de remoção de cavaco e do volume de cavaco removido, como pode ser verificado na Figura 22, obtida por Diaz *et al.* (2012), específica para uma máquina ferramenta Mori Seiki NVD1500 usinando aço AISI 1018, mas que pode ser adaptada para outras aplicações alterando as constantes k e b da Equação 3. Para esses ensaios foram utilizadas três diferentes ferramentas de aço rápido em termos de número de arestas (dois e quatro) e acabamento superficial (Tin ou sem cobertura), ambas com diâmetro da fresa de 8 mm, variando-se o avanço de 170 até 860 mm/min e a rotação de 3361 até 7060 rpm.

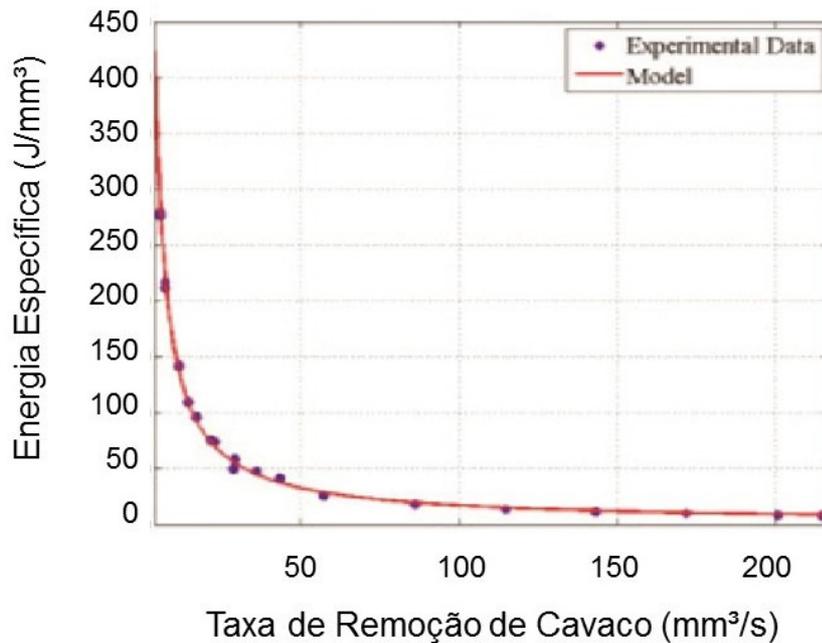


Figura 22 – Modelo da energia específica para o centro de usinagem Mori Seiki NV1500 usando aço AISI 1018 (adaptado de DIAZ et al., 2012).

A Equação 3 define a curva gerada na Figura 22, onde E é a energia elétrica consumida (kJ), MRR (do inglês Material Removal Rate) é a taxa de remoção de material (mm^3/s), V é o volume de material removido (mm^3) e b e k são constantes específicas de cada aplicação, sendo que a constante k , tem essencialmente unidade de potência (kW) e b representa a energia específica do estado estacionário (kJ).

$$E = \left(\frac{k}{MRR} + b \right) \cdot V \quad (3)$$

Yoon *et al.* (2014), dividiram os elementos de energia de uma máquina de fresamento utilizada para o corte para modelar a potência adicional de remoção de material causada pela carga de corte com respeito a vários parâmetros do processo. A Figura 23 apresenta a divisão de energia para uma condição específica de corte (rotação do eixo: 12.000 rpm; velocidade de avanço: 12,9 mm/s; profundidade de corte: 1 mm).

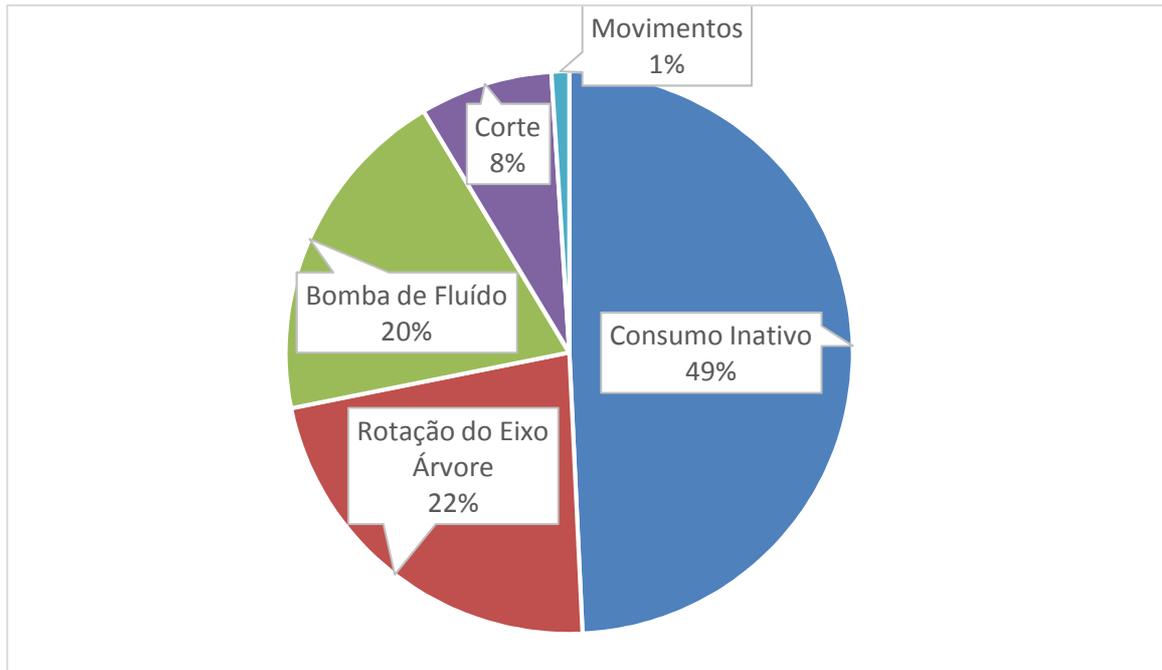


Figura 23 – Distribuição de energia da máquinas-ferramenta para as condições de usinagem de referência (adaptado de YOON *et al.*, 2014).

Os mesmos autores investigaram a influência dos parâmetros de corte rotação e avanço para o corte em vazio (cortando ar), verificando que o aumento da rotação provocou aumento da potência consumida, já o aumento do avanço não alterou o consumo de potência. Já a investigação em relação ao desgaste de ferramenta, mostrou que o mesmo aumenta a potência consumida proporcionalmente de forma linear.

Diaz *et al.* (2010), apresentam uma visão geral das estratégias de projeto e operação para reduzir o consumo de energia, incluindo a implementação de um sistema de recuperação de energia cinética em um centro de usinagem Mori Seiki NV1500DCG, obtendo uma redução da potência de 5 a 25% em relação à mesma máquina sem o sistema. No mesmo trabalho, são comparadas diferentes estratégias de faceamento de uma peça em termos de consumo de energia e tempo, estando os resultados apresentados na Figura 24.

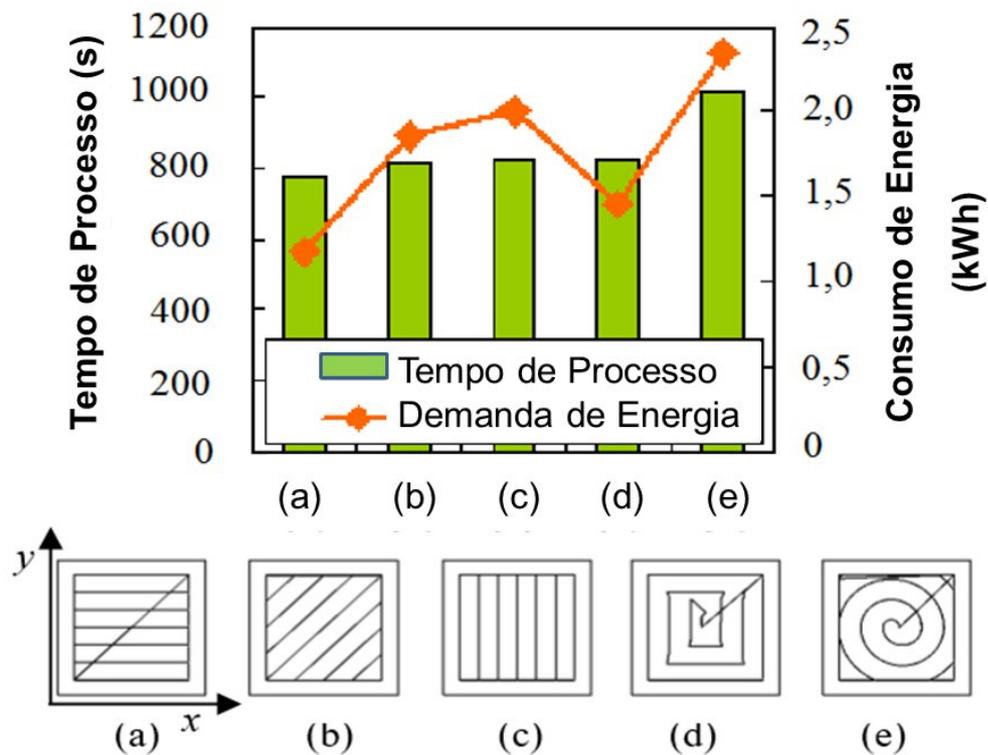


Figura 24 – Tempo de processo e consumo de energia para cinco diferentes estratégias de corte (adaptado de DIAZ *et al.*, 2010).

Como pode ser verificado na Figura 24, com exceção da estratégia de usinagem “e” que demandou um tempo de processo maior, as outras quatro estratégias tiveram tempo de processo bastante próximos, consumindo, no entanto, diferentes valores de energia.

Por fim, é salientado ainda que para que uma análise seja considerada completamente sustentável, é necessário considerar todo o ciclo de vida dos produtos, não só apenas na fase de manufatura, o que pode ser demonstrado no estudo de Helu *et al.* (2011a), em que a melhoria da precisão superficial obtida na fabricação de engrenagens do sistema de transmissão automotivo, conseguido graças a um aumento do consumo de energia na fase de fabricação, proporcionou uma redução substancial dos impactos ao longo de todo o ciclo de vida de um automóvel devido à economia de combustível conseguida pelo aumento de eficiência do mesmo, além de aumentar o tempo de vida do componente.

2.8 Ruídos de Processos de Usinagem

Uma primeira diferenciação é feita em relação a som e ruído, sendo o primeiro definido pela sua energia mecânica e medido em unidades de energia relacionada. A pressão do som proporcional ao quadrado da intensidade do som (W/m^2) é expressa em unidade Pascal (Pa). Portanto o nível de pressão do som é expresso em unidade de decibel (dB) em uma escala logarítmica, em razão de sua ampla região de abrangência. Já ruído geralmente é definido como um tipo de som ou conjunto de sons que são indesejáveis, sendo portanto um fenômeno acústico audível que pode afetar negativamente as pessoas (CUNHA E RESENDE, 2012).

O ruído industrial e as doenças ocupacionais dele decorrentes constituem um objeto de estudo de grande relevância no âmbito internacional, por conta das indenizações trabalhistas, da redução da produtividade no trabalho e dos tratamentos médicos correlatos a tais doenças. Estes fatores contribuem, anualmente, em bilhões de dólares para a diminuição do produto interno bruto de muitos países (DE MELLO JUNIOR, 1998).

A exposição ao excesso de ruído pode provocar diferentes sintomas nos trabalhadores, que podem ser de ordem auditiva, como zumbido (sintoma mais frequente), a perda auditiva e as dificuldades na compreensão da fala, e/ou extra auditiva, como alterações do sono e os transtornos da comunicação, os problemas neurológicos, digestivos, comportamentais, cardiovasculares e hormonais, dependendo das características do risco, da exposição e do indivíduo, conforme discutido por Ávila (2007).

No Brasil, os limites de tolerância para ruídos estão estipulados pela norma regulamentadora 15 (NR15, 2014), baseada nos artigos 189 e 192 da Consolidação das Leis Trabalhistas – CLT, que trata de atividades e operações insalubres. A norma trata especificamente sobre ruídos nos anexos I (ruído contínuo ou intermitente) e II (ruído de impacto, que são aqueles cujos picos de energia duram até um segundo, a intervalos maiores que um segundo).

Ainda segundo a norma, os níveis de ruído devem ser medidos em decibéis (dB), com instrumento de nível de pressão sonora posicionado próximo ao ouvido do trabalhador, sendo que para ruídos contínuos e intermitentes, o aparelho deve ser ajustado no circuito de resposta lenta (slow) com ponderação em A (que é o tipo de filtragem do som antes do cálculo da média, que aproxima a sensação auditiva correspondente a curva isofônica de 40 fones, desenfazando baixas frequências). A Tabela 1 apresenta os tempos limites de exposição para cada nível sonoro.

Tabela 1 - Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente (NR15, 2014).

NÍVEL DE RUÍDO dB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Como pode ser verificado na Tabela 1, o nível de ruído máximo que uma pessoa pode estar exposta durante uma jornada de trabalho de 8 horas sem a necessidade de protetores auriculares é de 85 db. Níveis de ruído até 115 db são permitidos, desde que o tempo de exposição seja menor.

Girardi e Sellitto (2011), realizaram a medição e reconhecimento do ruído no setor de usinagem de uma indústria moveleira, obtendo valores de pressão sonora de 83,3 db em um centro de usinagem CNC, até 95,0 db em uma plaina de grossura. Em outro estudo, Cunha e Resende, 2012, verificaram o ruído de sete máquinas e equipamentos presente em uma oficina mecânica de processos de fabricação de pequeno porte, obtendo valores de 78 db em um torno, até 98 db para o equipamento de ar comprimido, havendo assim uma necessidade de uso de protetor auricular.

A ABNT NBR ISO 14040 também indicou a necessidade de introduzir o fator ruído para um estudo completo de avaliação de ciclo de vida, já que a maioria dos inventários de ciclo de vida normalmente não contêm dados sobre as emissões de ruído e os fatores de caracterização ainda estão claramente definidos.

Cucurachi, Heijungs e Ohlau (2012), revisaram brevemente o que já está disponível no campo, verificando tentativas disponíveis na literatura focadas na integração de ruído de

transporte na avaliação de ciclo de vida, mas não para as várias outras fontes de ruído, como a industrial, propondo assim um quadro para a consideração dos impactos de qualquer tipo de ruído na saúde humana, fornecendo indicações para a introdução de ruído no inventário de ciclos de vida.

Posteriormente, com base em padrões de propagação de ruído e relatórios internacionais sobre acústica e impactos de ruído, Cucurachi e Heijungs (2014), desenvolveram fatores de caracterização para permitir a quantificação dos impactos de ruído na saúde humana a nível europeu, argumentando que o quadro proposto e utilizado para os cálculos é flexível o suficiente para ser expandido para contabilizar os impactos de outras aplicações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados todas as máquinas, equipamentos, materiais e programas utilizados, assim como o planejamento experimental e os procedimentos adotados ao longo do trabalho. Esses detalhes são importantes para facilitar a compreensão dos métodos utilizados e possibilitar uma correta aplicação das técnicas empregadas, seja em meio acadêmico ou industrial e, ainda, garantir a confiança dos resultados obtidos. Os experimentos deste trabalho foram realizados no Laboratório para Manufatura e Sustentabilidade (LMAS) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade da Califórnia em Berkeley.

