



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTAO AMBIENTAL**

JÉSSICA MONFORT PEREIRA CÂMARA

**DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
AMBIENTAL EM PROCESSOS DE USINAGEM DE METAIS**

Recife, 2022

JÉSSICA MONFORT PEREIRA CÂMARA

**DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
AMBIENTAL EM PROCESSOS DE USINAGEM DE METAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Ambientais

Profa. Dra. Rogéria Mendes do Nascimento
Orientadora

Profa. Dra. Marília Regina Costa Castro Lyra
Co-Orientadora

Recife, 2022

C173d Câmara, Jéssica Monfort Pereira.
Desenvolvimento metodológico para avaliação de desempenho ambiental em processos de usinagem de metais. / Jéssica Monfort Pereira Câmara . – Recife, PE : A autora, 2022.
75 f.: color. ; il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rogéria Mendes do Nascimento.
Coorientadora: Prof^a. Dr^a Marília Regina Costa Castro Lyra.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Campus Recife, Coordenação de Pós-Graduação - Mestrado Profissional em Gestão Ambiental, 2022.

Inclui referências.

1. Usinagem. 2. Meio Ambiente. 3. Impactos Ambientais. I. Nascimento, Rogéria Mendes do. (Orientadora). II. Lyra, Marília Regina Castro Costa. (Coorientadora). III. Título.

671.35 CDD (22 Ed.)


JÉSSICA MONFORT PEREIRA CÂMARA

**DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
AMBIENTAL EM PROCESSOS DE USINAGEM DE METAIS**


Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental.

Data da aprovação: 09/06/2022


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIA MENDES DO NASCIMENTO**
Data: 23/09/2022 00:02:38-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>


Profa. Dra. Rogéria Mendes do Nascimento
Orientadora - IFPE

Documento assinado digitalmente
 **MARILIA REGINA COSTA CASTRO**
Data: 23/09/2022 07:16:09-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Marília Regina Costa Castro Lyra
Co-Orientadora - IFPE

Documento assinado digitalmente
 **JOSE ANTONIO ALEIXO DA SILVA**
Data: 23/09/2022 07:37:11-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. PhD José Antonio Aleixo da Silva
Examinador Interno - MPGA

Documento assinado digitalmente
 **LEIDJANE MARIA MACIEL DE OLIVEIRA**
Data: 27/09/2022 09:46:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira
Examinadora Externa - UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por tudo que sou.

À minha família, por todo o apoio, paciência e compreensão.

Aos colegas de trabalho, pelo suporte na condução do estudo e apoio na coleta de dados, além do constante incentivo.

Ao corpo docente do MPGA, em especial às minhas professoras orientadora e co-orientadora, pelo direcionamento no decorrer da pesquisa.

Por fim, a todos aqueles que direta- ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

No setor industrial, é perceptível a crescente preocupação das empresas com as temáticas ambientais, visando não apenas melhorar sua imagem perante seus *stakeholders*, mas também a redução de desperdícios nos processos produtivos e, conseqüentemente, dos custos de fabricação. Nesse cenário, a inovação é fundamental para a melhoria do desempenho ambiental das organizações e o conseqüente aumento de sua competitividade. No entanto, o processo estratégico de inovação deve ser orientado, visando concentrar esforços nas atividades que agreguem valor e proporcionem resultados mais significativos frente aos objetivos definidos. Desta forma, torna-se relevante a utilização de ferramentas que viabilizem a avaliação do desempenho ambiental de operações industriais, e direcionem uma atuação focada nos processos que possuem maior potencial de melhora de sua eficiência ambiental. No presente estudo, desenvolveu-se uma metodologia para avaliação do desempenho ambiental de operações de usinagem de metais que possibilita a comparação entre as diferentes operações que compõem o fluxo produtivo de um mesmo produto ou produtos distintos. O objetivo da metodologia proposta é realizar a identificação dos pontos de menor eficiência ambiental de cada operação e, conseqüentemente, orientar o processo de tomada de decisão para adequação ambiental das operações de usinagem em análise, por meio da redução de desperdícios e dos impactos ambientais ocasionados pelas atividades realizadas. Tal metodologia foi desenvolvida com base no método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), ferramenta que auxilia a tomada de decisão que envolve a análise de multicritérios. Uma vez definida a metodologia em questão, a mesma foi utilizada para quantificar os índices de desempenho ambiental das operações de usinagem presentes no fluxo produtivo de um produto da cadeia automotiva, visando demonstrar sua aplicabilidade. De posse de tais dados, foi implantado um projeto de melhoria na operação de usinagem que apresentou o pior índice de desempenho ambiental e, posteriormente, a metodologia desenvolvida foi utilizada para reavaliar o desempenho ambiental dessa operação, visando avaliar a eficácia das ações tomadas para melhoria da performance do processo.

Palavras-chave: Performance ambiental. Eficiência. Gestão ambiental.

ABSTRACT

The growing concern of industrial companies with environmental issues is noticeable, aiming not only to improve their image before their stakeholders, but also to reduce waste in production processes and, consequently, in manufacturing costs. In this scenario, innovation is essential for improving the environmental performance of organizations and the consequent increase in their competitiveness. However, the strategic innovation process must be guided, aiming to concentrate efforts on activities that add value and provide more significant results in view of the defined objectives. In this way, it becomes relevant to use tools that enable the assessment of the environmental performance of industrial operations, and direct an action focused on the processes that have the greatest potential for improving their environmental efficiency. In the present study, a methodology was developed to evaluate the environmental performance of metal machining operations that allows the comparison between the different operations that makes up the production flow of the same product or different products. The objective of the proposed methodology is to identify the topics of lowest environmental efficiency of each operation and, consequently, guide the decision-making process for the environmental adequacy of the machining operations under analysis, through the reduction of waste and the environmental impacts caused by the performed activities. This methodology was developed based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) method which is a tool that helps decision making that involves multi-criteria analysis. Once the methodology in question was defined, it was used to quantify the environmental performance indices of the machining operations present in the production flow of a product in the automotive chain, in order to demonstrate its applicability. With such data, a project to improve the machining operation was implemented, which presented the worst environmental performance index and, later, the methodology developed was used to reassess the environmental performance of this operation, in order to evaluate the effectiveness of the actions taken to improve its process performance.

Keywords: Environmental performance. Efficiency. Environmental management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Taxa de Inovação na Indústria.....	16
Figura 2 – Estrutura Hierárquica Básica.....	32
Figura 3 – Representação esquemática de uma matriz de julgamentos aos pares.....	33
Figura 4 – Critérios e respectivos subcritérios selecionados para desenvolvimento da metodologia.....	35
Figura 5 – Fluxo de produção do pinhão de comando objeto de estudo.....	48
Figura 6 – Participação mundial do consumo de energia por fonte.....	54
Figura 7 – Forma da matéria-prima utilizada na operação de Tornear.....	55
Figura 8 – Forma do pinhão de comando após a operação de Tornear.....	57
Figura 9 – Forma do pinhão de comando após a operação de Fresar Dentes.....	57
Figura 10 – Forma do pinhão de comando após a operação de Brunir.....	60
Figura 11 – Réguas abrasivas afixadas em haste de brunimento.....	63
Figura 12 – Folga existente entre as superfícies da régua abrasiva e da haste de brunimento.....	63
Figura 13 – Proposta de projeto para eliminar a folga existente entre as superfícies da régua abrasiva e da haste de brunimento.....	64
Figura 14 – Implantação do projeto proposto.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Formas de Inovação.....	18
Quadro 2 – Classificação dos processos de Usinagem Convencional.....	22
Quadro 3 – Escala Fundamental de Saaty (1980).....	32
Quadro 4 – Definição de nomenclatura e classificação dos subcritérios selecionados.....	36
Quadro 5 – Classificação de frequência e severidade de impactos ambientais.....	37
Quadro 6 – Impactos ambientais por fonte energética.....	44
Quadro 7 – Escala de pontuação definida para os subcritérios qualitativos.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada.....	34
Tabela 2 –	Definição do índice de impacto dos critérios.....	37
Tabela 3 –	Matriz de comparação paritária entre os critérios.....	38
Tabela 4 –	Matriz normalizada e peso relativo dos critérios.....	38
Tabela 5 –	Pesos atribuídos por Jiang, Zhang e Sutherland (2011) aos critérios selecionados para avaliação do desempenho ambiental de processos de usinagem.....	53
Tabela 6 –	Inventário operação de Tornear.....	56
Tabela 7 –	Inventário operação de Fresar Dentes.....	58
Tabela 8 –	Inventário operação de Brunir.....	59
Tabela 9 –	Resultados por subcritério das operações de usinagem do pinhão de comando.....	61
Tabela 10 –	Definição do índice de desempenho ambiental de operações de usinagem do pinhão de comando.....	62
Tabela 11 –	Resultados por subcritério das operações de usinagem do pinhão de comando após implantação de melhorias.....	66
Tabela 12 –	Definição do índice de desempenho ambiental de operações de usinagem do pinhão de comando após implantação de melhorias.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Análise Hierárquica de Processos)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	Consumo de Energia
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IR	Índice Randômico
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
MS	Materiais Secundários
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
NBR	Norma Brasileira
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PIB	Produto Interno Bruto
P+L	Produção Mais Limpa
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RC	Razão de Consistência
RF	Resíduos Sólidos Fluido de Corte
RM	Resíduos Sólidos Metálicos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	INDÚSTRIA BRASILEIRA E O PROCESSO DE INOVAÇÃO.....	16
3.1.1	A Indústria Metalmecânica	19
3.2	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA.....	20
3.2.1	Processos de Usinagem	21
3.3	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	25
3.3.1	Resíduos gerados nos processos de usinagem de metais	26
3.3.1.1	Sucata metálica / Cavaco.....	27
3.3.1.2	Fluidos de Corte.....	27
3.3.1.3	Ferramentas.....	28
4	METODOLOGIA	30
4.1	O MÉTODO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA PROCESSOS.....	31
4.2	ESTRUTURAÇÃO HIERÁRQUICA.....	35
4.2.1	Definição dos pesos relativos aos critérios selecionados	36
4.2.1.1	Definição dos pesos relativos aos subcritérios selecionados.....	39
4.2.2	Valoração dos subcritérios qualitativos	39
4.2.2.1	Classificação da destinação de resíduos sólidos metálicos.....	40
4.2.2.2	Classificação de fluidos de corte.....	41
4.2.2.3	Classificação de fonte energética.....	42
4.2.4.4	Definição de pontuação para subcritérios quantitativos.....	45
4.3	APLICABILIDADE PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO	46