3.1 Máquinas e Ferramentas

Para a preparação dos corpos de prova, foram utilizadas uma fresadora ferramenteira vertical para esquadrear as peças, uma serra de fita horizontal para cortar os blocos, uma lixadeira de bancada vertical para remover as rebarbas e dois centros de usinagem CNC, um Mori Seiki NVD1500 DCG de potência 7,5 HP com 40.000 rpm de rotação máxima e área de 1,935 m x 0,85 m indicado para micro usinagem e outro Haas VF0B de 20 HP com 7.500 rpm e área de 2,235 m x 2,362 m, indicado para usinagem convencional.

As ferramentas utilizadas nos centros de usinagem foram fresa de topo esférica inteiriça de metal duro, diâmetro de 4,76 mm, com quatro arestas, ângulo de hélice de 30° e cobertura de TiN, fresa de topo esférica inteiriça de aço rápido, diâmetro de 4,76 mm, com duas arestas, ângulo de hélice de 30° e sem cobertura, broca de centro de aço rápido #4, broca inteiriça de aço rápido com cobalto (classe M42), diâmetro de 4,76 mm, ângulo de ponta de 135° e cobertura de TiN e broca inteiriça de aço rápido convencional, diâmetro de 4,76 mm, ângulo de ponta de 135° e cobertura oxidada preta.

3.2 Materiais

Os materiais usinados foram o aço AISI P20, tratado termicamente com uma dureza de 30 HRC, e o aço AISI H13, recozido com uma dureza de 235 HBW, materiais muito utilizados para fabricação de moldes e matrizes, mais especificamente para trabalhos a quente como moldes plásticos, aplicação em que processos de usinagem podem consumir até 80% dos recursos totais para a produção da peça (VILLARES METALS, 2015). A composição química indicada pelo fabricante está mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química dos materiais utilizados (adaptado de Hudson toolsteel, 2016).

Material	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI P20	0,33	0,80	0,65	1,75	0,40	-
AISI H13	0,40	0,40	1,00	5,25	1,35	1,00

Os materiais foram adquiridos em barras retangulares com as dimensões de 15,9 mm (+ 0,7 até 2,0 mm) x 28,6 mm (+ 3,2 até 4,8 mm) x 158,8 mm (+ 3,2 até 4,8 mm) e preparados para serem usinados nos centros de usinagem com as dimensões de 15,9 mm x 28,6 mm x 28,6 mm. A Figura 25 apresenta o desenho completo da peça final usinada no centro de usinagem.

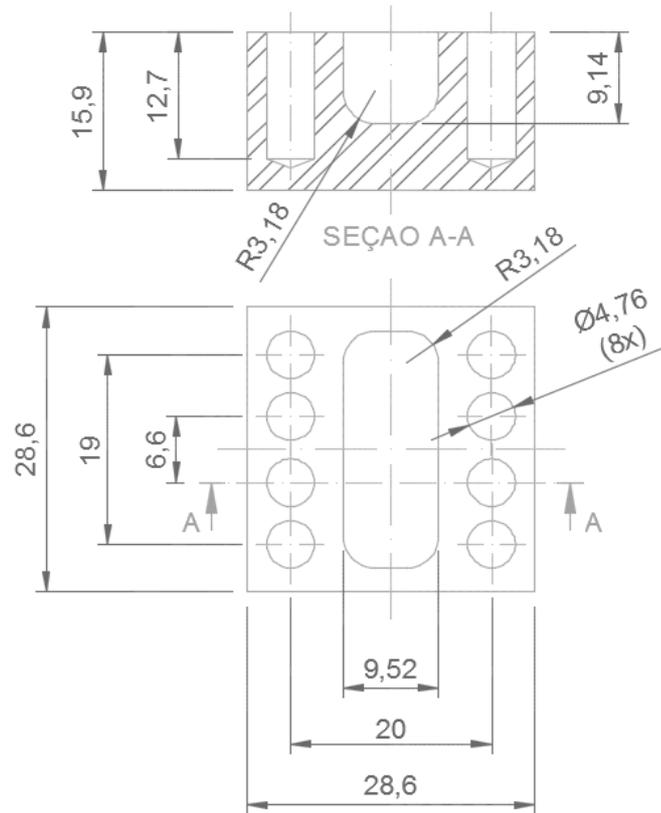


Figura 25 – Peça final com detalhes usinados no centro de usinagem.

3.3 Equipamentos e Programas

Para medir a potência consumida pelos centros de usinagem, um medidor de energia Sistem Insights HSV03L2021 foi usado na máquina para microfresamento e um medidor de energia Yokogawa CW240 na máquina de fresamento convencional, ambos com a mesma calibração.

Para medir o nível sonoro foi utilizado um sonômetro digital modelo WS1361C, com faixa de medida de 30 db à 130 db com ponderamento em A, sendo o mesmo posicionado sempre próximo ao ouvido do operador do equipamento utilizado.

Para medir a vibração, foi utilizado um acelerômetro General modelo VB10 com taxa de aquisição de 10Hz e aquisição em três eixos, posicionado na carcaça da máquina, no lado externo.

Para a avaliação do ciclo de vida, o programa comercial GABi 6 (GABI, 2016) e a base de dados Ecoinvent (ECOINVENT, 2016) foram utilizados, sendo que nenhuma extensão ou base de dados auxiliar foi utilizada.

Para geração dos códigos CNC, o programa comercial Esprit versão 2014 (ESPRITCAM, 2016) foi utilizado.

3.4 Planejamento Experimental

A primeira fase dos ensaios consistiu na preparação dos corpos de prova para serem usinados posteriormente nos centros de usinagem. Para isso, as barras brutas nas dimensões de 15,9 mm x 28,6 mm x 158,7 mm, com tolerância de sobremetal de até 4,8 mm foram esquadrejadas em uma fresadora ferramenteira utilizando uma fresa de topo de Ø25,4 mm, removendo o sobremetal.

A segunda operação, realizada ainda visando a preparação dos corpos de prova, foi o serramento de seccionamento em uma serra de fita horizontal, nas dimensões de 15,9 mm x 28,6 mm x 28,6 mm.

Posteriormente, uma lixadeira vertical de bancada foi utilizada para remoção das rebarbas remanescentes dos processos anteriores.

Por fim, o bloco foi usinado no centro de usinagem com as medidas finais indicadas na Figura 25. O fluxograma completo das operações está mostrado na Figura 26.

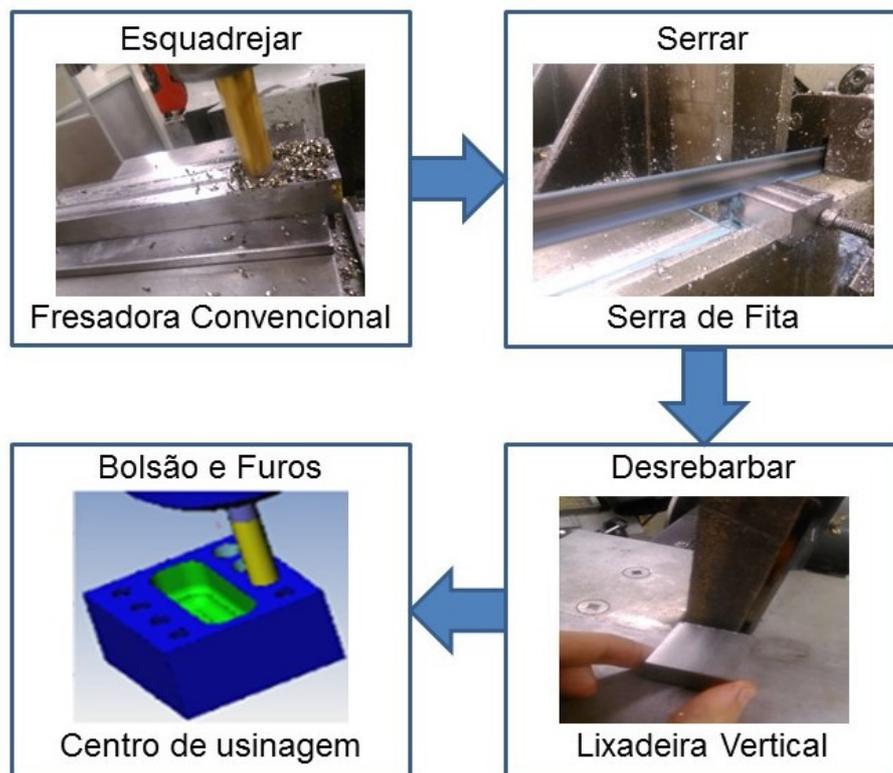


Figura 26 – Fluxograma das operações realizadas e máquinas utilizadas.

O nível sonoro de todas as operações de preparação dos corpos de prova, assim como da usinagem nos centros de usinagem foram medidos, além do aspirador de pó industrial utilizado para limpeza dos cavacos após o uso da fresadora ferramenta, por ser um procedimento do laboratório de usinagem, e da pistola de ar comprimido, por ser um procedimento utilizado para limpeza do fluido de corte da peça final usinada no centro de usinagem.

Para as operações realizadas no centro de usinagem (abertura de bolsão e furação), diversas estratégias foram comparadas em termos de consumo de energia, três diferentes velocidades de corte e dois diferentes avanços para a fresa de metal duro e a broca de aço rápido reforçado com cobalto, dois diferentes tipos de ferramentas, dois diferentes tipos de máquinas (sendo que para o centro de usinagem convencional, apenas uma velocidade foi testada devido a limitação tecnológica da mesma), e dois diferentes materiais, estando todos os ensaios detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaios realizados e parâmetros utilizados.

Teste	Fresamento		Furação		Máquina	Ferramentas Fresa / Broca	Material
	vc(m/min)	fz (mm/fl)	vc(m/min)	fn (mm/rot)			
1	90	0,018	18	0,055	Microusinagem	Metal duro / Co	P20
2	120	0,018	24	0,055	Microusinagem	Metal duro / Co	P20
3	120	0,022	24	0,065	Microusinagem	Metal duro / Co	P20
4	150	0,018	30	0,055	Microusinagem	Metal duro / Co	P20
5	150	0,022	30	0,065	Microusinagem	Metal duro / Co	P20
6	90	0,018	18	0,055	Convencional	Metal duro / Co	P20
7*	20	0,022	13	0,08	Microusinagem	Aço Rápido	P20
8*	20	0,018	13	0,08	Microusinagem	Aço Rápido	P20
9*	22	0,016	13	0,08	Microusinagem	Aço Rápido	P20
10	22	0,012	13	0,08	Microusinagem	Aço Rápido	P20
11	90	0,018	18	0,055	Microusinagem	Metal duro / Co	H13
12	120	0,018	24	0,055	Microusinagem	Metal duro / Co	H13
13	120	0,022	24	0,065	Microusinagem	Metal duro / Co	H13
14	150	0,018	30	0,055	Microusinagem	Metal duro / Co	H13
15	150	0,022	30	0,065	Microusinagem	Metal duro / Co	H13
16	90	0,018	18	0,055	Convencional	Metal duro / Co	H13
17	22	0,012	13	0,08	Microusinagem	Aço Rápido	H13

* = Ocorreu a quebra da ferramenta fresa antes de usinar quatro peças

Para a operação de fresamento, a profundidade de usinagem de 1,6mm, a entrada em rampa com ângulo de 10° e a estratégia de corte concordante foram mantidos constantes para todos os ensaios. Já para a operação de furação, a estratégia de furação “pica pau” com um incremento de avanço de 4,76 mm foi mantida constante. Todos os ensaios foram realizados quatro vezes para validação, utilizando a mesma ferramenta.

Para a operação de furação, foi realizado anteriormente uma operação de furo de centro, utilizando uma broca de centro #4 com rotação de 1600 rpm, avanço de 0,02 mm/rot e profundidade de usinagem de 3 mm incluindo a ponta da broca.

Para a quantificação dos impactos ambientais totais gerados no processo, uma avaliação do ciclo de vida foi realizada com o auxílio do programa comercial Gabi 6, utilizando a base de dados Ecoinvent e o método de caracterização CML2001, onde foram considerados todos os fatores de impactos disponíveis no programa, sendo que nenhuma extensão do banco de dados ou programa auxiliar foi utilizado.

Através dos resultados obtidos com o uso do programa, as diferentes estratégias de usinagem foram comparadas em termos de impactos ambientais, assim como cada entrada do processo pode ser quantificada. Para proporcionar uma melhor visualização, gráficos de área de

impacto foram construídos, sendo que para isso, ao maior valor de impacto de cada categoria foi atribuído o valor 1,0, e para os outros valores percentuais relativos.

Para uma maior precisão da análise, valores reais de consumo de energia foram integrados ao modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão tratados os resultados obtidos. Para facilitar a organização e a compreensão, os resultados serão divididos em três seções: 1 – Ruído dos processos de usinagem, 2 – Otimização do consumo de energia na usinagem CNC, 3 – Avaliação do ciclo de vida para processos de usinagem.

4.1 Ruídos dos Processos de Usinagem

As Figuras 27 a 33 apresentam o desenvolvimento do nível de pressão sonora para a cadeia de usinagem analisada, compostas pelas operações de esquadrejamento por fresamento convencional em uma fresadora ferramenta, serramento, desrebarbamento por lixamento e fresamento e furação CNC, além dos ruídos gerados pelo aspirador industrial utilizado para limpeza dos cavacos no fresamento convencional e do revolver de ar comprimido utilizado para limpeza do fluido de corte na operação de fresamento CNC.

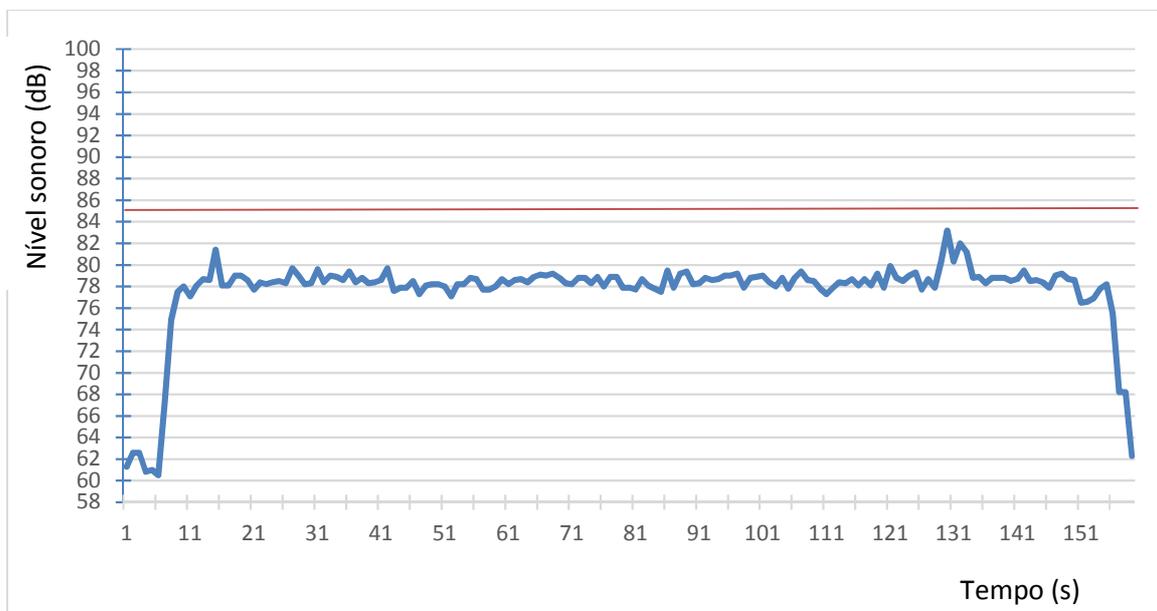


Figura 27 - Nível de pressão sonora para a operação de fresamento convencional.