4.3.1	Pinhão de comando.....	47
4.3.1.1	Fluxo de operações envolvidos na manufatura do pinhão de comando.....	47
4.3.1.2	Análise das operações de usinagem presentes no fluxo de manufatura do pinhão de comando.....	48
4.3.1.3	Metodologia definida para elaboração do inventário.....	49
4.3.1.3.1	Critério “Resíduos Metálicos” (RM).....	49
4.3.1.3.2	Critério “Resíduos Sólidos – Fluido de Corte” (RF).....	50
4.3.1.3.3	Critério “Consumo de Energia” (CE).....	50
4.3.1.3.4	Critério “Materiais Secundários” (MS).....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE PROCESSOS DE USINAGEM.....	52
5.2	APLICABILIDADE PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO.....	55
5.2.1	Elaboração do inventário por operação.....	55
5.2.1.1	Operação de Tornear.....	55
5.2.1.2	Operação de Fresar Dentes.....	57
5.2.1.3	Operação de Brunir.....	58
5.2.2	Definição de índice de desempenho ambiental das operações de usinagem do pinhão de comando.....	60
5.2.3	Projeto de melhoria do consumo de ferramentas na operação de brunir.....	62
5.2.3.1	Ferramentas utilizadas na operação de brunir.....	62
5.2.3.2	Definição e implantação do projeto de melhoria do consumo de ferramentas na operação de brunir.....	63
5.2.4	Reavaliação do índice de desempenho ambiental da operação de brunir após implantação das melhorias.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	68
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente e conseqüente busca contínua pelo uso de tecnologias limpas é crescente no âmbito industrial, seja com o objetivo de atender às legislações que tem se tornado cada vez mais severas, melhorar a imagem das empresas perante seus clientes ou reduzir os custos de forma geral.

É comum a ideia de que o controle ambiental é uma barreira para o desenvolvimento industrial. Porém, também vem crescendo no mercado algumas empresas com ideais inovadores e atuais, que percebem no cuidado com o meio ambiente um diferencial competitivo (BERTÉ; MAZZAROTTO, 2013). Segundo Ferigatto e Bonilla (2018), a visão empresarial ainda não é unânime, porém já se existe o entendimento que atuar de forma ambientalmente proativa não é sinônimo de despesas, mas sim um incremento para a satisfação dos *stakeholders*, controle da contaminação, melhoria do desempenho financeiro em função da abertura para novos mercados mais exigentes, bem como a obtenção de certificação ambiental com conseqüente melhora na imagem da organização.

Empresas que veem a sustentabilidade como um fator essencial para o desenvolvimento e perpetuidade do seu negócio estão constantemente buscando ferramentas para avaliar o impacto ambiental e social de seus processos, produtos e serviços (PHILIPPI JR *et al.*, 2017). Com esta finalidade, diversas empresas têm buscado cada vez mais instituir um sistema de gestão ambiental sob os padrões da norma ISO 14001, por exemplo, ou implantar programas de Produção mais Limpa (P+L).

O setor Metal Mecânico se destaca pela relevância na economia do País e pela ampla abrangência, compreendendo metalurgia, fabricação de produtos de metal e fabricação de máquinas. Tendo em vista os insumos utilizados e os resíduos gerados durante os processos industriais, destaca-se como importante causador de impactos ambientais (ANTUNES e UGAYA, 2013).

A indústria metalmeccânica é responsável pela geração de resíduos classe I, devendo ter sua atenção redobrada quanto ao seu correto armazenamento e descarte, visando não apenas atender os requisitos legais aplicáveis como garantir a preservação ambiental do meio em que está instalada. Desta forma, faz-se necessário que sejam implementados métodos robustos de avaliação dos impactos ambientais causados pelo setor em questão, de forma a prover dados confiáveis para a proposição de melhorias significativas no processo produtivo.

Neste contexto, metodologias específicas de avaliação de desempenho ambiental de processos produtivos se mostram como adequados instrumentos de auxílio à tomada de

decisão, servindo de aporte para que os gestores empresariais possam priorizar determinados projetos de melhoria em detrimento de outros, focando naqueles que resultem em uma maior eficiência ambiental do processo como um todo.

Para desenvolvimento da metodologia proposta no presente estudo, foi utilizado o método AHP, método de análise multicritério desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, visando a definição de índices de desempenho ambiental por unidade de operação de usinagem que constitui o(s) respectivo(s) processo(s) produtivo(s) sob avaliação. Tal índice serve como um parâmetro comparativo de desempenho ambiental de diferentes operações de usinagem, seja dentro do fluxo produtivo de um único produto, ou avaliando diferentes processos, possibilitando a definição de *benchmarkings*.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver metodologia de avaliação de desempenho ambiental de processos de usinagem, capaz de comparar e classificar as diferentes operações de usinagem de metais por meio da obtenção de índice de desempenho da unidade de processo/produto, visando apoiar a tomada de decisão das empresas do ramo que objetivem melhorar a performance ambiental de seus processos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar principais indicadores de desempenho ambiental envolvidos nos processos de usinagem de metais.

- Desenvolver metodologia para analisar e comparar o desempenho ambiental dos diferentes processos de usinagem de metais;

- Utilizar a metodologia proposta para determinar o índice de desempenho ambiental de processos de usinagem envolvidos na manufatura de um modelo de pinhão de comando.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

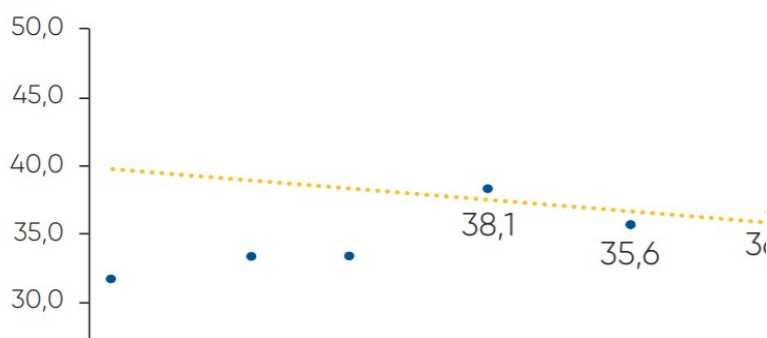
3.1 INDÚSTRIA BRASILEIRA E O PROCESSO DE INOVAÇÃO

No Brasil, as atividades industriais representam um percentual significativo de participação no Produto Interno Bruto – PIB nacional, apresentando-se, desta forma, como fundamentais ao desenvolvimento econômico e social do País. Conforme dados divulgados pela Confederação Nacional da Indústria – CNI (2022b), a indústria, como um todo, representa 22,2% do PIB do Brasil, sendo responsável pelo emprego de 9,7 milhões de trabalhadores.

A Confederação Nacional da Indústria, que representa a entidade máxima de organização do setor industrial brasileiro, publicou em 2018 o Mapa Estratégico da Indústria 2018-2022, que constitui uma agenda para o Brasil e a indústria nacional, objetivando torná-la mais competitiva, sustentável, inovadora e global, por meio da identificação dos maiores desafios a serem superados até 2022 (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018).

O Mapa Estratégico da Indústria 2018-2022 abrange 11 fatores-chave para a competitividade da indústria, dentre os quais um deles, o fator-chave Produtividade e Inovação na Empresa, abrange como um de seus temas prioritários a discussão acerca da importância da inovação no contexto industrial, traçando a meta de aumentar a taxa de inovação (quantidade de empresas que inovaram em produto ou processo em relação ao total de empresas), de 36,4%, resultado registrado no trimestre de 2012 a 2014, para 45,0%, conforme apresentado na Figura 1, por meio de uma série de iniciativas definidas no documento (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018).

Figura 1 – Taxa de Inovação na Indústria



Fonte: Confederação Nacional da Indústria, 2018

Neste contexto, percebe-se que a indústria brasileira sabe onde está e onde quer chegar, do ponto de vista de manutenção de sua competitividade no contexto mundial. Mas promover inovação não é algo simples e, executando-se de maneira inapropriada, pode resultar em uma série de prejuízos para as empresas que a empregam.

A Lei 10.973/2004, que aborda medidas de incentivo à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo, foi publicada originalmente com a definição de que inovação é a “introdução de novidade ou aperfeiçoamento no ambiente produtivo ou social que resulte em novos produtos, processos ou serviços” (BRASIL, 2004, art. 2º). No entanto, em janeiro de 2016, a referida lei teve parte do seu conteúdo alterado pela publicação da Lei 13.243/2016, que acrescentou ao conceito de inovação inicialmente definido o texto “ou que compreenda a agregação de novas funcionalidades ou características a produto, serviço ou processo já existente que possa resultar em melhorias e em efetivo ganho de qualidade ou desempenho” (BRASIL, 2016, art. 2º). Desta forma, percebe-se que inovação engloba o ato de criação de um novo produto/processo e/ou serviço ou a melhoria destes (BRASIL, 2016, art. 2º). No entanto, o significado de inovação se difere da definição de melhoria contínua, visto que este segundo conceito, de maneira geral, não engloba a capacidade de gerar mudanças duradouras ou vantagens competitivas a médio e longo prazo (POSSOLLI, 2012).