Conforme pode ser verificado na Figura 27, em nenhum momento o nível sonoro no fresamento convencional ultrapassou 85 dB, que é o limite estipulado pela NR15 para que seja

necessário a utilização de protetores auriculares para uma exposição de oito horas. Em termos de nível sonoro médio, o valor ficou em 77,3 dB, levando em consideração cinco medições.

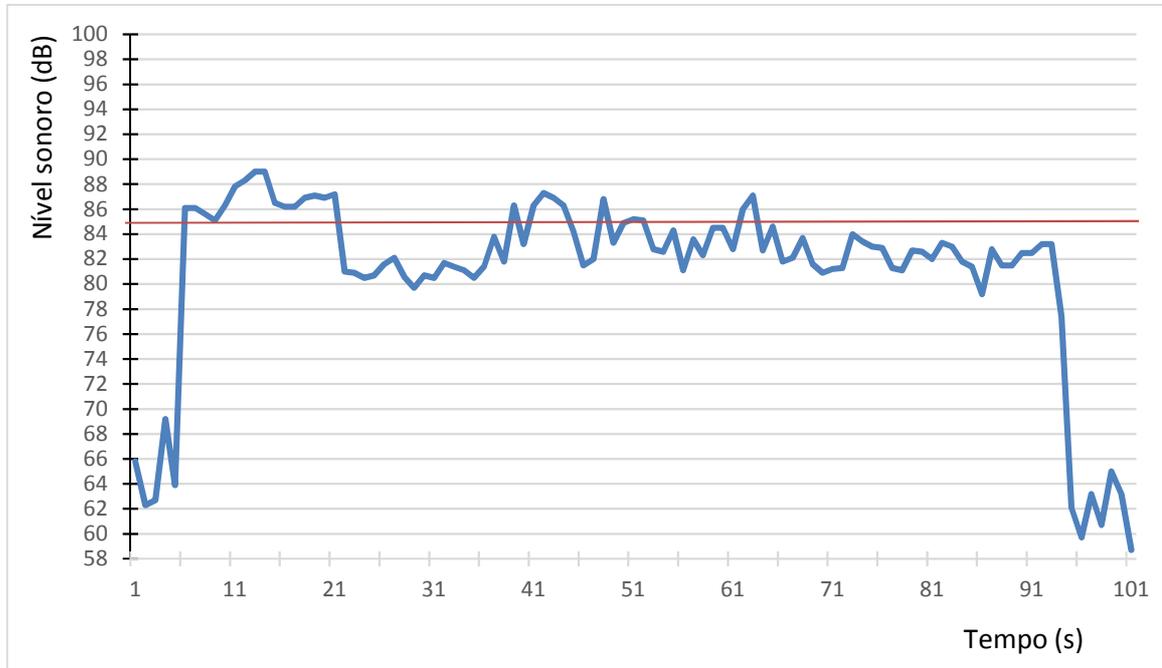


Figura 28 - Nível de pressão sonora para o aspirador industrial.

Com relação ao aspirador industrial (Figura 28), pode ser verificado que em diversos momentos o nível sonoro ultrapassa o limite de 85 dB, totalizando em média para todos os ensaios 19% do tempo, o que pode vir a exigir o uso de protetores auriculares em um ambiente onde diversos aspiradores são ligados constantemente, como é o caso da oficina onde os ensaios foram realizados. No entanto, quando analisado apenas um aspirador isoladamente, o valor médio fica em 81,8 dB, abaixo do limite estipulado. Fica ainda como sugestão para eliminação deste ruído, a utilização de vassouras e pinceis para realização da limpeza do local de trabalho ou ainda a utilização de esteiras transportadoras.

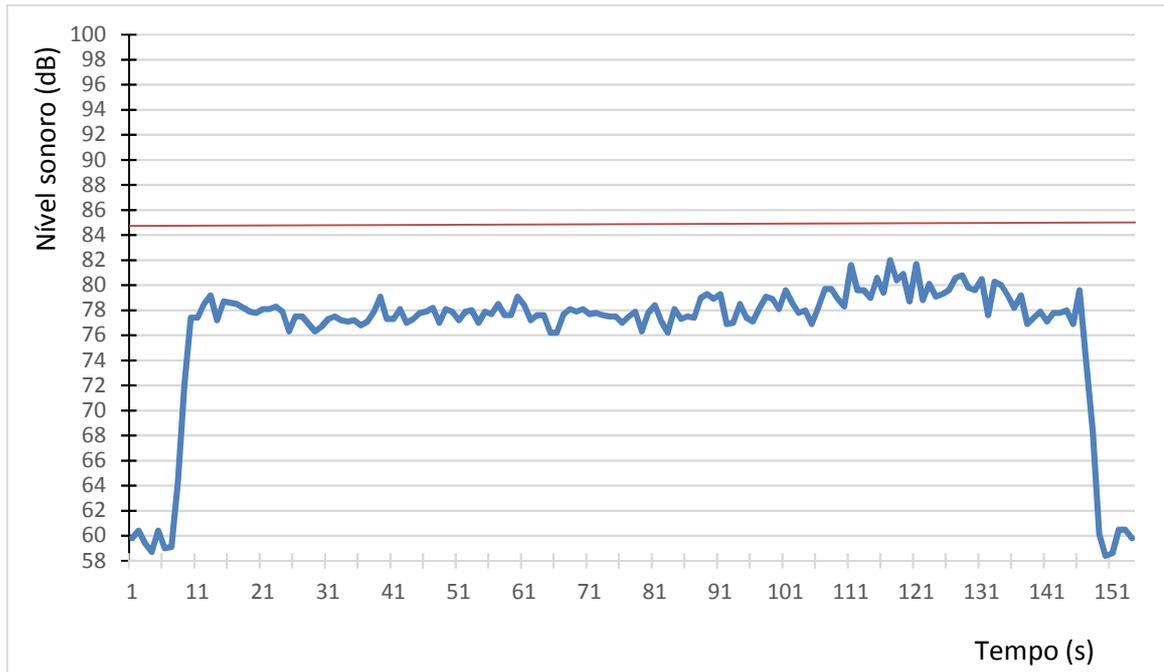


Figura 29 - Nível de pressão sonora para o serramento.

Com relação ao serramento (Figura 29), também em nenhum momento o nível sonoro ultrapassou 85 dB, sendo que o nível sonoro médio foi de 77,4 dB, não necessitando protetor auricular.

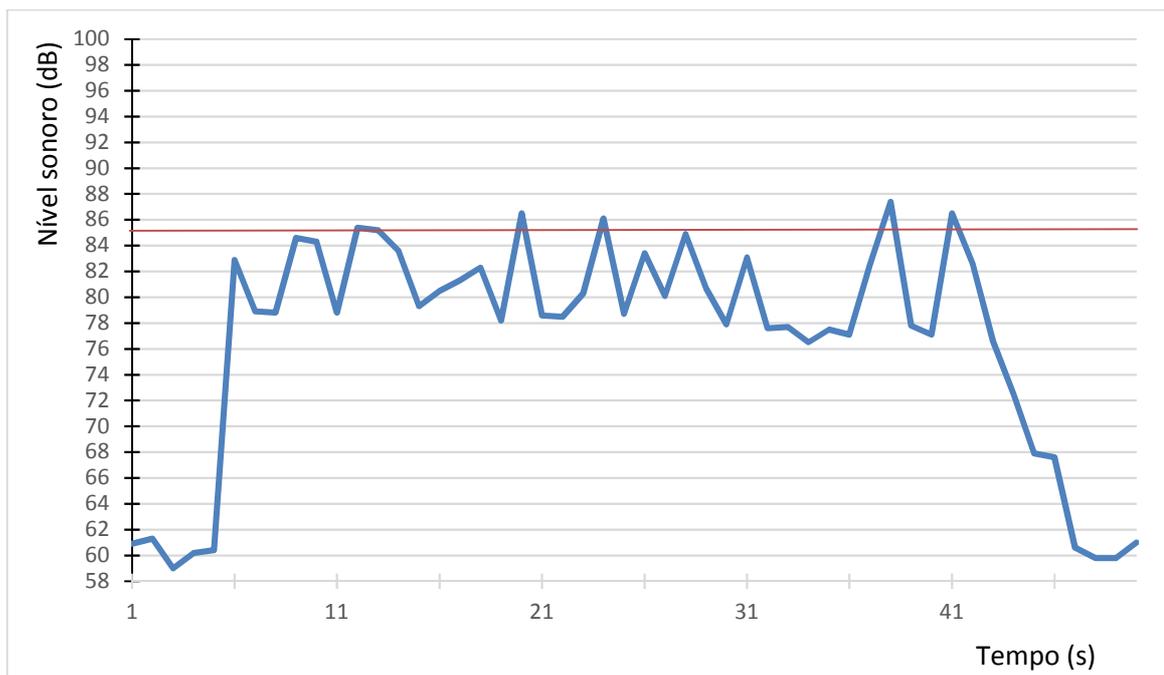


Figura 30 - Nível de pressão sonora para o lixamento.

Com relação ao lixamento (Figura 30), é verificado que ocorre uma flutuação mais acentuada entre os picos (momentos em que ocorrem o lixamento) e os vales (momento de mudança de aresta da peça), sendo que alguns pontos ultrapassam o limite de 85 dB (10% considerando todos os ensaios), mas ficando na média de 81 dB.

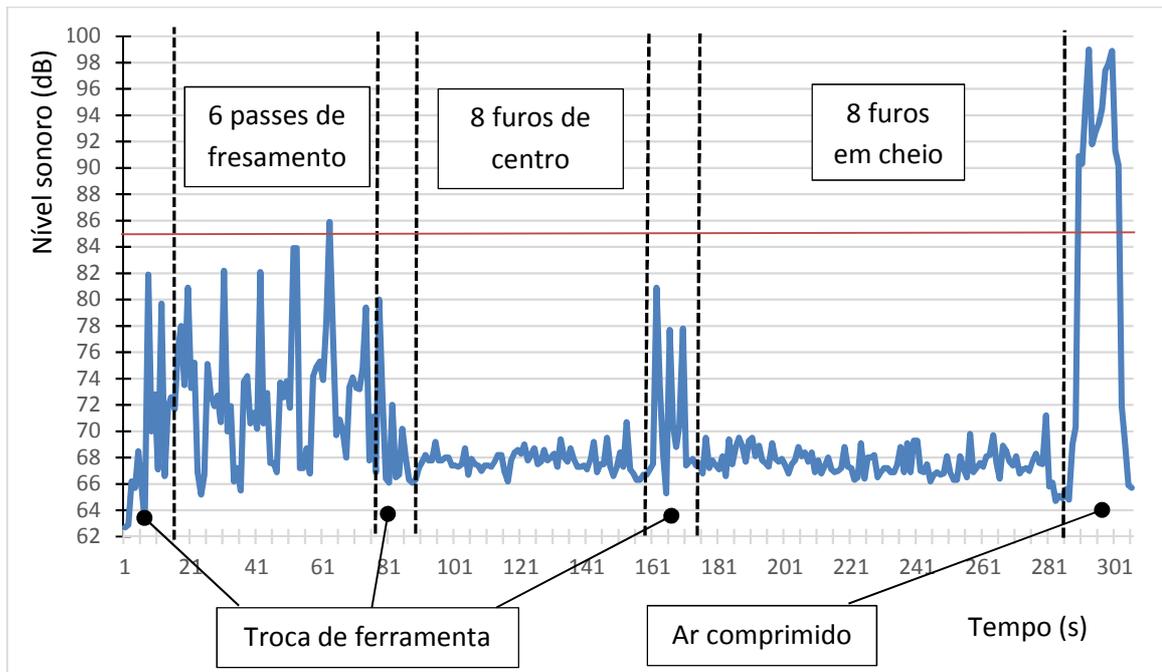


Figura 31 – Nível de pressão sonora para a usinagem CNC do teste 2.

Para a usinagem CNC (Figura 31), é observado que o nível sonoro sofre grandes flutuações, dependendo da operação que está sendo realizada, mas na média, o valor fica bem baixo, em 69,3 dB (sem considerar a limpeza com o ar comprimido), ou 70,4 dB caso seja considerado a limpeza com ar comprimido.

Ainda para a usinagem CNC, foi feita uma divisão por operação para verificar o nível sonoro de cada uma, conforme mostrado na Figura 32, verificando que a troca de ferramenta obteve um valor médio de 72,1 dB, o fresamento de 72,5 dB, a furação de centro de 67,5 dB, a furação em cheio de 67,6 dB, e 92,2 dB para o ar comprimido, sendo este o único equipamento que ultrapassou o limite de 85 dB, permitindo um tempo máximo de exposição sem a necessidade de utilização de protetor auricular de 2,9 horas (valor obtido por interpolação da Tabela 1).

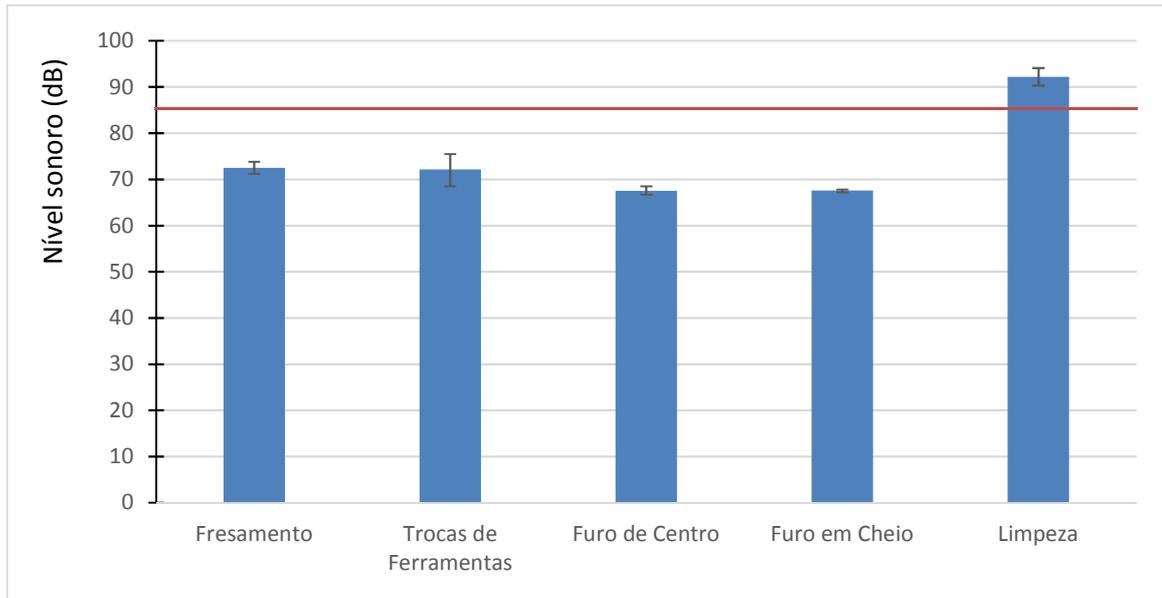


Figura 32 – Nível de pressão sonora para cada etapa da usinagem CNC.

Apesar de 2,9 horas ser um tempo relativamente alto considerando o ar comprimido, já que o mesmo é utilizado apenas em pequenos períodos no fim da usinagem para limpar o fluido de corte da peça, foi verificado que o alto nível sonoro era suficiente para causar um incômodo em um dos operadores, que adotou como procedimento comprimir apenas metade do gatilho da pistola de ar comprimido, o que reduzia o nível sonoro para 78 dB promovendo uma limpeza satisfatória da mesma forma. Vale ainda ressaltar que abafadores de ar comprimido já se encontram disponíveis no mercado para essa utilidade além da opção de se reduzir a pressão de linha.

Foi analisada também a variação do nível sonoro em relação as diferentes estratégias de usinagem testadas, não sendo possível, no entanto, observar variações significativas, com exceção ao fresamento utilizando a ferramenta de aço rápido (Figura 33) que proporcionou uma diferença maior, com um nível sonoro médio de 67,6 dB, o que pode ser explicado pelas velocidades bem menores utilizadas.

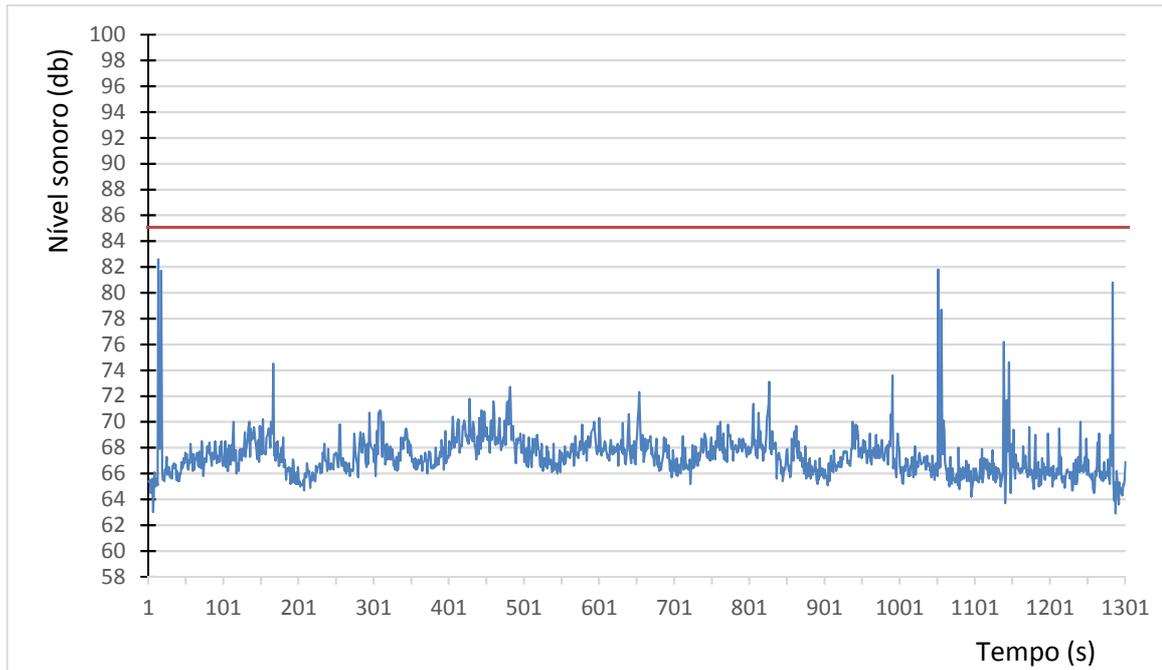


Figura 33 – Nível de pressão sonora na usinagem CNC utilizando uma fresa de aço rápido.

Para uma melhor compreensão das fontes geradoras dos ruídos na usinagem CNC, foi também medido a vibração da máquina CNC, gerando-se a Figura 34, onde pode ser verificado que as regiões de maior geração de ruídos (com exceção do ar comprimido, que não contribui com a vibração na máquina), são também as que geram maior vibração (fretamento e trocas de ferramenta), o que nos sugere que uma forma de reduzir ruídos da usinagem é aumentando a rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivos, ou ainda reduzindo o uso do ar comprimido, utilizado também para a troca de ferramentas.

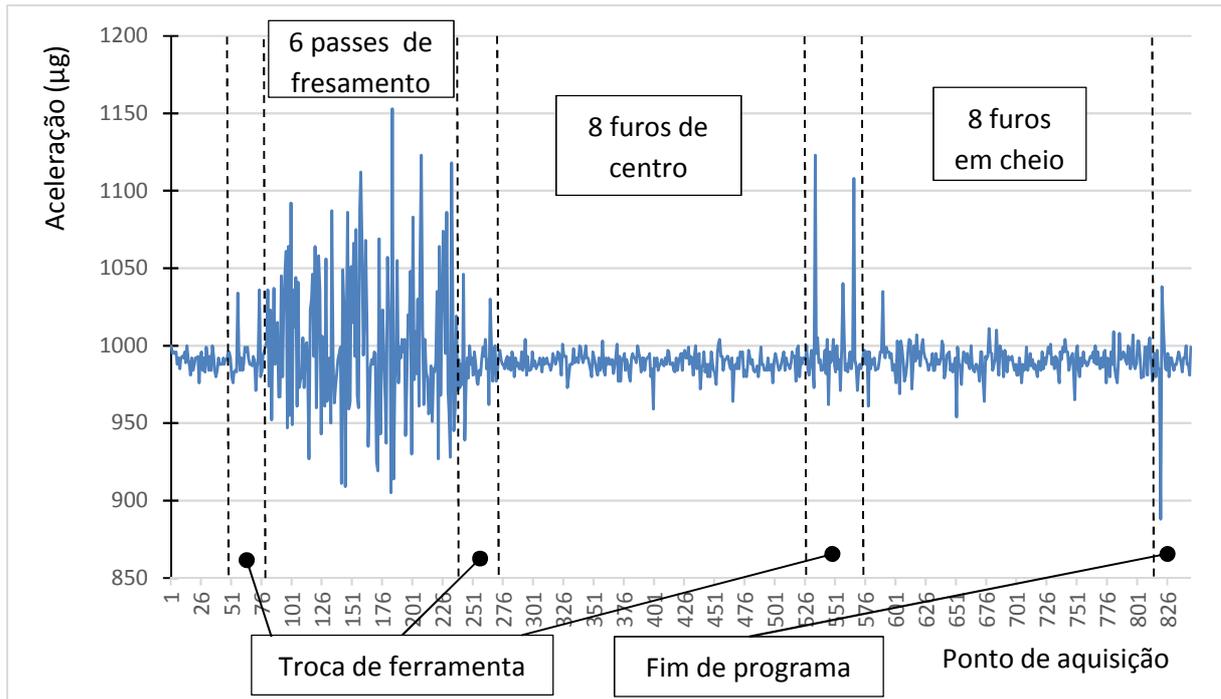


Figura 34 - Vibração gerada pela máquina-ferramenta em uma usinagem CNC.

4.2 Otimização do Consumo de Energia na Usinagem CNC

Com a intenção de se otimizar o consumo de energia para o processo de usinagem CNC, diversas condições de usinagem foram comparadas, como três diferentes velocidades de corte, dois diferentes avanços, ferramentas de metal duro com aço rápido e a máquina de centro de usinagem convencional com o centro de usinagem para microusinagem, gerando-se gráficos de consumo de potência conforme o da Figura 35.

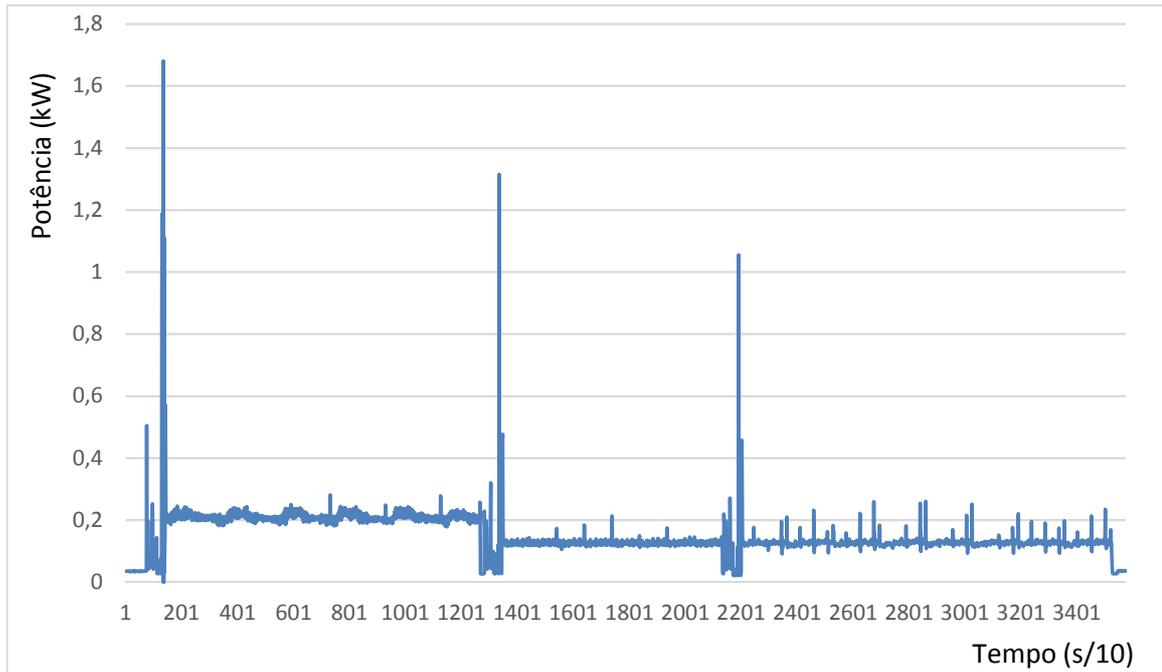


Figura 35 - Consumo de energia para uma operação de usinagem CNC.

De acordo com a figura 18, é possível observar que os momentos onde a máquina possui a maior intensidade de consumo de potência são nas seleções e trocas de ferramenta, atingindo valores na ordem de 17 kW. Já para os momentos de corte, seja no fresamento ou na furação, os valores ficam abaixo de 3 kW.

Conhecer a magnitude da potência é importante para dimensionamento dos componentes elétricos, no entanto, para efeito de comparação de consumo energético, não tem muita utilidade, sendo mais interessante converter os valores para energia total consumida, sendo que para isso, se faz necessário integrar todos os valores de potência ao longo do tempo, e dividir por dez, que é a taxa de aquisição dos equipamentos em Hertz, obtendo os valores em Joule.

Com o intuito de proporcionar uma melhor avaliação, os resultados foram separados por operação, sendo que a Tabela 4 apresenta os valores obtidos para a operação de fresamento e a Tabela 5 para a operação de furação.

Tabela 4 - Energia consumida no fresamento.

Teste	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Máquina	Ferramenta	Material	Energia (MJ)	Desvio padrão (MJ)
1	90	0,018	micro	Metal duro	P20	0,073141	0,000314
2	120	0,018	micro	Metal duro	P20	0,059644	0,000775
3	120	0,022	micro	Metal duro	P20	0,049283	0,000410
4	150	0,018	micro	Metal duro	P20	0,052924	0,000692
5	150	0,022	micro	Metal duro	P20	0,045353	0,000338
6	90	0,018	Conv.	Metal duro	P20	0,24889	0,000776
7 ao 9 – Descartados – houve quebra de ferramenta							
10	22	0,012	micro	HSS	P20	0,703754	0,008946
11	90	0,018	micro	Metal duro	H13	0,074169	0,000127
12	120	0,018	micro	Metal duro	H13	0,059713	0,001108
13	120	0,022	micro	Metal duro	H13	0,049671	0,000653
14	150	0,018	micro	Metal duro	H13	0,0527789	0,000652
15	150	0,022	micro	Metal duro	H13	0,044842	0,000687
16	90	0,018	Conv.	Metal duro	H13	0,247876	0,000634
17	22	0,012	micro	HSS	H13	0,712098	0,006462

Comparando apenas a influência da máquina utilizada (teste 1 com 6 e teste 11 com 16), se observa que, para as mesmas condições de corte, a máquina de micro fresamento consumiu 71% menos energia do que a máquina de fresamento convencional para o P20 e 70% para o H13, o que pode ser explicado pela diferença das massas das máquinas que precisam ser movidas.

Para a fresadora convencional, não foi possível aumentar a velocidade em função da limitação de rotação da máquina, mas para a micro fresadora foi, fazendo a diferença ainda maior quando se comparam os testes 5 com 6 e o 15 com 16, com uma economia de energia de 82% para ambos os materiais. Comparando a economia obtida apenas com o aumento dos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço (teste 1 com o 5 e 11 com 15), foi de 38%

para o P20 e 40% para o H13 para um aumento de 103% na combinação velocidade de corte / avanço.

Para a comparação entre as ferramentas, é importante notar que uma ferramenta de aço rápido requer parâmetros de corte muito mais lentos devido às suas características tecnológicas. Sendo assim, comparando a condição mais rápida para cada ferramenta (Teste 5 com 10 e 15 com 17), a ferramenta de metal duro consumiu apenas 6% da energia necessária para fazer a mesma operação com a ferramenta de HSS para ambos os materiais.

Quando comparado o consumo de energia em relação aos materiais, ambos apresentaram resultados bastante similares, sendo que o H13 consumiu apenas 0,8% mais energia que o P20 em média, considerando todos os ensaios.

Tabela 5 - Energia consumida na furação.