Tendo em vista a preocupação crescente do mercado consumidor em adquirir produtos e serviços que demonstrem cuidados específicos frente à temática socioambiental, é correto afirmar que o processo de inovação atrelado aos conceitos de sustentabilidade pode representar um significativo diferencial competitivo para as empresas. Barbieri e Simantob (2017) citado por Paixão (2014) afirmam que uma organização inovadora e sustentável não é a que introduz novidades de qualquer tipo, mas novidades que atendam as múltiplas dimensões da sustentabilidade em bases sistemáticas e colham resultados positivos para ela, para sociedade e o meio ambiente.

De acordo com Paixão (2014), o processo de inovação agrega valor aos produtos e serviços da empresa e envolve uma série de competências voltadas à tecnologia, ao marketing, à produção, à gerência, aos recursos humanos, à logística, ao conhecimento (*know-how*) etc. Nesse contexto, possíveis inovações quanto à sustentabilidade em relação ao *mix* de marketing da empresa encontram-se dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 – Formas de Inovação

Atributo	Potenciais alterações
Oferta	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir a utilização de combustíveis fósseis - Reduzir o volume de materiais utilizados - Reduzir a utilização de materiais não renováveis - Facilitar a reutilização e a reciclagem - Considerar se um produto é necessário ou se o benefício pode ser atingido por meio de um serviço - Substituir os materiais que trazem risco ao ambiente e às pessoas - Produtos que atendam à base da pirâmide - consumidores de menor nível social e poder de consumo
Embalagem	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir o tamanho das embalagens - Permitir a utilização de refil - Reduzir o resíduo de embalagem - Utilizar materiais de mais rápida degradação
Qualidade	<ul style="list-style-type: none"> - Estender a vida do produto - Planejar para o máximo de reparo - Planejar modularmente o produto para permitir melhorias (<i>upgrades</i>) sem a necessidade de troca de versão
<i>Design</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Utilização de <i>designs</i> energeticamente eficientes (biomimétrica) - Design planejado para o ciclo de vida
Variedade	<ul style="list-style-type: none"> - Variedade que considera a mínima complexidade/o mínimo estoque
Marca	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da transparência nas relações com os consumidores - Compromisso com a entrega das promessas de marca
Tamanhos	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuir espaços vazios - Reduzir a utilização de matéria prima - Concentração dos produtos diluídos em água (dada a escassez em algumas partes do planeta)
Serviços	<ul style="list-style-type: none"> Aumento do componente intangível nas ofertas (mais serviços) Condições favoráveis de trabalho dos colaboradores na empresa
Garantias/ Devoluções	<ul style="list-style-type: none"> Aumentar a estrutura para reparos e <i>upgrades</i> Aumentar os prazos de garantia quando apropriado

Fonte: Paixão (2014)

É preciso considerar também que a inovação não se restringe apenas a produtos, sendo aplicável também a processos. Dessa forma, as temáticas relacionadas à concepção de produtos e processos inovadores estão igualmente em pauta. Às vezes, uma solução inovadora em um modo de produção permite que o custo dessa produção seja significativamente reduzido, podendo gerar mais lucro e colocar a empresa em vantagem competitiva com relação a seus concorrentes (ACADEMIA PEARSON, 2011).

Galia, Mancini e Morandi (2012) citado por Silva Filho, Braga e Rebouças (2017), afirmam que o desenvolvimento da inovação é um desafio caro e incerto, que exige habilidades qualificadas, uma grande quantidade de recursos financeiros e informações, assim como uma atitude de risco.

Nesse cenário, é fato que a inovação demanda investimentos e a disponibilização de recursos pelas empresas que objetivam promovê-la visando manter-se competitivas no contexto em que estão inseridas. Assim, para garantir a perpetuidade do negócio, é importante perceber que o processo de inovação deve fundamentar-se em um planejamento estratégico eficiente, de forma a potencializar os impactos positivos das alterações realizadas e minimizar possíveis impactos adversos provenientes delas. Dessa forma, a utilização de métodos robustos de avaliação de desempenho de produtos/processos torna-se relevante, uma vez que permite a priorização de atividades focadas em itens de maior criticidade, frente aos objetivos definidos para o projeto proposto.

3.1.1 A Indústria Metalmeccânica

A indústria de transformação tem uma importante participação nos contextos econômico e social do Brasil, envolvendo a transformação física, química e biológica de materiais, substâncias e componentes com a finalidade de se obterem produtos novos.

Conforme dados da Confederação Nacional da Indústria (2022a), a indústria de transformação brasileira representa 11,3% do PIB do Brasil e responde por 46,2% das exportações brasileiras de bens e serviços e por 65,1% do investimento empresarial em pesquisa e desenvolvimento, empregando 6,9 milhões de trabalhadores, o que representa um total de 14,8% de participação no emprego formal do Brasil.

Um dos principais segmentos da indústria de transformação é a indústria metalmeccânica, que consiste nas transformações de metais como matéria-prima em produtos para outras indústrias ou consumidor final. Os segmentos que englobam a indústria metalmeccânica são os de fabricação de estruturas metálicas, tanques, forjaria, estamparia,

metalurgia do pó, usinagem, soldagem, tratamento e revestimento de metais, artigos de cutelaria, artigos de serralharia, ferramentas, artigos bélicos, entre outros produtos metálicos (IBGE, 2019).

3.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA

Para que se obtenha a forma desejada de um produto, faz-se necessário que a matéria-prima seja transformada por meio de processos de fabricação. De acordo com Fracaro (2017), os processos de fabricação podem ser classificados em processos que alteram a forma da matéria-prima e aqueles que não o fazem, mas modificam alguma propriedade específica do material, a exemplo de tratamentos térmicos e tratamentos de superfície. No caso dos processos em que a forma do material é alterada, há a subdivisão em processos que diminuem, conservam ou aumentam a massa do material inicial. Processos de soldagem, por exemplo, caracterizam-se como aqueles em que a massa final do material sofre um acréscimo. Nos processos de conformação, por sua vez, a massa inicial do produto é conservada, porém ocorre uma alteração na sua forma (características dimensionais). Processos de usinagem, por fim, caracterizam-se pelo produto final apresentar uma redução da massa em relação à matéria-prima.

Desta forma, conforme definido por Fracaro (2017), em resumo, os processos de fabricação em que a forma do produto é alterada podem ser divididos em processos sem a remoção de material (incluindo a fundição, soldagem, metalurgia do pó e processos de conformação) e aqueles em que material (cavaco) é removido para a obtenção do produto (processos de usinagem).

Segundo Lira (2017), nos denominados processos de conformação, o material é conformado dentro de um molde ou matriz, por meio de técnicas que se utilizem ou não da influência da temperatura durante o processo, a exemplo de operações como o forjamento, extrusão, laminação, estampagem e trefilação, processos nos quais o material a ser transformado se deforma plasticamente ($\sigma_{\text{trabalho}} < \sigma_{\text{ruptura}}$). Quantos às técnicas de fabricação em que ocorre a remoção de material, a resistência mecânica está na região de ruptura ($\sigma_{\text{trabalho}} > \sigma_{\text{ruptura}}$), a exemplo dos processos de usinagem.

Nos processos de fabricação, geralmente diferentes métodos podem ser empregados para a obtenção de um determinado componente. Ainda, na maioria das vezes, faz-se necessário a execução de vários processos sequenciais para a obtenção do produto final. A seleção de um determinado método ou um conjunto deles é resultado da avaliação de uma

série de fatores, que considera não apenas os requisitos técnicos do produto, mas também se baseia em considerações econômicas, visando tornar o processo produtivo mais eficiente e, desta forma, tornar o produto competitivo no mercado (MACHADO *et al.*, 2015).

De um modo geral, os processos de conformação mecânica não são utilizados para produzir os produtos em sua totalidade, visto que muitas vezes não se apresentam economicamente viáveis à finalidade proposta ou não são capazes de fornecer o acabamento ou a precisão geométrica e dimensional desejados no produto. Assim, costuma-se realizar os processos de usinagem posteriormente aos processos de conformação, a depender dos requisitos dimensionais e funcionais do produto manufaturado (LIRA, 2017; REBEYKA, 2016).

3.2.1 Processos de Usinagem

Na indústria metalmeccânica, um dos principais processos utilizados para agregar valor à matéria prima e transformá-la em produto final é o processo de usinagem. Ferraresi (1970), define as operações de usinagem como “aquelas que, ao conferir forma à peça, ou dimensões ou acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco”. Por sua vez, o termo cavaco é definido por Ferraresi (1970) como sendo “a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

Desta forma, conforme definido por Kiminami *et al.* (2013), a usinagem nada mais é que um conjunto de processos de manufatura, sejam estes os processos de corte, processos abrasivos ou processos avançados de usinagem, em que uma ferramenta é utilizada para remover excesso de material (cavaco) de um sólido, de forma que o produto resultante apresente a geometria desejada. Assim, a partir da combinação de operações sequenciais de usinagem, pode-se obter uma variedade de formas e alta complexidade de produtos, com estreitas tolerâncias dimensionais (menores que 25 μm) e acabamentos superficiais melhores que 0,4 μRa .