Teste	v_c (m/min)	f_n (mm/rot)	Máquina	Ferramenta	Material	Energia (MJ)	Desvio padrão (MJ)
1	18	0,055	micro	HSS + Co	P20	0,108080	0,000553
2	24	0,055	micro	HSS + Co	P20	0,084543	0,000732
3	24	0,065	micro	HSS + Co	P20	0,073806	0,000315
4	30	0,055	micro	HSS + Co	P20	0,070601	0,000274
5	30	0,065	micro	HSS + Co	P20	0,062912	0,000247
6	18	0,055	Conv.	HSS + Co	P20	0,176243	0,002171
7 ao 9 – Descartados							
10	13	0,08	micro	HSS	P20	0,105545	0,000304
11	18	0,055	micro	HSS + Co	H13	0,110310	0,000754
12	24	0,055	micro	HSS + Co	H13	0,086401	0,000297
13	24	0,065	micro	HSS + Co	H13	0,075207	0,000244
14	30	0,055	micro	HSS + Co	H13	0,072502	0,000179
15	30	0,065	micro	HSS + Co	H13	0,063941	0,000398
16	18	0,055	Conv.	HSS + Co	H13	0,177759	0,001137
17	13	0,08	micro	HSS	H13	0,106810	0,000343

Comparando apenas a influência da máquina utilizada (teste 1 com 6 e teste 11 com 16), se observa que, para as mesmas condições de corte, a máquina de micro fresamento consumiu 39% menos energia do que a máquina de fresamento convencional para o P20 e 38% para o H13, diferença menor quando comparada com o fresamento, o que pode ser explicado pelo fato da movimentação de avanço na furação estar no mesmo sentido da força da gravidade.

Considerando também o incremento de velocidades utilizado na micro fresadora, a economia de energia vai para 64% para ambos os materiais (comparam os testes 5 com 6 e o 15 com 16). Comparando a economia obtida apenas com o aumento dos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço (teste 1 com o 5 e 11 com 15), foi de 42% para ambos os materiais para um aumento de 97% na combinação velocidade de corte / avanço.

Para as brocas comparadas na operação de furação, a diferença tecnológica é menor entre elas, já que ambas são de aço rápido, com a diferença que uma delas é de uma classe reforçada de cobalto, o que permite, segundo o fabricante, que se aumente em 10% a velocidade utilizada, devido à maior, por outro lado, menor tenacidade, o que exige menor avanço. Sendo assim, comparando a condição mais rápida para cada ferramenta (Teste 5 com 10 e 15 com 17), a ferramenta reforçada de cobalto proporcionou uma redução de 40% no consumo de energia para ambos os materiais.

Quando comparado o consumo de energia em relação aos materiais, assim como no fresamento, na furação os resultados também foram similares, tendo o H13 consumido 1,6% mais energia que o P20 em média, considerando todos os ensaios.

Ainda em relação a operação de furação, conforme discutido no capítulo 3.4, foi realizado anteriormente uma operação de furação de centro, no entanto, para esta operação, os mesmos parâmetros de usinagem foram utilizados para todos os ensaios, e apenas duas brocas foram utilizadas, uma para os ensaios com o P20 e outra para os ensaios com o H13, sendo obtido como valor médio para todos os ensaios no P20 na micro fresadora o valor de consumo energético de 0,0576MJ e no H13 0,0580MJ (0,7% maior). Para a fresadora convencional, os valores obtidos foram 0,1082MJ para o P20 e 0,1068MJ para o H13 (1,3% maior).

Comparando as máquinas na operação de furação de centro, a fresadora convencional consumiu em média 54% mais energia, sendo o valor próximo a média geral considerando o fresamento CNC completo, com as três operações para os dois materiais, que foi de 55%.

Para uma visão mais geral, o gráfico da Figura 36 foi adicionado mostra do o consumo energético de todas as operações e estratégias.

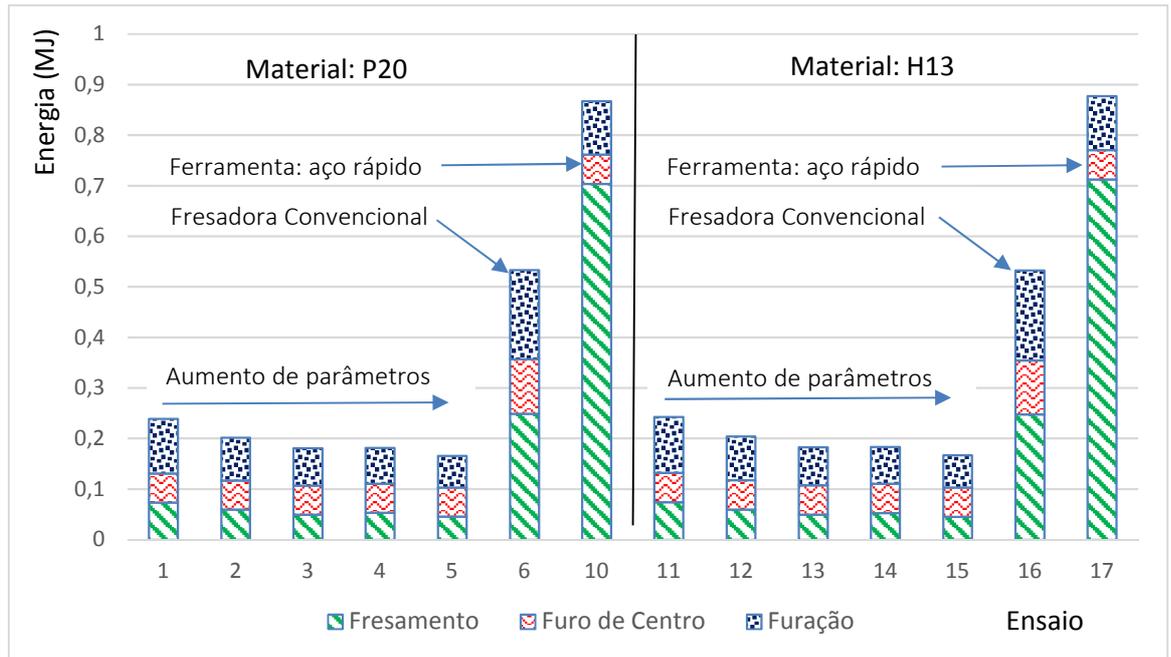


Figura 36 - Consumo de energia para cada operação em cada um dos ensaios.

Uma última observação com relação ao consumo de energia é feita comparando a operação de fresamento com a de furação, já que ambas possuem o mesmo volume de material removido (1873mm^3). Quando utilizadas ferramentas de aço rápido para ambas as operações, o fresamento é muito menos eficiente energeticamente que a furação, que consumiu 83% menos energia para ambos os materiais quando comparadas as condições mais eficientes e considerando como furação o furo de centro mais a furação em si, o que poderia ser associado ao fato do processo de furação ter o movimento de avanço na mesma direção e sentido que a gravidade, diferente do fresamento, que o avanço na maior parte do tempo é lateral.

Outro possível motivo para o exposto é o fato do fresamento ser um processo mais lento que a furação, como pode ser verificado na Figura 33, exigindo maior movimentação dos eixos e consumo de energia com painel elétrico e luzes, aumentando a energia de tara consumida (verificar Figura 21), que além de ser considerada como potência inativa, tem grande contribuição para a energia total consumida (verificar Figura 23).

Além dos motivos expostos, é verificado também uma maior taxa de remoção de material para a furação, o que também reduz o consumo de energia específica, como discutido na Figura 22.

4.3 Avaliação do Ciclo de Vida para Operações de Usinagem

Para a realização da avaliação do ciclo de vida, foi mantida a estrutura sugerida pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044.

4.3.1 Objetivo da Avaliação do Ciclo de Vida

Devido à aceitabilidade do método de avaliação do ciclo de vida para avaliar os impactos ambientais ao nível de produto, seu destacado potencial a ser aplicado no nível de processo e da necessidade de desenvolvimento de ferramentas para acessar os impactos ambientais de processos, o objetivo deste tópico é avaliar o uso de uma ferramenta comercial de avaliação de ciclo de vida (Gabi 6) para quantificar os impactos ambientais de uma operação de usinagem (primeiramente a de fresamento e posteriormente também a de furação), a fim de identificar oportunidades potenciais e lacunas na sua aplicação no nível de processo.

4.3.2 Escopo do Estudo

Como já discutido no capítulo 2.5.2, no escopo deve ser definido a função, a unidade funcional e a fronteira do sistema.

4.3.2.1 Função e Unidade Funcional

Este estudo foi modelado assumindo uma situação em que uma operação de usinagem unitária tenha uma contribuição importante para o impacto da produção total do produto, como o encontrado na fabricação de moldes e matrizes (ALTAN *et al.*, 2001).

A primeira operação analisada é o fresamento de cavidades, uma operação muito comum no presente na fabricação de moldes e matrizes (ALTAN *et al.*, 2001 e SCHÜTZER *et al.*, 2006). A massa de material removido é 0,0147 kg de material, calculados de acordo com o

desenho da Figura 25. Posteriormente também foi analisada a operação de furação, que tem a mesma massa de material removido. O cálculo da massa se faz necessário por ser a unidade funcional utilizada pelo programa.

Com a intenção de aumentar a precisão e confiabilidade da tomada de decisão, os dados de energia real recolhidos foram comparados com o valor do inventário do software e integrados ao modelo. O parâmetro de energia foi escolhido devido a sua importância no mundo moderno e da comum associação com os impactos ambientais como emissões de CO₂ equivalente (exemplos em processos de usinagem: DIAZ *et al.*, 2010; DAMBHARE *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015).

4.3.2.2 Fronteira do Sistema

De acordo com o modelo de sistema multiescalar de processo, que propõe uma subdivisão do sistema de processo (SENGUPTA *et al.*, 2015), primeiramente uma operação unitária de fresamento foi analisada em sua forma agregada como uma "caixa preta", que inclui o montante de todos os recursos utilizados (entradas), a partir da extração de matéria-prima (do "berço") até a fase de produção (portão de fábrica) do processo. A Figura 37 mostra um processo de fresamento, na forma de operação unitária <u-so> (do inglês *Unit Single Operation*), além de todas as entradas levadas em consideração para a quantificação dos impactos, de acordo com o inventário do programa utilizado.

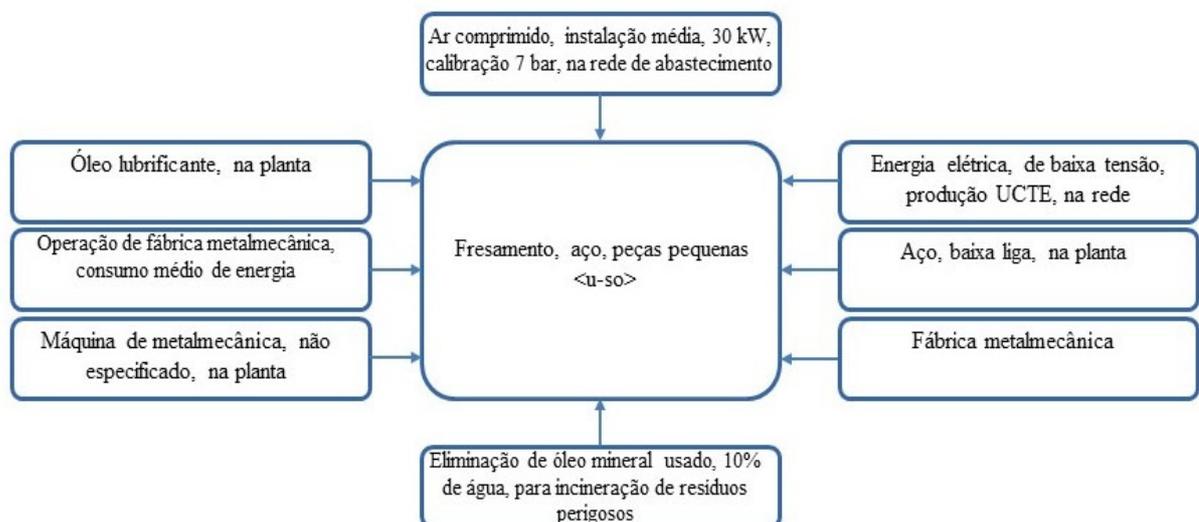


Figura 37 - Processo de fresamento com todas as entradas consideradas na avaliação de impactos.

Como pode ser verificado na Figura 37, de acordo com o inventário do programa utilizado, os recursos considerados para quantificação dos impactos ambientais de uma operação unitária de fretamento de aço são: máquina de metalomecânica, operação de fábrica metalomecânica, óleo lubrificante, ar comprimido, energia elétrica, aço, fábrica metalomecânica e eliminação de óleo mineral usado.

4.3.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida do Fresamento

É sabido que um grande problema para a geração de resultados precisos e confiáveis sobre uma avaliação de ciclo de vida é a indisponibilidade e/ou insuficiência de dados (HOOGMARTENS et al., 2014 e FAZENI et al., 2014), como foi verificado no presente estudo, já que o banco de dados consultado não continha dados para o fresamento especificamente do aço AISI P20, sendo os materiais mais próximos um aço de baixa liga e um aço cromo 18/8.

Apesar de reconhecer essa primeira limitação encontrada, com o intuito de se utilizar um substituto e continuar o estudo, as opções disponíveis no inventário foram levantadas e apresentadas. Nota-se ainda que dentro de cada opção de material apresentada, existem ainda duas opções de tamanho peças, pequenas e médias. A Tabela 6 apresenta as o inventário com o montante de recursos de entrada para cada uma das opções selecionadas na base de dados do programa.

Tabela 6 - Montante de recursos de entrada para o fresamento de quatro diferentes opções disponíveis no banco de dados consultado.

Entradas	Unidade	Desvio padrão	Fresamento , aço baixa liga, peças médias	Fresamento , aço baixa liga, peças pequenas	Fresamento , aço 18/8, peças médias	Fresamento , aço 18/8, peças pequenas
Eliminação de óleo mineral usado, 10% de água, para incineração de resíduos perigosos	kg	163%	5,62E-5	5,62E-5	5,62E-5	5,62E-5
Ar comprimido, instalação média, 30 kW, calibração 7 bar, na rede de abastecimento	m ³	163%	0,0188	0,0188	0,0188	0,0188
Óleo lubrificante, na planta (orgânico)	kg	163%	5,62E-5	5,62E-5	5,62E-5	5,62E-5
Fábrica metalmecânica	pcs.	332%	2,97E-11	2,97E-11	2,97E-11	2,97E-11
Operação de fábrica metalmecânica, consumo médio de energia	kg	163%	0,0648	0,0648	0,0648	0,0648
Máquina de metalmecânica, não especificado, na planta	kg	332%	2,56E-006	2,56E-006	2,56E-006	2,56E-006
Aço, baixa liga, na planta (beneficiado)	kg	105%	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147
Energia elétrica, de baixa tensão, produção UCTE, na rede	MJ	124%	0,0251	0,12	0,0355	0,169

De acordo com a Tabela 6, é possível concluir que as quantidades de todas as entradas para todos os processos são mantidas padrão, com exceção para o consumo de eletricidade, que é mais elevado para as peças pequenas, provavelmente devido à taxa de remoção de material, o que provoca um aumento no consumo específico de energia (YOON *et al.*, 2014). Para o aço cromo 18/8 também é mais elevada, provavelmente porque tem mais elementos de liga e pior usinabilidade (PARO *et al.*, 2001 e GERDAU, 2003). É também importante salientar que apesar de se ter a mesma quantidade de material da peça de trabalho (material removido como cavaco) para todas as situações, esta entrada irá proporcionar impactos diferentes, uma vez que é composto por materiais de diferentes composições.

Aqui ainda é destacado o elevado desvio padrão, de até 332% para alguns indicadores, mostrando que a principal característica de uma avaliação de ciclo de vida, que é o amplo leque para análise do ciclo de vida completo de um produto, só pode ser obtida a custos de simplificações de outros aspectos, não fornecendo a estrutura completa para um estudo de impactos local (GUINÉE *et al.*, 2004).

O próprio relatório obtido no inventário do programa adverte sobre essa característica, com a frase "devido à grande variação de fábrica para fábrica, no caso deste conjunto de dados torna-se importante nos resultados, tem que ser investigado se as estimativas aproximadas feitas são aplicáveis ou não".

Fica evidenciado, portanto, que a questão do alto desvio padrão do programa é outro tópico que precisa ser resolvido para uma aplicação no nível de processo que seja mais confiável, o que pode ser conseguido utilizando-se quantidades reais para cada uma das entradas, o que será feito neste trabalho para o consumo de energia.

4.3.4 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida do Fresamento

O método de conversão utilizado neste estudo foi o CML2001 - abril de 2013, desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Alemanha, no qual todos os indicadores de impacto disponíveis foram considerados.

4.3.4.1 Influência do Material e do Tamanho da Peça

Uma primeira avaliação de impacto foi feita comparando as 4 opções potenciais de processo disponíveis na base de dados do programa (dois diferentes materiais e tamanhos de peça) e outra utilizando os dados de energia reais. Como discutido, o programa utilizado não tem dados para os materiais que foram utilizados (aços AISI P20 e H13). Assim, para quantificação do impacto do material, foi utilizado a quantidade de impactos do aço de baixa liga devido à sua composição química mais próxima, já que o 18/8 possui grandes quantidades de cromo e níquel, como apresentados na Tabela 7. Os materiais utilizados para a comparação química foram o aço de baixa liga AISI 1112 (material usado como padrão para testes de usinabilidade) e o AISI 304 (aço mais comum do grupo 18/8).

Tabela 7 – Comparação da composição química de um aço de baixa liga, do aço P20, do aço H13 e um aço 18/8 (adaptado de GERDAU, 2003 e Hudsonsteel, 2016).

% de liga na composição	Aço baixa liga AISI 1112	AISI P20	AISI H13	Aço 18/8 AISI 304
C	<=0,13	0,33	0,40	<=0,08
Mn	0,7-1,0	0,80	0,40	<=2
P	0,07-0,12	-	-	<=0,045
S	0,16-0,23	-	-	<=0,03
Si	-	0,65	1,00	<=1,0
Cr	-	1,75	5,25	18-20
Mo	-	0,40	1,35	-
Ni	-	-		8-10,5
V	-	-	1,00	-
Total de Liga	Até 1,48	3,93	9,4	Até 33,655

A Tabela 8 mostra a quantidade de impacto para cada categoria disponível, para cada uma das quatro opções escolhidas no programa, além de outra combinação utilizando como material os dados do aço de baixa liga (por estar mais próximo em termos de composição química e ser uma aço carbono, já que o 18/8 é u aço inoxidável) além da energia real calculada para o processo mais eficiente do material P20 (teste 5), que foi o material mais eficiente energeticamente, apesar do ensaio mais eficiente ter sido obtido para o H13 (vide Tabela 4).

Tabela 8 – Avaliação do Impacto do ciclo de vida para cada processo.

Categorias de impacto (CML2001 - Abril 2013)	Aço 18/8, peças pequenas	Fator Percentual	Aço 18/8, peças médias	Aço baixa liga, peças pequenas	Aço baixa liga, energia real	Aço baixa liga, peças médias
Esgotamento Abiótico (EA Elementos) [kg Sb-Equiv.]	2,26E-06	1,0	0,983	0,167	0,158	0,156
Esgotamento Abiótico (EA fóssil) [MJ]	1,31E+00	1,0	0,809	0,586	0,479	0,45
Acidificação Potencial (AP) [kg SO ₂ -Equiv.]	5,57E-04	1,0	0,807	0,47	0,362	0,333
Eutrofização Potencial (EP) [kg fosfato-Equiv.]	2,93E-04	1,0	0,735	0,626	0,48	0,44
Ecotoxicidade Potencial de Água Fresca (EPAF.) [kg DCB-Eq.]	2,37E-01	1,0	0,945	0,263	0,233	0,225
Aquecimento Global Potencial (AGP 100 anos) [kg CO ₂ -Equiv.]	1,23E-01	1,0	0,824	0,605	0,506	0,479
Toxicidade Humana Potencial (THP) [kg DCB-Equiv.]	1,18E+00	1,0	0,987	0,107	0,101	0,099
Ecotoxicidade Potencial de Águas Marinhas (EPAM.) [kg DCB-Equiv.]	2,84E+02	1,0	0,862	0,35	0,273	0,252
Esgotamento Pot. da Camada de Ozônio (EPCO) [kg R11-Equiv.]	6,62E-09	1,0	0,837	0,578	0,487	0,462
Criação Pot. de Ozônio Fotoquímico (CPOF) [kg Eteno-Equiv.]	5,15E-05	1,0	0,872	0,635	0,565	0,546
Ecotoxicidade Potencial Terrestre (EPT.) [kg DCB-Equiv.]	3,98E-02	1,0	0,99	0,1	0,095	0,093
Fator de impacto médio		1,0	0,88	0,41	0,34	0,32

Para facilitar a visualização, foi mantido o valor da magnitude do impacto apenas para o processo mais poluente, sendo utilizados fatores percentuais para todos os demais processos. É sabido também que não existe uma base científica para reduzir os resultados de uma avaliação de ciclo de vida para uma base única (ABNT NBR ISO 14044, 2009). No entanto, com a intenção de permitir uma comparação numérica, a média dos fatores também foi adicionada à tabela, atribuindo o mesmo peso de impacto para todos os indicadores.

Uma outra forma mais agradável de se visualizar os resultados é por meio de um gráfico de rede multi-objetivo, construído com os fatores de impactos, e que geram áreas de impacto, como mostrado na Figura 38.

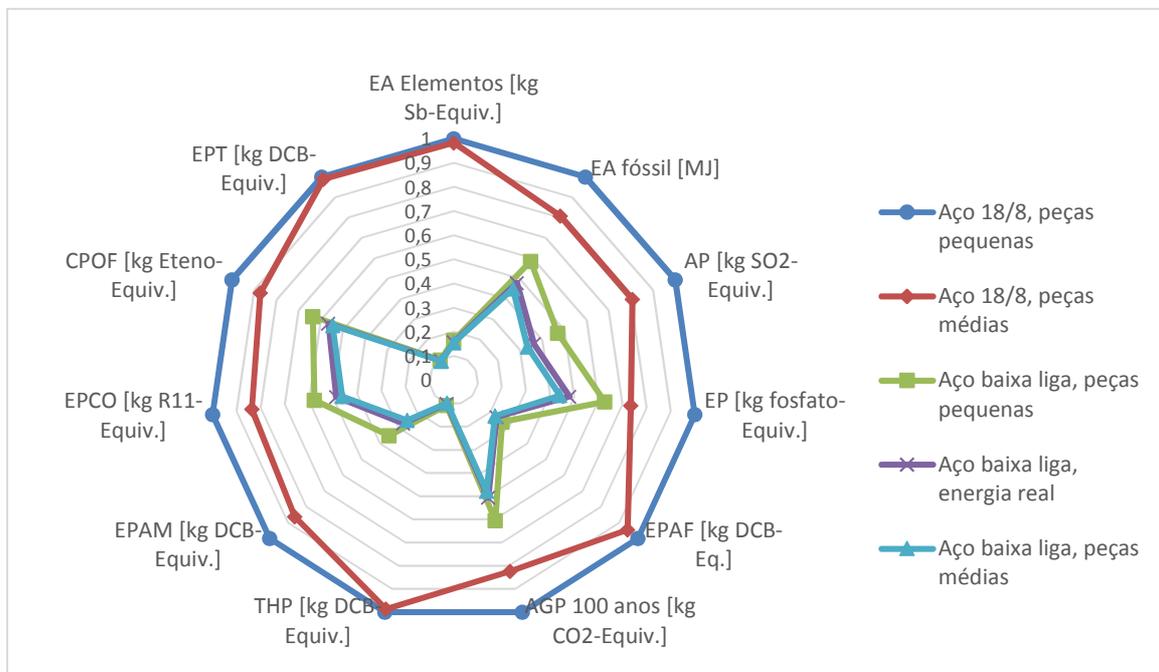


Figura 38 – Indicadores de impacto comparando os quatro processos disponíveis no programa mais um considerando o consumo energético real.

Analisando o gráfico e a área de impacto gerada para cada processo, além do fator de impacto médio, é possível concluir que o processo de maior impacto é o fresamento do aço 18/8 de peças pequenas, uma vez que todos os indicadores para este processo são mais elevados do que para os outros, ficando assim com um fator de impacto médio de 1,0, seguido pelo fresamento do aço 18/8 de peças médias (fator de impacto 0,88), fresamento de aço baixa liga de pequenas peças (fator de

impacto 0,41), fresamento de aço de aço baixa liga com dados de energia calculados reais (fator de impacto 0,34) e fresamento de aço baixa liga de peças médias (fator de impacto 0,32).

4.3.4.2 Comparação das Estratégias de Usinagem

A fim de comparar as diferentes estratégias de usinagem, considerando o impacto total do processo, a avaliação do ciclo de vida foi feita para cada estratégia, considerando todas as entradas.

Para a eletricidade, foram utilizados os valores reais de energia; para a máquina de trabalho, o valor do inventário foi utilizado para o fresamento realizado na máquina convencional e um valor de 21,43% menor para a microfresadora, que é a relação de massa entre as duas máquinas; para a fábrica de metalmecânica, também foi utilizado o valor do inventário para a máquina convencional e um valor de 74,21% menor para a de microusinagem, calculado pela relação de volume; para o material foi utilizado os valores do aço de baixa liga, e para todas as outras entradas foram utilizados os valores do inventário.

A Figura 39 mostra um gráfico com as áreas de impacto e seu fator de impacto médio para quatro diferentes estratégias de usinagem, o fresamento na máquina de microusinagem utilizando a ferramenta de HSS e consumindo 0,7037 MJ, o fresamento na máquina convencional utilizando a ferramenta de metal duro e consumindo 0,2489 MJ, o fresamento na máquina de microusinagem utilizando a ferramenta de metal duro e consumindo 0,0731 MJ e o fresamento na máquina de microusinagem utilizando a ferramenta de metal duro e consumindo 0,0454 MJ.

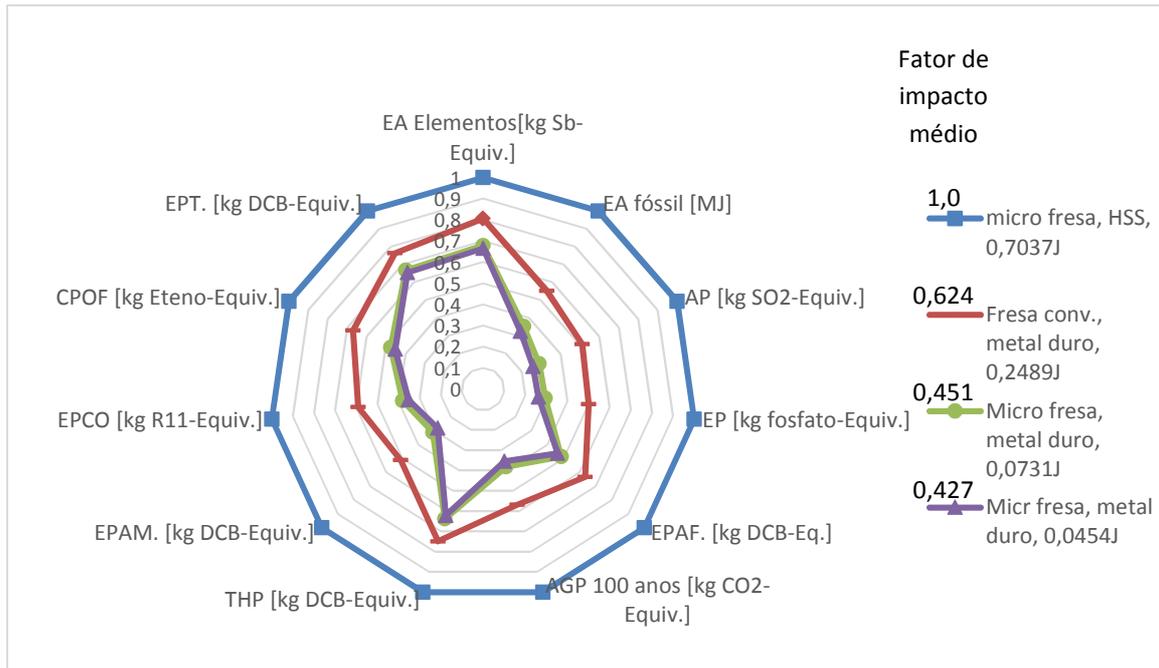


Figura 39 – Indicadores de impacto comparando quatro diferentes estratégias de fresamento e seu fator de impacto médio.

Analisando o gráfico da Figura 39, as áreas de impacto e o fator de impacto médio, é possível concluir que o processo de maior impacto é o que usou a micro fresadora e a ferramenta de HSS, mesmo com o menor impacto provocado pela máquina e pela fábrica, o alto uso de eletricidade consumido devido aos parâmetros de velocidade mais lentos, fez esta estratégia a que gerou o maior impacto para todas as categorias, recebendo o fator médio de impacto 1,0.

A segunda estratégia de maior impacto foi a que usou a fresadora convencional com ferramenta de metal duro (fator de impacto 0,624), seguido pela estratégia menos eficiente energeticamente utilizando a micro fresadora e ferramenta de metal duro (fator de impacto 0,451) e em seguida a mais eficiente energeticamente utilizando a micro fresadora e ferramenta de metal duro (fator de impacto 0,427).

Comparando-se esses resultados com os da Tabela 4, pode ser verificado que a ordem de impactos é a mesma que a ordem de consumo energético, apontado para a grande dependência desse fator.

4.3.4.3 Avaliação das Entradas do Processo

A fim de avaliar o quanto cada entrada contribui para o impacto total do processo, outra avaliação de impacto foi feita para as entradas de uma operação, o fresamento na microfresadora de aços de baixa liga, com dados de energia reais do processo mais eficiente. A Figura 40 mostra os resultados obtidos.