Em seu livro intitulado “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, publicado em 1970 e considerado um marco histórico no estudo dos processos de usinagem no Brasil, o autor Dino Ferraresi apresenta a escassez de literatura especializada acerca do tema no período em questão, o que o motivou a escrever o referido livro bem como sugerir à Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT a instalação de uma comissão para elaborar estudos objetivando a elaboração de normas para padronização e classificação dos processos de usinagem de metais. Desta forma, os processos de usinagem foram normatizados no Brasil pela norma

ABNT NBR 6175, de 1971, que foi cancelada e substituída por sua versão de 2015, norma essa que tem por objetivo a nomenclatura, definição e classificação dos processos mecânicos de usinagem.

É importante salientar que as operações de usinagem podem ser subdivididas em desbaste e acabamento. No desbaste, objetiva-se garantir elevada taxa de remoção de material, sendo, portanto, limitado pela potência da máquina-ferramenta. Já as operações de acabamento objetivam finalizar a peça por meio da remoção do sobremetal deixado pelas operações de desbaste e priorizar a qualidade final do componente, bem como a precisão geométrica e dimensional requerida no produto (MACHADO *et al.*, 2015; REBEYKA, 2016).

No Quadro 2, encontram-se definidos os processos de usinagem convencional segundo Ferraresi (1970).

Quadro 2 – Classificação dos processos de Usinagem Convencional

Processo	Definição
Torneamento	Processo Mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.
Aplainamento	Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies regradadas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou da ferramenta.
Furação	Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina.
Alargamento	Processo mecânico de usinagem destinado ao desbaste ou ao acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, com auxílio de ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta.

Rebaixamento	Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de uma forma qualquer na extremidade de um furo. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta.
Mandrilamento	Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam simultaneamente segundo uma trajetória determinada.
Fresamento	Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer.
Serramento	Processo mecânico de usinagem destinado ao seccionamento ou recorte com auxílio de ferramentas multicortantes de pequena espessura. Para tanto, a ferramenta gira ou se desloca, ou executa ambos os movimentos e a peça se deslocam ou se mantêm parada.
Brochamento	Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com auxílio de ferramentas multicortantes. Para tanto, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo da ferramenta.
Roscamento	Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação.
Limagem	Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com auxílio de ferramentas multicortantes (elaboradas por picagem) de movimento contínuo ou alternativo.
Rasqueteamento	Processo manual de usinagem destinado à ajustagem de superfícies com auxílio de ferramenta monocortante.
Tamboreamento	Processo mecânico de usinagem no qual as peças são colocadas no

	interior de um tambor rotativo, juntamente ou não com materiais especiais, para serem rebarbadas ou receberem um acabamento.
Retificação	Processo de usinagem por abrasão destinado à obtenção de superfícies com auxílio de ferramenta abrasiva de revolução. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada, podendo a peça girar ou não.
Brunimento	Processo mecânico de usinagem por abrasão empregado no acabamento de furos cilíndricos de revolução, no qual todos os grãos ativos da ferramenta abrasiva estão em constante contato com a superfície da peça e descrevem trajetórias helicoidais. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e se desloca axialmente com movimento alternativo.
Superacabamento	Processo mecânico de usinagem por abrasão empregado no acabamento de peças, no qual os grãos ativos da ferramenta abrasiva estão em constante contato com a superfície da peça. Para tanto, a peça gira lentamente e a ferramenta se desloca com movimento alternativo de pequena amplitude e frequência relativamente grande.
Lapidação	Processo mecânico de usinagem por abrasão executado por abrasivo aplicado por porta-ferramenta adequado, com objetivo de se obter dimensões especificadas da peça.
Espelhamento	Processo mecânico de usinagem por abrasão no qual é dado o acabamento final da peça por meio de abrasivos, associados a um porta ferramenta específico para cada tipo de operação, com o fim de se obter uma superfície especular.
Polimento	Processo mecânico de usinagem por abrasão no qual a ferramenta é constituída por um disco ou conglomerado de discos revestidos de substâncias abrasivas.
Lixamento	Processo mecânico de usinagem por abrasão executado por abrasivo aderido a uma tela e movimentado com pressão contra a peça.
Jateamento	Processo mecânico de usinagem por abrasão no qual as peças são submetidas a um jato abrasivo, para serem rebarbadas, asperizadas ou receberem um acabamento.
Afiação	Processo mecânico de usinagem por abrasão, no qual é dado o

	acabamento das superfícies da cunha cortante da ferramenta, com o fim de habilitá-la desempenhar sua função. Desta forma, são obtidos os ângulos finais da ferramenta.
--	--

Fonte: Autora, adaptado de Ferraresi (1970)

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Todo processo produtivo gera resíduos, que podem ser considerados como as perdas do processo, ou seja, todo o material necessário à produção de um determinado produto que não se transforma no produto final, sendo um indicativo, portanto, da ineficiência do processo. A geração de resíduos, dessa forma, não agrega valor, mas sim custos ao produto produzido, devendo ser controlada e minimizada. A NBR 10004:2004 define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p.1).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, instituída em 2010 através da Lei Federal nº 12.305, define em seu artigo 13º que resíduos industriais são aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais e define que a responsabilidade pela destinação desses resíduos é do próprio gerador. A referida lei foi regulamentada em 2010 por meio do Decreto nº 7.404, que estabelece, dentre outras diretrizes, as responsabilidades do poder público e dos geradores de resíduos sólidos, incluindo, dentre estes, as indústrias, no que tange a execução da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

De acordo com a NBR 10004/2004, os resíduos podem ser classificados em três classes:

a) Classe I - Perigosos: resíduos que apresentam periculosidade, ou seja, aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando gerenciados de forma inadequada. Ainda, classificam-se como resíduos classe I, aqueles que

apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

b) Classe II A - Não perigosos e não inertes: não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

c) Classe II B - Não perigosos e inertes: quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004).

Segundo Barana, Tommaso e Gomes (2011), diversos setores têm buscado minimizar a geração de resíduos, substituindo as “tecnologias de fim-de-tubo” (que objetivam tratar efluentes, não evitar sua geração) pelo trabalho em termos de prevenção, a exemplo da implantação de programas de Produção mais Limpa (P+L), em que os esforços são focados no processo e não mais apenas nos resíduos gerados. Nesse contexto, inicia-se o investimento em programas de reciclagem interna, boas práticas de fabricação, seleção de matérias-primas adequadas, otimização da produção e alterações no projeto do produto, objetivando a redução no consumo de matéria-prima, energia e água.

Porém, apesar dos investimentos e esforços com a prevenção, o fato é que a geração de resíduos é inerente aos processos produtivos, devendo estes resíduos serem adequadamente tratados e/ou dispostos em conformidade com a legislação vigente. Para tal, faz-se necessário o emprego de processos físicos, químicos e biológicos, utilizados para depurar resíduos sólidos, líquidos ou gasosos (BARANA; TOMMASO; GOMES, 2011).

3.3.1 Resíduos gerados nos processos de usinagem de metais

Os principais resíduos continuamente gerados no processo de usinagem de metais são o cavaco, fluido de corte, sucata metálica e ferramentas de corte.

Vale ressaltar que existem uma série de outros materiais necessários à realização das operações de usinagem que serão destinados como resíduos do processo, cuja utilização é inerente à atividade, porém não gerada diretamente por ela, a exemplo de itens necessários à proteção do operador do equipamento, ao acondicionamento das matérias-primas ou resíduos gerados ou à manutenção do ambiente e/ou registros da atividade realizada.

Barbacovi et al. [201-], cita alguns exemplos desses resíduos, a saber: resíduos perigosos de varrição, resíduos de papel e/ou papelão, bombonas plásticas/tambores metálicos, resíduos têxteis contaminados, borras de retífica, resíduos de tintas pigmentos e

corantes, materiais contaminados com óleo, entre outros.

3.3.1.1 Sucata metálica / Cavaco

Para processos de usinagem de metais, quando um produto não atende às especificações do projeto, ele é denominado sucata metálica, ou seja, um material metálico que não é adequado ao uso pretendido, sendo, desta forma, descartado. O cavaco, por sua vez, é uma porção de material retirada do produto durante o processo de usinagem, caracterizando-se por sua forma irregular. Desta forma, tanto a sucata quanto o cavaco são constituídos do mesmo material, devendo ser adequadamente destinados visando a minimização de impactos ambientais.

3.3.1.2 Fluidos de Corte

Os fluidos de corte são amplamente utilizados nos processos de usinagem de materiais, visando aumentar sua eficiência e estabelecer as condições adequadas para a fabricação do produto. De acordo com Machado *et al.* (2015), nos processos de usinagem, os fluidos de corte têm como principais funções a lubrificação a baixas velocidades de corte, a refrigeração a altas velocidades de corte, a remoção de cavacos da zona de corte bem como a proteção contra a oxidação da peça e da máquina-ferramenta, podendo ser classificados em óleos, emulsões e soluções. Os fluidos de corte à base de óleo (derivado de óleos minerais, animais, vegetais ou sintéticos) são normalmente utilizados em operações que exigem uma boa propriedade lubrificante, enquanto os fluidos de corte à base de água (emulsões e soluções) são preferíveis quando se deseja propriedades de refrigeração e lubrificação em paralelo (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Rebeyka (2016) afirma que os fluidos de corte geram dois tipos de resíduos. O primeiro tipo é gerado em razão das altas temperaturas dos processos de usinagem, que ocasionam a evaporação de parte dos fluidos, a exemplo dos vapores, fumos, gases e fumaças. O segundo tipo, caracterizado pelos efluentes sólidos e líquidos, é gerado quando o fluido de corte perde suas propriedades funcionais e deve ser substituído. O descarte inadequado desses resíduos pode ocasionar doenças respiratórias nos operadores, ou a degradação do solo e/ou recursos hídricos.