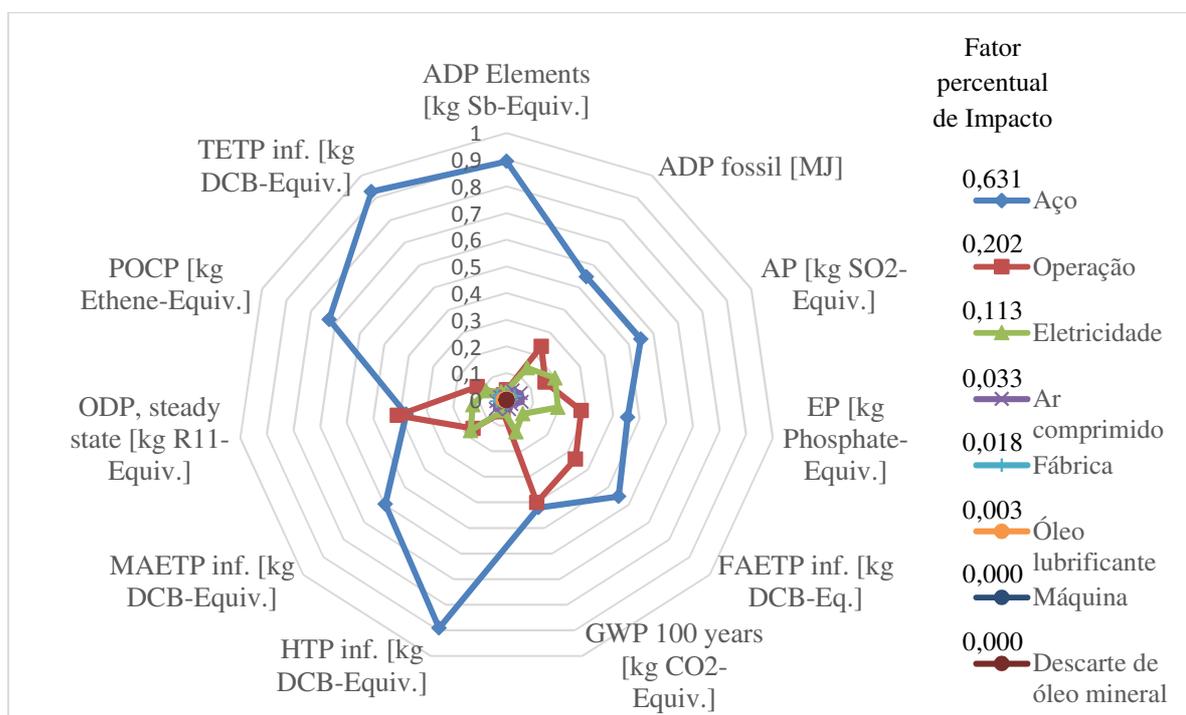


Figura 40 – Indicadores de impacto e fatores percentuais de impacto avaliando cada entrada de uma única operação de fresamento, para o aço de baixa liga, na micro fresadora, com os dados reais de energia do processo mais eficiente.

Analisando o gráfico da Figura 40, é possível constatar que a entrada de maior impacto é o aço, devido a sua maior área de impacto e fator percentual de impacto (0,631). É observado que o aço é registrado como sendo o material removido na forma de cavaco, um desperdício inerente ao processo de usinagem, não permitindo muitas opções para a sua redução no nível do processo, mas mostrando a importância para os planos de reciclagem e de redução de sobremetal de material no sistema ao nível de produto.

Considerando o fator percentual de impacto, a segunda entrada de maior impacto para este processo é a operação de fábrica metalúrgica (fator percentual de 0,202), mostrado aqui de uma maneira bastante generalizada. Assim, para obter mais informações sobre o que exatamente foi considerado para esta entrada, seria necessário avaliar mais um nível de entrada, o que está fora do escopo deste estudo.

Também considerando o fator percentual de impacto, a terceira entrada de maior impacto é a eletricidade (fator percentual de 0,113), seguido do ar comprimido (fator percentual de 0,033), da fábrica metalúrgica (fator percentual de 0,018 considerando a micro fresadora), o óleo lubrificante (fator percentual de 0,003), a máquina e a eliminação de óleo mineral (com fator percentual inferior a 0,000).

Também é notado aqui que diferente do que aconteceu com as outras comparações (material e tamanho de peça e estratégias de usinagem), discutidos nas seções 3.5.1 e 3.5.2, onde todos os indicadores relativos a um processo eram mais elevados do que para o outro, para a avaliação das entradas aconteceram alguns intercâmbios nos indicadores, o que poderia tornar a conclusão sobre a estratégia mais impactante diferente caso fosse utilizado um processo de ponderação diferente do utilizado neste trabalho (em que o mesmo peso foi atribuído a todas as categorias de impacto), ou ainda caso fosse considerado apenas uma categoria de impacto.

Finalmente, é também destacado que para a opção mais eficiente energeticamente, mostrada na Figura 40 (teste 5), a eletricidade é a terceira entrada de maior impacto, no entanto, para uma estratégia menos eficiente energeticamente, como por exemplo quando utilizada a fresadora convencional (teste 6) ou a ferramenta de HSS (teste 7), a energia elétrica foi o insumo mais impactante, com um fator de impacto percentual de 0,372 e 0,673 respectivamente, mostrando a importância de uma escolha correta da estratégia de usinagem para a redução do impacto total.

4.3.5 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida da Usinagem CNC

Para a avaliação dos impactos ambientais totais da usinagem CNC, o procedimento realizado foi muito semelhante ao do fresamento, sendo primeiramente consultado no inventário do programa os dados referentes ao processo de furação CNC, para ser somado ao

de fresamento. Neste caso, o inventário não diferencia o tamanho de peça, apenas o material usinado, sendo selecionado o aço baixo carbono, pelos motivos já discutido na seção 4.3.4.1.

Com relação ao consumo de energia elétrica, os dados reais das operações mais eficientes de furação e fresamento foram utilizados, além do consumo médio de energia obtido na furação de centro, que foi adicionado à operação de furação.

Para a máquina e a fábrica metalúrgica, os valores encontrados no inventário foram reduzidos proporcionalmente à relação de massa e de volume, respectivamente, como já discutido na seção 4.3.4.2. Os dados gerados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Montante de recursos de entrada da furação e do fresamento.

Entradas	Unidade	Desvio padrão	Furação CNC, aço baixa liga	Fresamento, aço baixa liga, peças médias
Eliminação de óleo mineral usado, 10% de água, para incineração de resíduos perigosos	kg	163%	5,62E-005	5,62E-005
Ar comprimido, instalação média, 30KW, calibração 7 bar, na rede de abastecimento	m ³	163%	0,0188	0,0188
Óleo lubrificante, na planta (orgânico)	kg	163%	5,62E-005	5,62E-005
Fábrica metalmecânica	pcs.	332%	7,66E-012	7,66E-012
Operação de fábrica metalmecânica, consumo médio de energia	kg	163%	0,0648	0,0648
Máquina de metalmecânica, não especificado, na planta	kg	332%	4,56E-007	2,01E-006
Aço, baixa liga, na planta (beneficiado)	kg	105%	0,0147	0,0147
Energia elétrica, de baixa tensão, produção UCTE, na rede	MJ	124%	0,0576 + 0,0629	0,0454

Comparando as entradas da Tabela 9, é possível verificar que além da eletricidade, o único parâmetro de entrada diferente entre os dois processos é a máquina de metalmecânica, sendo um pouco menor para a furação, o que poderia estar associado a menor solicitação

mecânica na máquina, já que na furação o esforço principal está na direção mais rígida da máquina (axial), enquanto no fresamento com muita frequência o esforço principal é radial, causando inclusive maior vibração do sistema, conforme mostrado na figura 35.

Com relação ao consumo de energia, é verificado que a furação teve um consumo maior do que o fresamento, devido a economia energética proporcionada ao se utilizar ferramentas de metal duro no fresamento. Quando comparado apenas os processos utilizando HSS, então o fresamento tem um consumo maior.

A figura 42 apresenta o gráfico com a área e o fator de impacto total da estratégia mais eficiente, além dos impactos da furação e do fresamento.

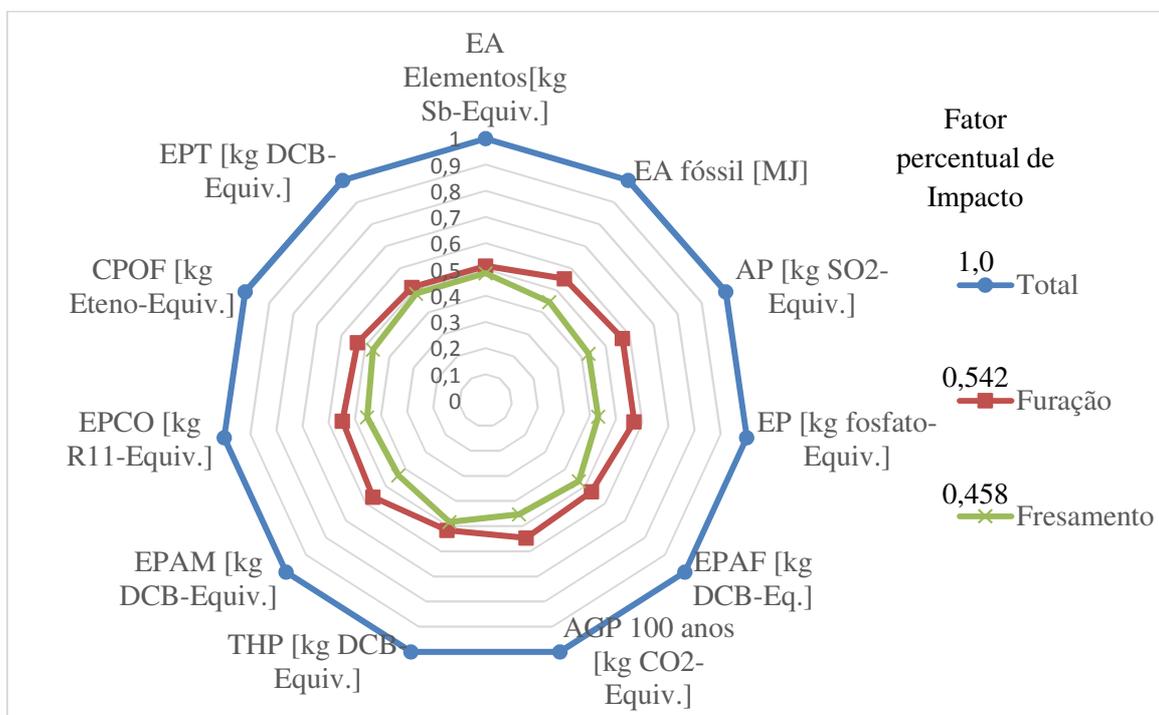


Figura 42 – Indicadores de impacto e fatores percentuais de impacto para a estratégia de usinagem CNC mais eficiente, avaliando a furação (furo de centro mais furo em cheio) e o fresamento.

Conforme pode ser verificado no gráfico, a furação contribuiu com um fator percentual de impacto de 0,542, enquanto o fresamento contribuiu com 0,458, o que certamente seria bem diferente caso fosse considerando a ferramenta de HSS para as duas situações, já que neste caso fresamento consumiu muito mais energia elétrica que a furação.

4.3.6 Avaliação dos Módulos de Impactos Econômicos e Sociais do Ciclo de Vida

Para as avaliações econômicas e sociais, o programa estudado também oferece um módulo, no entanto, que não está preenchido com dados. Para avaliação econômica, se faz necessário preencher as entradas mostradas na tabela 6 com valores monetários, já para a avaliação social, os fatores mostrados na tabela 10 são sugeridos, também devendo ser preenchido pelo usuário, o que não foi realizado pelo fato de a análise não ter sido feita para uma aplicação industrial.

Tabela 10 – Fatores sugeridos para avaliação social do ciclo de vida.

Horas de trabalho qualificado	Quantidade
Grupos A, B, C, ...	Horas de trabalho
Saúde e Segurança	Quantidade
Acidentes letais	Número
Acidentes sérios não letais	Número
Condições não saudáveis de trabalhadores	Horas de trabalho
Condições de Trabalho Humano	Quantidade
Empregabilidade atual de mulheres	Horas de trabalho
Trabalho infantil	Horas de trabalho
Discriminação no acesso ao trabalho	Horas de trabalho
Trabalho forçado	Horas de trabalho
Trabalho infantil perigoso	Horas de trabalho
Sem convenção coletiva	Horas de trabalho
Sem direitos para organizar	Horas de trabalho
Remuneração desigual	Horas de trabalho

5 CONCLUSÕES

Em termos de nível sonoro, todos os processos de usinagem analisados geraram um nível sonoro médio menor que 85 dB, apesar do lixamento ter ultrapassado este limite em 10% do tempo. Já para os equipamentos auxiliares, o aspirador de pó ficou na média abaixo, apesar de ter ultrapassado os 85 dB em 19% do tempo e apenas o ar comprimido utilizado para a limpeza ficou acima, com um valor médio de 92,2 dB, posteriormente reduzido para 78 dB.

Na usinagem CNC, os momentos de maiores níveis sonoros foram nas trocas de ferramenta e no fresamento, coincidindo com os de maior vibração, mostrando a direta relação entre rigidez do sistema e ruído.

Em termos de consumo energético, a maior diferença encontrada foi com relação ao tipo de ferramenta, onde o uso de uma fresa de metal duro ao invés de uma de aço rápido proporcionou uma economia de 94%, e o uso de uma broca de aço rápido reforçado com cobalto ao invés de uma de aço rápido convencional proporcionou uma economia de 40%, influenciados principalmente pelas maiores velocidades obtidas.

Foi verificado também que as mesmas operações realizadas em uma microfresadora CNC ao invés de uma fresadora convencional CNC proporcionaram uma economia de 55% no consumo energético, o que pode ser associado a menor massa a ser movida.

Como sugerido pela teoria, o aumento nos parâmetros de corte reduziu o consumo de energia devido ao menor consumo de energia específica obtido com o aumento da taxa de remoção de material.

Em termos de material, a diferença foi estatisticamente irrelevante, com o aço AISI H13 consumindo em média 1% mais energia do que o AISI P20 quando considerado todos os ensaios e operações e em relação as operações, a furação (furo de centro mais furo em cheio) consumiu 83% menos energia que o fresamento quando ambos foram feitos utilizando ferramenta de aço rápido, o que também pode ser relacionado a menor taxa de remoção de material requerida.

Com relação ao programa avaliado, o mesmo se mostrou uma ferramenta poderosa para acessar o consumo de recursos de processos por meio do uso de uma grande base de dados, além de permitir a conversão dos resultados em diversas categorias de impactos ambientais, através de diversos métodos de caracterização.

Os pontos identificados que precisam ser melhorados foram a falta de dados específicos, o grande número de generalizações, não fornecimento de valores para avaliações econômicas e

sociais, além do alto desvio padrão, este que foi reduzido utilizando dados de consumo de energia real dentro do modelo.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Acessar o consumo energético e os impactos ambientais dos outros processos de usinagem;
- Agregar o nível sonoro como fator de impacto ambiental na avaliação do ciclo de vida;
- Utilizar valores reais para as outras entradas do processo na avaliação do ciclo de vida;
- Obter valores e agregar as dimensões social e econômica na análise.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; BARUN, S.; SCHRAML, P. Holistic Simulation Environment for Energy Consumption Prediction of Machine Tools. **The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering**. vol. 29, p.251-256, 2015.