Segundo Machado *et al.* (2015), em geral, o descarte de fluidos de corte é mais frequente que sua reciclagem, visto que esta normalmente apresenta custos elevados.

Conforme estabelecido pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 362 de 2005, o rerrefino é o único destino legal para óleos lubrificantes usados no Brasil, processo caracterizado pela remoção de contaminantes, produtos de degradação e aditivos dos óleos lubrificantes usados ou contaminados, conferindo aos mesmos características de óleos básicos, de acordo com legislação específica (CONAMA, 2005).

Os principais contaminantes dos fluidos de corte, podem ser artificiais - cavacos, lubrificantes de máquinas, corpos estranhos, entre outros - e os naturais - bactérias, microorganismos e fungos – que podem gerar problemas no processo de fabricação, ataques à saúde dos operadores e até o descarte prematuro deste produto (IGNÁCIO, 1998).

A aplicação de fluidos de corte cria severos impactos ambientais, como a poluição ou contaminação da água, do solo, e do ar, além de problemas para a saúde dos operadores (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013). Além disto, o crescimento bacteriano nos fluidos de corte leva significativamente à presença de massas microbianas e particularmente de endotoxina na atmosfera da fábrica. Assim, costuma-se adicionar aditivos biocidas para controlar o crescimento bacteriano nos fluidos de corte. No entanto, a descarga dos fluidos de corte contendo biocidas pode afetar o processo de decomposição natural, de forma que alguns municípios proíbem o descarte de biocidas nos sistemas de esgoto (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Desta forma, é tendência mundial a busca pelo desenvolvimento de técnicas que possam reduzir o consumo de fluidos de corte na indústria, de forma a reduzir ou até mesmo eliminar impactos adversos causados por sua utilização. Neste contexto, algumas alternativas têm sido estudadas para substituir os métodos tradicionais de refrigeração, como a técnica de mínima quantidade de lubrificante – MQL, usinagem a seco e o uso de fluidos de corte ecológicos (ar, fluido polimérico, fluido biodegradável etc.) (ALVES; OLIVEIRA, 2006).

3.3.1.3 Ferramentas

As ferramentas de corte são substituídas quando perdem a sua capacidade de corte, podendo, em alguns casos, ser reafiadas e reutilizadas nos processos de usinagem. Porém, quando estas não atendem mais às especificações necessárias ao uso proposto, em função de inviabilidade de sua afiação, as mesmas são substituídas e descartadas como resíduos industriais.

De acordo com Rebeyka (2016), a seleção do material de composição da ferramenta é baseada em critérios como o tipo de operação de usinagem, a dureza do material da peça, o

tipo de corte (contínuo ou intermitente), o grau de qualidade exigido, a temperatura de trabalho e a rigidez da máquina. Os principais materiais utilizados na fabricação de ferramentas são o aço rápido, o metal duro, o metal duro com cobertura, o cermet e materiais cerâmicos.

4 METODOLOGIA

A metodologia de avaliação de desempenho ambiental de processos de usinagem proposta no presente estudo foi desenvolvida com base na Análise Hierárquica de Processos (AHP), uma ferramenta de análise multicritério que permite a integração e comparação de dados de diferentes naturezas.

A metodologia aqui desenvolvida foi adaptada daquela proposta por Jiang, Zhang e Sutherland (2011). Tais autores desenvolveram um método capaz de avaliar o desempenho ambiental de processos de fabricação baseado na ferramenta AHP, considerando como critérios de análise os consumos de matéria-prima, materiais secundários e energia, bem como emissões atmosféricas, resíduos líquidos e sólidos gerados nos processos. Nesta metodologia, definiu-se que os valores obtidos para os critérios deveriam ser normalizados (tornados adimensionais), dividindo o valor medido para o respectivo critério na operação em análise pelo maior valor realizável para o mesmo, ou seja, limites legais, *benchmarkings* internos ou externos, capacidades do processo ou do equipamento ou quaisquer valores definidos pela empresa ou legislação aplicável.

A metodologia aqui proposta visa complementar aquela desenvolvida por Jiang, Zhang e Sutherland (2011), visto que ela propõe a utilização integrada de critérios qualitativos e quantitativos na análise, bem como considera o conceito de eficiência de processos para obtenção do índice comparativo de desempenho ambiental, priorizando, assim, a intervenção nos processos que se mostrem menos eficientes em relação aos demais, ou seja, que possivelmente possuam maior campo de atuação para implantação de melhorias.

Diante do exposto, a presente metodologia consistiu nas seguintes etapas:

1. Aplicação da ferramenta AHP para desenvolvimento da metodologia proposta.
2. Definição dos principais indicadores de desempenho ambiental comuns aos diferentes processos de usinagem de metais. Tal etapa se deu por meio de revisão bibliográfica profunda acerca do tema, visando definir os critérios a serem utilizados na avaliação dos processos de usinagem por uma perspectiva ambiental. Os critérios definidos foram desdobrados em subcritérios quantitativos e/ou qualitativos, possibilitando, desta forma, a construção da estruturação hierárquica que norteou o desenvolvimento da metodologia.

3. A metodologia desenvolvida foi aplicada em uma indústria metalmeccânica, visando a avaliação dos processos de usinagem associados à manufatura de um modelo de pinhão de comando. Para tal, foi elaborado um inventário de todos os parâmetros selecionados nas operações de usinagem avaliadas, para obtenção de dados de análise em um período de doze meses. De posse de tal inventário, a metodologia proposta foi empregada, objetivando a obtenção de índices de desempenho ambiental dos processos de usinagem avaliados, possibilitando, dessa forma, sua comparação. Assim, a metodologia desenvolvida poderá ser utilizada como ferramenta no apoio à tomada de decisão empresarial, visando a priorização da implantação de melhorias em processos que apresentem menor eficiência ambiental.

4.1 O MÉTODO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

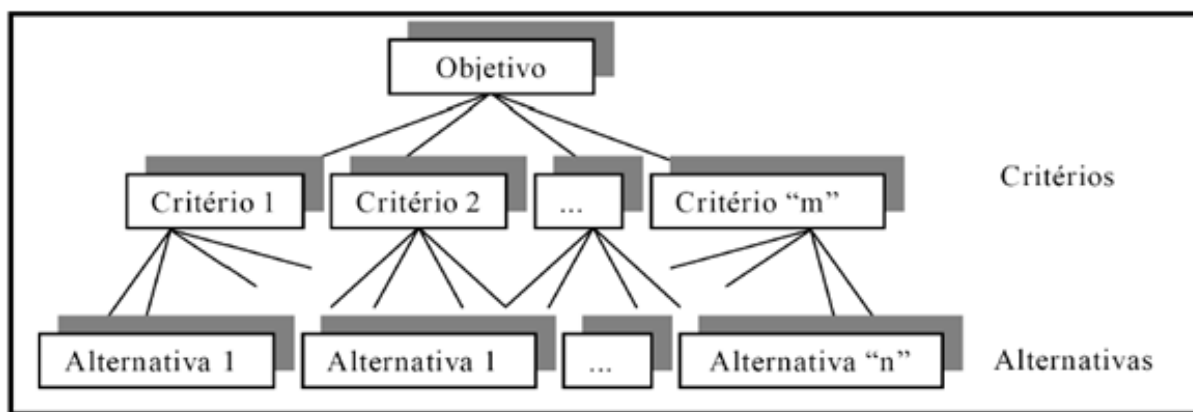
O Processo Analítico Hierárquico, do inglês *Analytic Hierarchy Process* (AHP), foi desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1980, nos Estados Unidos, apresentando-se como um dos métodos de análise multicritérios mais difundidos e utilizados globalmente no apoio à tomada de decisão (PIMENTA *et al*, 2019).

O AHP é um método que se caracteriza pela capacidade de analisar um problema de tomada de decisão decompondo-o em fatores, que por sua vez são decompostos em um novo nível de fatores, e assim por diante até determinado nível, construindo, desta forma, uma cadeia de níveis hierárquicos, na qual os objetivos finais devem estar no topo, e na base da hierarquia estão os vários resultados possíveis, os cenários (LONGARAY; BUCCO, 2010).

Conforme descrito por Costa (2002), este método baseia-se em três princípios do pensamento analítico:

a) Construção de hierarquias: No método AHP, o problema é estruturado em níveis hierárquicos, visando buscar uma melhor compreensão e detalhamento do mesmo, no qual os elementos chave para a tomada de decisão são identificados e agrupados em conjuntos afins, sendo alocados em camadas específicas da hierarquia. Segundo Colin (2007), citado por Longaray e Bucco (2010), a hierarquia deve ser construída de modo que os elementos no mesmo nível estejam relacionados com elementos do próximo nível. A Figura 2 apresenta a estrutura hierárquica básica do método AHP.

Figura 2 – Estrutura Hierárquica Básica



Fonte: Marins, Souza e Barros (2009)

b) Definição de prioridades: fundamenta-se na habilidade do ser humano de perceber o relacionamento entre objetos e situações observadas, comparando pares à luz de um determinado foco ou critério (julgamentos paritários). De acordo com Tedesco, Oliveira e Trojan (2021), o método AHP direciona os especialistas a avaliar a importância relativa de cada critério na hierarquia estabelecida, sendo tais julgamentos traduzidos em números, que são referidos como pesos.

Quadro 3 – Escala Fundamental de Saaty (1980)

1	Igual Importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada de um sobre o outro	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou o juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Bandeira e Correia (2006)

De acordo com Lyra (2008) citado por Caríssimo (2014), esses julgamentos devem ser quantificados aos pares de critérios, I_i e I_j , sendo representados por uma matriz quadrática ($n \times n$), uma vez que a comparação será sempre paritária (um a um). Assim, estas matrizes são

positivas e recíprocas (SAATY, 1987 citado por CARÍSSIMO, 2014), ou seja, sendo $a_{ij} > 0$, $a_{ji} = 1/a_{ij}$, conforme disposto na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática de uma matriz de julgamentos aos pares

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \text{ onde:}$$

$$\begin{aligned} a_{ij} > 0 &\Rightarrow \textit{positiva} \\ a_{ij} = 1 &\therefore a_{ji} = 1 \\ a_{ij} = 1/a_{ji} &\Rightarrow \textit{recíproca} \\ a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk} &\Rightarrow \textit{consistência} \end{aligned}$$

Fonte: Marins, Souza e Barros (2009)

Uma vez elaborada a matriz de julgamentos aos pares, a próxima fase para aplicação da metodologia AHP é a obtenção do quadro de julgamentos normalizados. Conforme definido por Santos (2008), o cálculo de normalização é realizado através da divisão de cada elemento da coluna da matriz de julgamentos pelo respectivo somatório dos elementos dessa coluna. A matriz resultante do processo é chamada de matriz normalizada, sendo definida como:

$$A' = [a'_{ij}] \text{ onde } a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{ik} \text{ para } 1 \leq i \leq n, \text{ e } 1 \leq j \leq n \quad (1)$$

Após a normalização dos dados da matriz de julgamentos aos pares, o próximo passo consiste em definir o peso de cada critério, calculado pela média aritmética dos valores de cada linha (LYRA, 2008 citado por CARÍSSIMO, 2014). Santos (2008) afirma que tais pesos são dados por:

$$W = [W_k] \text{ onde } W_k = \sum_{i=1}^n a'_{ij} / n \text{ para } 1 \leq j \leq n, \text{ e } 1 \leq k \leq n \quad (2)$$

c) Consistência lógica: No AHP, é possível avaliar o modelo de priorização construído quanto a sua consistência. Saaty (1991) citado por Santos (2008) propõe procedimentos que permitem avaliar a consistência dos julgamentos, sendo eles:

- Cálculo do Índice de Consistência (IC), que avalia o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários, através da seguinte equação:

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (3)$$

Em que n é o número de ordem da matriz e λ_{max} = autovalor.

Saaty (1980) citado por Martins (2011) estabelece que a estimativa do autovalor é dada pela seguinte expressão:

$$\lambda_{máximo} = w \cdot v \quad (4)$$

Em que w é calculado pela soma das colunas da matriz de comparações e o vetor prioridade v.

- Cálculo da Razão de Consistência (RC), que permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz de julgamentos, por meio da expressão abaixo, conforme definido por Bispo *et al* (2020).

$$RC = IC/IR \quad (5)$$

Em que IR é um índice randômico dado em função da ordem da matriz (n), conforme apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,53	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

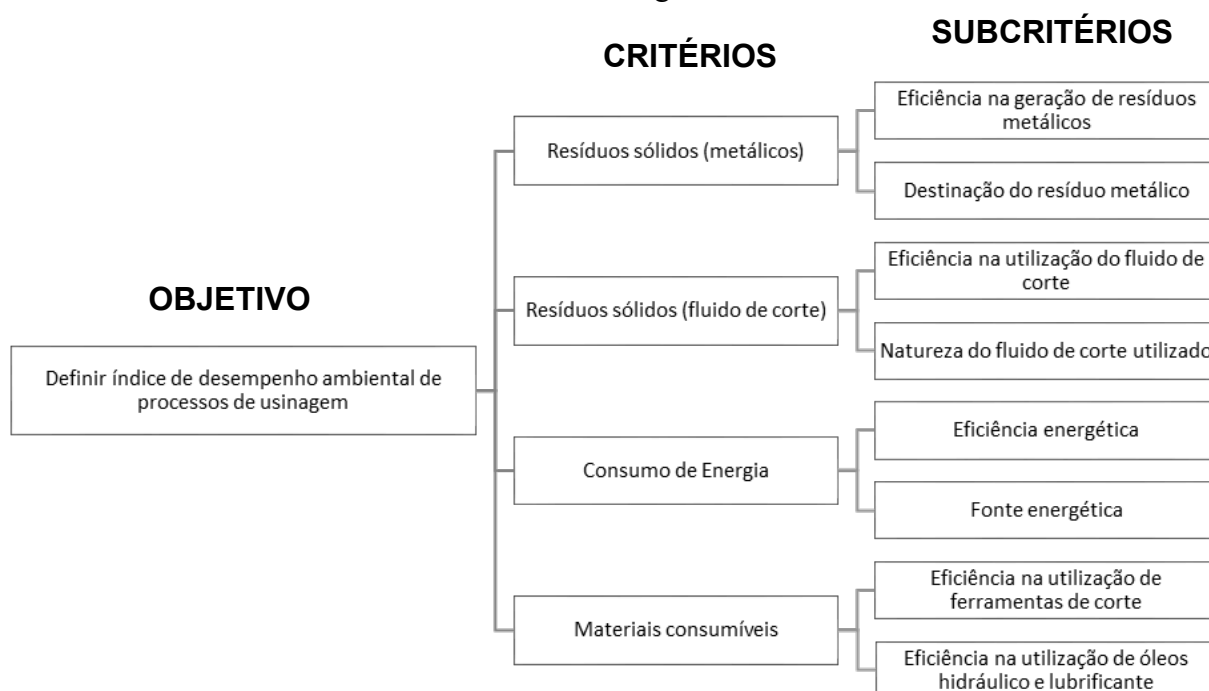
Fonte: Saaty (2008) citado por Bispo *et al* (2020)

De acordo com Bispo *et al* (2020), quanto mais próxima do valor "0" for a razão de consistência, mais coerente é o modelo. Para valores de $RC > 0,10$, se faz necessário uma revisão na matriz de comparações, uma vez que o julgamento dos condicionantes apresenta incoerências.

4.2 ESTRUTURAÇÃO HIERÁRQUICA

O objetivo global do presente estudo consistiu em determinar índices de desempenho ambiental de processos de usinagem, possibilitando sua comparação. Uma vez definido tal objetivo, foi proposto um modelo de estrutura hierárquica necessário para aplicação da metodologia de Análise Hierárquica de Processos, conforme apresentado na Figura 4, de forma que cada processo de usinagem analisado possa ser avaliado de acordo com os critérios e respectivos subcritérios selecionados.

Figura 4 – Critérios e respectivos subcritérios selecionados para desenvolvimento da metodologia



Fonte: Autora, 2021

O Quadro 4, por sua vez, apresenta a nomenclatura adotada para os subcritérios selecionados, bem como a classificação dos mesmos (qualitativo ou quantitativo).

Quadro 4 – Definição de nomenclatura e classificação dos subcritérios selecionados para aplicação da metodologia proposta

Critério	Subcritério	Classificação
Resíduos sólidos metálicos (RM)	S.RM.1 - Eficiência da transformação da matéria-prima em produto (geração de resíduo sólido – cavaco e/ou sucata)	Quantitativo
	S.RM.2 - Destinação dada ao resíduo sólido metálico gerado na operação	Qualitativo
Resíduos sólidos – fluido de corte (RF)	S.RF.1 – Eficiência na utilização de fluidos de corte	Quantitativo
	S.RF.2 – Natureza do fluido de corte utilizado	Qualitativo
Consumo de Energia (CE)	S.CE.1 - Eficiência energética da operação	Quantitativo
	S.CE.2 - Fonte energética (solar, eólica etc.)	Qualitativo
Materiais secundários (MS)	S.MS.1 - Eficiência na utilização de ferramentas de corte (avaliação do desgaste de ferramentas)	Quantitativo
	S.MS.2 - Eficiência na utilização de óleo hidráulico e óleo lubrificante	Quantitativo

Fonte: Autora, 2021

Outros possíveis critérios de avaliação de operações de usinagem são a geração de resíduos sólidos ocasionada pela troca de componentes de máquina (ou o descarte do equipamento como um todo), emissões atmosféricas, ruído, vibração, consumo de água e geração de efluentes. Entretanto, uma vez que estes critérios possuem um menor volume e/ou menor frequência de ocorrência frente aos demais critérios selecionados, além de uma grande similaridade entre as diferentes operações de usinagem, os mesmos foram desconsiderados no desenvolvimento da presente metodologia.

4.2.1 Definição dos pesos relativos aos critérios selecionados

Como método auxiliar à tomada de decisão para definição dos pesos (prioridades) associados a cada critério selecionado, foi utilizada metodologia de avaliação de aspectos e impactos ambientais, considerando os parâmetros de frequência e severidade dos mesmos. A

avaliação de abrangência do impacto ambiental, comumente utilizada em análises de aspectos e impactos ambientais no ramo empresarial, foi desconsiderada do presente estudo, uma vez que, para os diferentes processos de usinagem, não existem variações significativas de abrangência frente aos impactos por eles gerados.

O Quadro 5 apresenta as classificações dos parâmetros “frequência” e “severidade” de impactos ambientais, definidas de acordo com Caldas (2015), bem como as pontuações adotadas para cada um desses parâmetros.

Quadro 5 – Classificação de frequência e severidade de impactos ambientais

Parâmetro	Classificação	Pontuação
Frequência	Baixa – impacto ambiental ocorre com pouca frequência (por exemplo, uma vez por mês) ou nunca ocorreu	1
	Média – impacto ambiental ocorre com frequência relativa (por exemplo, mais de uma vez por mês)	2
	Alta – impacto ambiental ocorre com frequência diária	3
Severidade	Leve – impacto ambiental com danos poucos significativos ao meio ambiente, sendo reversível no curto prazo	1
	Relevante – impacto ambiental com médio comprometimento do meio ambiente, sendo reversível no médio prazo	2
	Crítica – impacto ambiental com danos graves ao meio ambiente, sendo dificilmente reversível ou até mesmo irreversível	3

Fonte: Autora, 2021, adaptado de Caldas (2015)

Com base nessa abordagem, foram definidos os índices de impacto dos critérios apresentados na Tabela 2, calculados através da multiplicação entre as pontuações atribuídas à frequência e severidade dos impactos ambientais decorrentes da ocorrência dos mesmos, conforme apresentado no Quadro 5 acima disposto.