ABNT NBR ISO 14040:2009 - 2014. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2009.

ABNT NBR ISO 14044:2009 - 2014. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2009.

ÁVILA, D.M. Avaliação da Qualidade de Vida dos Trabalhadores Expostos ao Ruído Ocupacional. (Trabalho de graduação), Universidade de Guarulhos. Guarulhos, 2007.

ALTAN, T; LILLY, B.; YEN, Y.C. Manufacturing of dies and molds. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. vol. 50 (2), p.404-422, 2001.

BIERER, A.; GOTZE, U.; MEYNERTS, L.; SYGULLA, R. Integrating life cycle cost and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. **Journal of cleaner production**, p.1-13, 2014.

BOFF, L. Ecologia: Grito da terra, grito dos pobres. **Sextante**, Brasil, 1ª Ed., 2004.

BRE Sustainability Report, 2006/2007

URL:

http://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/corporate/KN2960_Sustainability_Report_080807.pdf

Acessado em 12 de Setembro de 2016

CAPRA, F. As conexões ocultas: Ciência para uma vida sustentável. **Ed. Pensamento-Cultrix Ltda.**, São Paulo, 9ª Ed.,2009.

CHOI, A.C.K.; KAEBERNICK, H.; LAI, W.H. Manufacturing process modelling for environmental impact assessment. **Journal of Materials Processing technology**, v. 70, p.231-238, 1997.

CUCURACHI, S.; HEIJUNGS, R.; OHLAU, K. Towards a general framework for including noise impacts in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.4(17), pg. 471–487, 2012.

CUCURACHI, S.; HEIJUNGS, R. Characterization factors for life cycle impact assessment of sound emissions. *Science of the Total Environment*, v. 468-469, pg. 280 –291, 2014.

CUNHA, D.F.; RESENDE, A.A. Medição e análise de ruídos em oficina mecânica de pequeno porte para processos de usinagem. **XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Bento Gonçalves, RS, Brasil, 2012.

DAMBHARE, S.; DESHMUKH, S.; BORADE, A.; DIGALWAR, A.; PHATE, M. Sustainability Issues in Turning Process: A Study in Indian Machining Industry. **12th Global Conference on Sustainable Manufacturing**. *Procedia CIRP* 26, pg. 379–384, 2015.

DAHMUS, J. B.; GUTOWSKI, T. G. An Environmental Analysis of Machining, **ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, pp. 643-652, California, 2004.

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

DE MELLO JUNIOR, P.R.M. O ruído industrial e sua regulamentação nacional e internacional. **Programa de Pós-Graduação em Arquitetura**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

DE SILVA, N.; JAWAHIR, I.S.; DILLON, O.W.JR.; RUSSELL, M. A new comprehensive methodology for the evaluation of product sustainability at the design and development stage of consumer electronic products. **International Journal of Sustainable Manufacturing**, cap.1 v.3, p.251–264, 2009.

DIAZ, N.; CHOI, S.; HELU, M.; CHEN, Y.; JAYANATHAN, S.; YASUI, Y.; KONG, D.; PAVANASKAR, S.; DORNFELD, D. Machine Tool Design and Operation Strategies for Green Manufacturing. **Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting**, 2010.

DIAZ, N.; HELU, M.; JAYANATHAN, S.; CHEN, Y.; HORVATH, A.; DORNFELD, D.A. Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environment. **Sustainable systems and technology**. 2010.

DIAZ, N.; NINOMIYA, K.; NOBLE, J.; DORNFELD, D.A. Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry. **5th CIRP Conference on High Performance Cutting**. v. 1, pg. 518 – 523, 2012.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. Fresamento. In: _____. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artliber, 7.ed., p. 213-246, São Paulo. 2010.

DORNFELD, D. Effective utilization of resources, Part 2
URL: <http://green-manufacturing.blogspot.com.br>
acessado: 27 de Outubro de 2013.

DREHER, J.; LAWLER, M.; STEWART, J.; STRASORIER, G.; THORNE, M. General Motors: Metrics for a Sustainable Manufacturing. **GM Communications**. 2009.

EAGAN, P.D.; JOERES, E.; The utility of environmental impact information: a manufacturing case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, p.75-83, 2002.

ECOINVENT
URL: <http://www.ecoinvent.org>
Acessado em 3 de Fevereiro de 2016.

ESPRITCAM, 2014
URL: <http://www.spritcham.com>
Acessado em 13 de Fevereiro de 2016.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable value stream mapping (SUS-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **Resources, conservation and recycling**. v.85, p.8-18, 2014.

FAZENI, K.; LINDORFER, J.; PRAMMER, H. Methodological advancements in life cycle process design: A preliminary outlook. **Resources, conservation and recycling**. v.92, p.66-77, 2014.

FENG, S. C.; JOUNG, C.B.; LI, G. Development overview of sustainable manufacturing metrics. **Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2010)**, Hefei, China, 2010.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M.V.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent development in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**. v.91, p.1-21, 2009.

FRAUNHOFER, 2012. Eco Machine Tools - Task 4 Report - Assessment of Base Case.
 URL: http://www.ecomachinetools.eu/typo/reports.html?file/4tl_files/pdf/EuP_Lot5_Task4_Aug2012.pdf
 Acessado em 5 de Julho de 2016.

GABI, J.B. Handbook on Life Cycle Assessment (LCA): Using the GaBi Education Software Package. **PE International**, Leinfelden-Echterdingen, Germany, 2010.

GARCIA, N.; FERNANDEZ-TORRES, M.J.; CABALLERO, J.A. Simultaneous environmental and economical process synthesis of isobutane alkylation. **Journal of Cleaner Production**. v.81, p.270-280, 2014.

GERDAU. Steel Manual. **Fine Steel Piratini**. 2003.

GILLANI, S.T. A life cycle assessment and process system engineering integrated approach for sustainability: application to environmental evaluation of biofuel production (tese de doutorado). **Institut National Polytechnique de Toulouse**. Toulouse, 2013.

GIRARDI, G. SELLITTO, M.A. Medição e reconhecimento do risco físico ruído em uma empresa da indústria moveleira da serra gaúcha. **Estudos Tecnológicos**, Vol. 7, n° 1, pg. 12-23, 2011.

GOPARSAMY, B.M.; MONDAL, B.; GHOSH, S. Taguchi method and ANOVA: an approach for process parameter of hard machining while machining hardened Steel. **Journal of Science & Industrial Research**. v.68, p.686-695, 2009.

GRANADOS, S., JAWAHIR, I.S., FERNANDEZ, J. A comprehensive criterion for sustainability evaluation of machining processes. **7th Global Conf. Sust. Manuf., IIT Madras**, Chennai, India, 385-391. 2009.

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, 2004.

GUINÉE, J. B., R. HEIJUNGS, G. HUPPES, A. ZAMAGNI, P. MASONI, R. BUONAMICI, T. EKVALL AND T. RYDBERG. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Environmental Science Technology**. vol. 45, pg. 90-96, 2011.

GUPTA, A.; VANGARI, R.; JAYAL, A.D.; JAWAHIR, I.S. Priority evaluation of product metrics for sustainable manufacturing. **Proceedings of the 20th CIRP Design Conference**, 19–21 April, Nantes, France, 2010.

HELU, M.; VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Evaluating the relationship between use phase environmental impacts and manufacturing process precision. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.60, p.49-52, 2011a.

HELU, M.; RUHL, J.; DORNFELD, D.; WERNER, P.; LANZA, G. Evaluation trades-off between Sustainability, Performance and Cost of green machining technologies. **Ecological Indicators**, v.2, p.144-152, 2011b.

HELU, M. Leveraging Manufacturing Precision to Reduce Product Life Cycle Environmental Impacts. **Theses presented in University of California at Berkeley**, 2013.

HERRMANN, I.T.; MOLTESEN, A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**, v.86, p.163–169, 2015.

HOOGMARTENS, R.; VAN PASSEL, S.; VAN ACKER, K.; DUBOIS, M. Briding the gap between LCA, LCC, CBA as sustainability assessment tools. **Environmental impact assessment review**, v.48, p.27-33, 2014.

HUDSONTOOLSTEEL, 2016

URL: <https://www.hudsonsteel.com>

Acessado em 23 de Fevereiro de 2016.

ILCD. International Reference Life Cycle Data System Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance. **Publications Office of the European Union**, Luxemburg, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics. **OECD/IEA Publishing**, 2015.

ISO 9000:2015. Quality Management System – Fundamentals and Vocabulary. **International Organization for Standardization**, 2015.

URL: <http://www.iso.org>

acessado em 14 de dezembro de 2014.

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

JAYAL,A.D.; BADURDEEN, O.W.; DILLON JR., O.W.; JAWAHIR, I.S. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization of indicators for sustainable manufacturing. **CIRP Journal of manufacturing Science and Technology**, v.2, p.144-152, 2010.

JAWAHIR I.S.; DILLON JR, O.W. Sustainable manufacturing processes: new challenges for developing predictive models and optimization techniques. **Proceedings of the first international conference on sustainable manufacturing**. Montreal, Canada, pp. 1–15, 2007.

JAWAHIR, I.S.; JAYAL,A.D. Product and Process Innovation for Modeling of Sustainable Machining Processes ____in: **Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.299-305, 2011.

JOUNG, C.B.; CARREL, J.; SARKAR, P.; FENG, S.C. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. **Ecological Indicators**, v.24, p.148-157, 2012.

KAEBERNICK, H.; KARA, S.; SUN, M. Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v.19, p.461-468, 2003.

LOVELOCK, J. As eras de Gaia: Uma biografia do nosso planeta vivo. **Publicações Europa América Ltda.**, 1ª ed., Portugal. 1998.

NEXUS, 2016

URL: <https://nexus.openlca.org/>

Acessado em 22 de Setembro de 2016.

Norma Regulamentadora NR15 – Atividades e Operações Insalubres, 2014.

OPENLCA, 2016

URL:<http://www.openlca.org>

Acessado em 21 de Setembro de 2016.

PACHAURI, R.K.; MEYER, L.A. Climate Change 2014: Synthesis report. **International Panel of Climate Change (IPCC)**. Geneva, Switzerland, 2015.

PARO, J.; HANNINEN, H.; KAUPPINEN, V. Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 119, p.14-20, 2001.

Pegada de Carbono, 2016

URL: <http://www.pegadadecarbono.com/>

Acessado em 12 de Setembro de 2016.

Pegada Ecológica, 2016

URL: http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/pegada_ecologica/

Acessado em 12 de Setembro de 2016.

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

PUSAVEC, F.; KRAMAR, D.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J.; Transition to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1211-1221, 2010.

RAMAZZINI, B. Introdução à higiene ocupacional. Difusão de informações em higiene ocupacional da coordenação de higiene do trabalho. Campinas, Fundacentro, pg. 180, 2001.

REICH, M.C. Economic assessment of municipal waste management system – case studies using a combination of life cycle assessment and life cycle cost. **Journal of cleaner production**. v. 13, p. 253-263, 2005.

RIBEIRO, I.; PEÇAS, P.; HENRIQUES, E. Incorporating tool design into a comprehensive life cycle cost framework using the case of injection molding. **Journal of cleaner production**. v. 53, p. 297-309, 2013.

RICOH COMPANY LTDA, 1994 – The Ricoh comet circle

URL: <http://www.ricoh.com/environment/management/concept.html>

acesado em 16 de Novembro de 2014.

ROKHMAWATIA, A.; SATHYEB, M.; SATHYEC, S. The Effect of GHG Emission, Environmental Performance, and Social Performance on Financial Performance of Listed Manufacturing Firms in Indonesia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. vol. 211, p. 461–470, 2015.

SENGUPTA, D.; ABRAHAM, J.P.; CEJA, M. GONZALEZ, M.A.; INGWERSEN, W.; RUIZ-MERCADO, G.J. Industrial process system assessment: bridging processes engineering and life cycle assessment through multiscale modeling. **Journal of Cleaner Production**. vol. 90, p.142-152, 2015.

SCHUTZER, K.; HELLENO, A.L.; PEREIRA, S.C. The influence of the Manufacturing strategy on the production of molds and dies. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 179(1-3), p.172-177, 2006.

SHUAIB, M.; SEEVERS, D.; ZHANG, X.; BADURDEEN, F.; ROUCH, K.E.; JAWAHIR, I.S. Product Sustainability Index: A metrics-based framework to evaluate the total life cycle sustainability of Manufactures products. **Journal of Industrial Ecology**. v.18, n.4, 2014.

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. **The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering**. Procedia CIRP 29, p.508-513, 2015,

SLAPNIK, M.; ISTENIC, D.; PINTAR, M.; UDOVC, A. Extending life cycle assessment normalization factors and use of machine learning – A Slovenian case study. **Ecological Indicators**. vol. 50, p.161-172, 2015.

STARR, M.K. Production Systems. In: _____. **Production management. Systems and syntheses**. Prentice Hall, 2nd ed., 1972.

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. **The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering**. Procedia CIRP 29, p.508-513, 2015.

VAN LUTTERVELT, C.A.; CHILDS, T.H.C.; JAWAHIR, I.S.; KLOCKE, F.; VENUVINOD, P.K.; Present situation and future trends in modeling of machining operations. Progress report of the CIRP working group “Modeling of machining operations”. **Annals of the CIRP**, v. 47/2/1998.

VERONES, F.; HELLWEG, S.; AZEVEDO, L.B.; CHAUDHARY, A.; COSME, N.; FANTKE P.; GOEDKOOP, M.; HAUSCHILD, M.; LAURENT, A.; MUTEL, C.L.; PFISTER, S.; PONSIOEN, T.; STEINMANN, Z.; ZELM, R.V.; VIEIRA, M.; HUIJBREGTS, M.A.J. LC-Impact Version 0.5: A spatially differentiated life cycle impact assessment approach. **LC-Impact Report**. 2016

VILLARESMETALS – Aços para molde
URL: <http://www.villaresmetals.com.br>
acessado em 21 de Abril de 2015.

XIANCHUN, T.; FEI, L.; DACHENG, L.; LI, Z.; HAIYING, W.; YIHUA, Z. Improved methods for process routing enterprise production process in terms of sustainable development II. **Tsinghua Science and Technology**. v. 11, p.693-700, 2006.

YAN, J.; LI, L. Multi-objective optimization of milling parameter – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. **Journal of Cleaner Production**. vol. 52, p.462-471, 2013.

YOON H.S.; LEE, J.Y.; KIM, M.S. AHN, S.H. Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling. **Journal of Cleaner Production**. vol. 78, p.54-62, 2014.

YUAN, C.; ZHAI, Q.; DORNFELD, D.A Three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. v. 61, p.39-42, 2012.

ZHI-GANG, J.; HUA, Z.; MING, X. Analysis model of resource consumption and environmental impact for manufacturing process. **CIRP Systems Engineering – Theory & Practice**. v.28(7), p.132-137, 2008.