Tabela 2 – Definição do índice de impacto dos critérios

Critério	Frequência	Severidade	Índice de Impacto
Resíduos sólidos metálicos	3	2	6
Resíduos sólidos – fluido de corte	3	3	9
Consumo de energia	3	2	6
Materiais secundários	3	1	3

Fonte: Autora, 2021

Vale ressaltar que foi tomado como base um cenário produtivo de médias e grandes empresas do setor metalmeccânico para a atribuição das pontuações de frequência, ao utilizar a ferramenta de avaliação de aspectos e impactos ambientais, tendo em vista que se considerou uma frequência diária de ocorrência dos impactos ambientais para todos os critérios avaliados. No entanto, é importante ressaltar que as pontuações aqui definidas devem ser alteradas a depender do contexto específico da organização em que a metodologia venha a ser aplicada.

Assim, de posse dos índices de impacto definidos para cada um dos critérios selecionados dispostos na Tabela 2, elaborou-se uma tabela de comparação aos pares, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3, visando a obtenção dos pesos relativos a cada critério.

Tabela 3 – Matriz de comparação paritária entre os critérios

Critério	RM	RF	CE	MS
RM	1	2/3	1	2
RF	3/2	1	3/2	3
CE	1	2/3	1	2
MS	1/2	1/3	1/2	1
SOMA	4	2 2/3	4	8

Fonte: Autora, 2021

Os valores definidos para os critérios foram normalizados, sendo o valor de importância de cada par dividido pelo somatório dos valores de cada coluna. A determinação do valor do peso (W_i) de cada critério foi obtida pelo somatório dos valores de cada linha, dividido pelo número de critérios analisados, conforme disposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Matriz normalizada e peso relativo dos critérios

Critério	RM	RF	CE	MS	Wi (peso)
RM	1/4	1/4	1/4	1/4	0,250
RF	3/8	3/8	3/8	3/8	0,375
CE	1/4	1/4	1/4	1/4	0,250
MS	1/8	1/8	1/8	1/8	0,125

Fonte: Autora, 2021

Conforme definido por Saaty (2008) citado por Bispo *et al* (2020), após comparação dos critérios aos pares, faz-se necessário avaliar o grau de consistência da matriz, visando confirmar a validade dos resultados obtidos.

Para tal avaliação, são utilizadas as expressões 3, 4 e 5 acima definidas, sendo obtidos os seguintes resultados:

$$\lambda_{\text{máximo}} = [4 \quad 2 \quad 2/3 \quad 4 \quad 8] \cdot \begin{bmatrix} 0,250 \\ 0,375 \\ 0,250 \\ 0,125 \end{bmatrix} = 4$$

Assim:

$$IC = (4 - 4)/(4 - 1) = 0$$

Para n=4, temos que o valor tabelado de IR equivale a 0,89, conforme apresentado na Tabela 1, e, assim, a razão de consistência é dada por:

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0}{0,89} = 0$$

Este resultado demonstra consistência dos julgamentos ($RC < 0,10$).

4.2.1.1. Definição dos pesos relativos aos subcritérios selecionados

O peso relativo aos subcritérios será definido considerando que cada subcritério possui igual importância dentro de um mesmo critério, ou seja, o peso calculado para o critério será igualmente dividido para seus respectivos subcritérios. Desta forma, tendo em vista que para a estruturação hierárquica apresentada na Figura 4, cada critério possui dois subcritérios associados, definiu-se que o peso de cada subcritério equivale à metade do peso calculado para o critério ao qual o mesmo pertence.

4.2.2 Valoração dos subcritérios qualitativos

Os subcritérios quantitativos selecionados estão associados majoritariamente ao consumo de matéria-prima, materiais secundários ou energia na operação de usinagem em

avaliação, enquanto os subcritérios qualitativos relacionam-se ao grau de impacto ambiental por eles ocasionados.

Para o desenvolvimento da presente metodologia, fez-se necessário a atribuição de pontuações numéricas para os subcritérios qualitativos, possibilitando sua comparação junto aos subcritérios quantitativos. Tendo em vista que a pontuação dos subcritérios quantitativos é calculada em termos de eficiência (e, desta forma, o valor máximo atribuído ao mesmo é de 100%), definiu-se que a pontuação atribuída aos subcritérios qualitativos também irá variar entre 0 e 1.

Desta forma, a valoração quantitativa dos subcritérios qualitativos foi dada em função de uma escala numérica de classificação do impacto ambiental causado por cada subcritério, com pontuação variando entre 0 e 1, tendo sido adotada a seguinte classificação:

- $0 < \text{pontuação} \leq 0,3$ = magnitude forte,
- $0,3 < \text{pontuação} \leq 0,7$ = magnitude média,
- $0,7 < \text{pontuação} \leq 1$ = magnitude fraca.

Diante do exposto, nos subitens 4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.2.2.3, realizou-se uma revisão bibliográfica acerca das temáticas relacionadas aos subcritérios de destinação de resíduos sólidos metálicos, bem como a classificação do fluido de corte e da fonte energética utilizada, respectivamente. Desta forma, as principais formas de ocorrência dos subcritérios qualitativos selecionados durante o desenvolvimento da presente metodologia foram avaliadas em função do potencial impacto ambiental por elas ocasionado, visando sua classificação frente à escala acima definida.

4.2.2.1 Classificação da destinação de resíduos sólidos metálicos

De acordo com Gomes et al (2015), atualmente, as alternativas consideradas ambientalmente adequadas para destinação/disposição de resíduos sólidos são: disposição em aterro, reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético.

Os resíduos metálicos gerados nos processos de usinagem podem ser utilizados como matéria-prima em outros processos por meio da reciclagem (interna ou externa), bem como destinados para disposição em aterros sanitários.

Aterro sanitário é a deposição controlada de resíduos sólidos no solo e sua posterior cobertura diária. Uma vez depositados, os resíduos sólidos se degradam naturalmente por via

biológica até a mineração da matéria biodegradável, em condição fundamentalmente anaeróbia (FRANÇA; RUARO, 2009).

Por sua vez, a reciclagem é caracterizada pelo reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para a produção de um novo produto, sendo, dessa forma, a finalização de vários processos pelos quais passam os materiais que seriam descartados (MOTA *et al*, 2009). Os resíduos sólidos metálicos decorrentes dos processos de usinagem podem ser reciclados dentro ou fora da empresa em que foram gerados, sendo utilizados como matéria-prima em processos como a fabricação de aço em usinas siderúrgicas, ou obtenção de produtos por meio dos processos de metalurgia do pó e fundição, por exemplo.

De acordo com Trindade Júnior (2013), o aço é totalmente reciclável, sendo o material mais reciclado do mundo. Como consequências da reciclagem do aço, podem ser citadas a redução dos níveis de poluentes, devido ao menor consumo de combustíveis fósseis utilizados nos processos siderúrgicos, bem como a redução da poluição causada pela extração e beneficiamento das matérias-primas necessárias ao processo siderúrgico, além na redução do consumo energético total do processo.

4.2.2.2. Classificação de fluidos de corte

Embora a utilização de fluidos de corte gasosos e sólidos seja eventualmente descrita na literatura técnica, os fluidos de corte líquidos representam a maioria nas aplicações em operações de usinagem. Os fluidos sólidos e gasosos têm sua aplicação restrita por dois motivos principais: algumas vezes são economicamente inviáveis e outras vezes exigem muitos cuidados na aplicação (MACHADO *et al.*, 2015; REBEYKA, 2016).

Desta forma, sendo os fluidos líquidos os mais comuns, eles são agrupados nas seguintes categorias, de acordo com a sua classificação: óleos, emulsões e soluções (MACHADO *et al.*, 2015).

- Óleos integrais: consistem em óleos de corte que não são misturados com água para o uso nas operações de usinagem (FERRARESI, 1970). De acordo com Dias (2000), os óleos integrais são disponíveis em uma variedade muito grande, que vai desde o óleo mineral ou vegetal puro até o óleo mineral composto (combina óleo mineral com aditivos polares e/ou aditivos quimicamente ativos).
- Emulsões: são compostos de pequena porcentagem de um concentrado de óleo

emulsificável, usualmente composto por óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas de água (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Os fluidos semi-sintéticos também são formadores de emulsões, e apresentam entre 5% e 50% de óleo mineral no fluido, além de aditivos e outros compostos químicos que, de fato, são solúveis em água e formam moléculas distintas (REBEYKA, 2016).

- Soluções: consiste em uma solução química composta de materiais inorgânicos e/ou outros materiais dissolvidos na água e que não contém óleo mineral (EL BARADIE, 1996 citado por GONÇALVES, 2008).

Em síntese, os fluidos de corte são composições complexas contendo agentes químicos que variam de acordo com o tipo de operação a ser executada e os metais a serem trabalhados (SILVA *et al.*, 2005 citado por GONÇALVES, 2008), que podem causar prejuízos significativos ao meio ambiente e à saúde do operador.

Sob o ponto de vista ambiental, a melhor técnica de usinagem é aquela que prevê a não utilização de fluidos de corte, sendo essa técnica conhecida como usinagem a seco (REBEYKA, 2016). Uma alternativa ao corte a seco é o corte com Mínima Quantidade de Fluido – MQF, nos processos em que não é possível ou economicamente viável realizar a usinagem completamente sem fluido de corte, que consiste na pulverização de uma quantidade mínima de óleo (menos de 60 ml/h) em um fluxo de ar comprimido (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

É importante salientar, ainda, os efeitos adversos ocasionados pelos fluidos de corte à saúde dos colaboradores. Dentre os diversos tipos de fluidos de corte, o óleo integral tem se revelado mais agressivo à saúde do operador, enquanto o solúvel é o menos agressivo (OLIVEIRA e ALVES, 2007).

4.2.2.3 Classificação de fonte energética

As fontes de energia se subdividem em renováveis (solar, hidráulica, eólica) e não renováveis (carvão mineral, petróleo, gás natural, urânio) (GARCEZ; GARCEZ, 2010).

Energia renovável é uma energia derivada de processos naturais que são ou podem ser constantemente reabastecidos, referindo-se ainda à energia gerada de recursos naturais em níveis sustentáveis que pode vir de fontes de energia não-fósseis (BARBOSA, 2014).

Em contrapartida, a energia não renovável é gerada por recursos naturais esgotáveis. Além da preocupação infundável com o seu esgotamento, as grandes dependências de fontes de energia não renováveis de energia têm ocasionado também a emissão de gases tóxicos e poluentes e material particulado, a exemplo dos “gases do efeito estufa”, evidenciando o dióxido de carbono (FREITAS; DATHEIN, 2013 citado por SANTANA *et al.*, 2020).

A ideia de energia limpa é associada à capacidade de poluição decorrente do seu uso: É aquela que não polui, ou que polui menos que as tradicionais (de modo geral, os combustíveis fósseis). Na produção e no consumo, os exemplos mais comuns são a energia hidrelétrica, a dos ventos (eólica) e a solar (ABRIL, 2010 citado por BARBOSA, 2014).

No Quadro 6 estão listadas algumas das principais fontes energéticas utilizadas a nível mundial (diesel, pequenas centrais hidrelétricas, biomassa, eólica e solar), bem como os impactos ambientais a elas associados.

Quadro 6 – Impactos ambientais por fonte energética

CATEGORIA DO IMPACTO	DIESEL	PCH	BIOMASSA	EÓLICA	SOLAR
ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	A geração, refino e queima de combustível fóssil gera emissão de GEE's	Pequenos lagos	Emissão de GEE's	Processos energéticos para a produção de equipamentos	Intensivo processo energético para a produção das células
ACIDIFICAÇÃO	O refino e queima de combustível fóssil gera emissão de SO ₂ e NO _x		Emissões de SO ₂ e NO _x na queima		
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	A extração, transporte e queima de combustível fóssil gera a emissão de partículas		Emissão de partículas na queima		
OZÔNIO TROPOSFÉRICO			Emissão de NO _x na queima		
FLUXOS HIDROLÓGICOS		Alteração do regime dos rios, redução dos caudais (água em abundância)	Remoção de vegetação pode causar alterações no escoamento e infiltração		
POLUIÇÃO DAS ÁGUAS	Vazamento de poluentes na extração, transporte e refino, além das águas de refrigeração		Lixiviação para a produção de biomassa pode causar contaminação e eutrofização		
ECOSSISTEMAS/ PERDA DE BIODIVERSIDADE/ DANOS EM FLORESTAS	Vazamento de poluentes na extração e transporte pode ocasionar a destruição de vegetações	Redução na população de peixes	Destruição da vegetação para a cultura de insumos e remoção de resíduos florestais	Risco de colisão de aves com as pás das turbinas	
DEGRADAÇÃO DO SOLO/ COLHEITAS	A extração e armazenamento de combustíveis podem causar degradação e contaminação do solo	Redução de áreas de cultivo	Degradação do solo por cultura de insumos e risco de erosão	Requer extensas áreas, porém sem ocupação total	Requer extensas áreas, porém sem ocupação total
DEGRADAÇÃO DE ZONAS COSTEIRAS E ECOSISTEMAS MARINHOS	O transporte de combustíveis pode causar contaminação de ecossistemas marinhos				
REDUÇÃO DE RECURSOS NÃO RENOVÁVEIS	O combustível fóssil é um recurso não renovável, passível de escassez				Algumas células utilizam material não renovável
RESÍDUOS PERIGOSOS	O refino e queima de combustível fóssil gera cinzas e escórias		Produção de cinzas resultantes da combustão		Geração de resíduos na produção e desmanche das células
SAÚDE HUMANA	Danos indiretos à saúde humana e do trabalhador	Danos indiretos à saúde humana e do trabalhador	Danos indiretos à saúde humana e do trabalhador	Danos indiretos à saúde humana e do trabalhador	Danos indiretos à saúde humana e do trabalhador
INSALUBRIDADE	Perigo de explosão e incêndio em todas as fases				
RISCOS QUÍMICOS					Materiais utilizados possuem alguma periculosidade
POLUIÇÃO VISUAL	As estruturas associadas geram alterações visuais	Alteração visual em áreas não perturbadas	Cultura de insumos tem impacto na paisagem	As turbinas causam alteração nas paisagens	Os painéis causam alteração nas paisagens
RUÍDO	Utilização de motores provoca aumento nos níveis de ruído			Ruído provocado pela operação das pás	

Fonte: SANTOS, MARTINHO e ANTUNES, 2001 citado por SENNA e GARBIN, 2009

4.2.2.4 Definição de pontuação para subcritérios qualitativos

Com base no levantamento bibliográfico disposto nos itens 4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.2.2.3, foi elaborado o Quadro 7, que apresenta um direcionamento para pontuação a ser utilizada para os subcritérios qualitativos definidos na metodologia aqui definida.

Quadro 7 – Escala de pontuação definida para os subcritérios qualitativos

MAGNITUDE DO IMPACTO	PONTUAÇÃO	SUBCRITÉRIO		
		Destinação dada ao resíduo sólido metálico	Natureza do fluido de corte utilizado	Fonte energética
Forte	$0 < \text{Pontuação} \leq 0,3$	Aterro	Óleo integral	Fontes não renováveis
Média	$0,3 < \text{Pontuação} \leq 0,7$	Reciclagem externa	Emulsão Solução	-
Fraca	$0,7 < \text{Pontuação} \leq 1$	Reciclagem interna	Gasosa (usinagem a seco)	Fontes renováveis

Fonte: Autora, 2022

Vale ressaltar que o Quadro 7 acima disposto apresenta um intervalo de valores de classificação do subcritério em análise, no entanto a identificação do valor específico que será utilizado para aplicação da metodologia definida no presente estudo fica a cargo dos especialistas que estiverem conduzindo a análise.

Quanto à definição de uma pontuação específica para um determinado subcritério frente aos valores apresentados na escala contida no Quadro 7 acima, orienta-se uma avaliação criteriosa da robustez do sistema de gestão da organização no que tange a temática abordada nesse subcritério. Por exemplo: a escala definida para valoração do subcritério “natureza do fluido de corte utilizado”, quando da utilização de óleo integral numa determinada operação de usinagem, varia de 0 a 0,3. A pontuação a ser utilizada durante a aplicação da metodologia aqui definida deverá ser mais próxima ou igual ao valor máximo da escala (0,3 pontos), à medida que existirem no local procedimentos robustos de gerenciamento do fluido de corte em questão, que visem, por exemplo, aumentar sua vida útil, garantir sua confiabilidade durante a utilização, bem como reduzir sua contaminação e perdas no processo. Ainda, a aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Fluido (MQF) numa determinada operação de usinagem em análise seria, por exemplo, um motivador significativo para seleção da pontuação máxima definida na escala atribuída ao fluido de corte em uso.

4.3 APLICABILIDADE PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO

A metodologia desenvolvida foi aplicada em um produto selecionado como objeto de estudo, visando sua validação, por meio das etapas abaixo descritas:

- 1) Seleção do produto a ser avaliado: para aplicação da metodologia proposta, selecionou-se como objeto de análise um modelo de pinhão de comando produzido em uma indústria metalmeccânica do ramo automotivo.
- 2) Avaliação do fluxo produtivo do pinhão de transmissão: foram avaliadas as operações realizadas durante a manufatura do produto em análise, visando identificar as operações de usinagem presentes nesse fluxo, sendo estas selecionadas para aplicação da metodologia proposta no presente estudo.
- 3) Levantamento dos dados de inventário: os dados de inventário foram registrados para todas as operações de usinagem presentes no fluxo produtivo do pinhão de transmissão selecionado. O período de análise considerado para o levantamento dos dados compreendeu os meses de janeiro a dezembro/2021 e as informações foram levantadas com base em registros de produção e consumo das operações de usinagem avaliadas. Os valores de *benchmarking* para os critérios qualitativos foram definidos com base em operações semelhantes, cujos resultados de eficiência se sobressaíam frente aos demais.
- 4) Aplicação da metodologia: de posse dos dados de inventário das operações de usinagem avaliadas, foi aplicada a metodologia proposta no presente estudo para avaliação do desempenho ambiental das mesmas, possibilitando, assim, o comparativo entre elas.
- 5) Proposição e implantação de melhorias: após aplicação da metodologia proposta e identificação da operação mais crítica em termos de desempenho ambiental, ou seja, a operação que apresentou o menor índice de desempenho ambiental frente aos demais, foram implantadas melhorias focadas no aumento da eficiência do processo.

- 6) Reavaliação do índice de desempenho ambiental: a metodologia proposta no presente estudo foi novamente utilizada para reavaliar o índice de desempenho ambiental na operação em que as melhorias foram implantadas, visando identificar se as mesmas foram eficazes quanto ao seu objetivo.

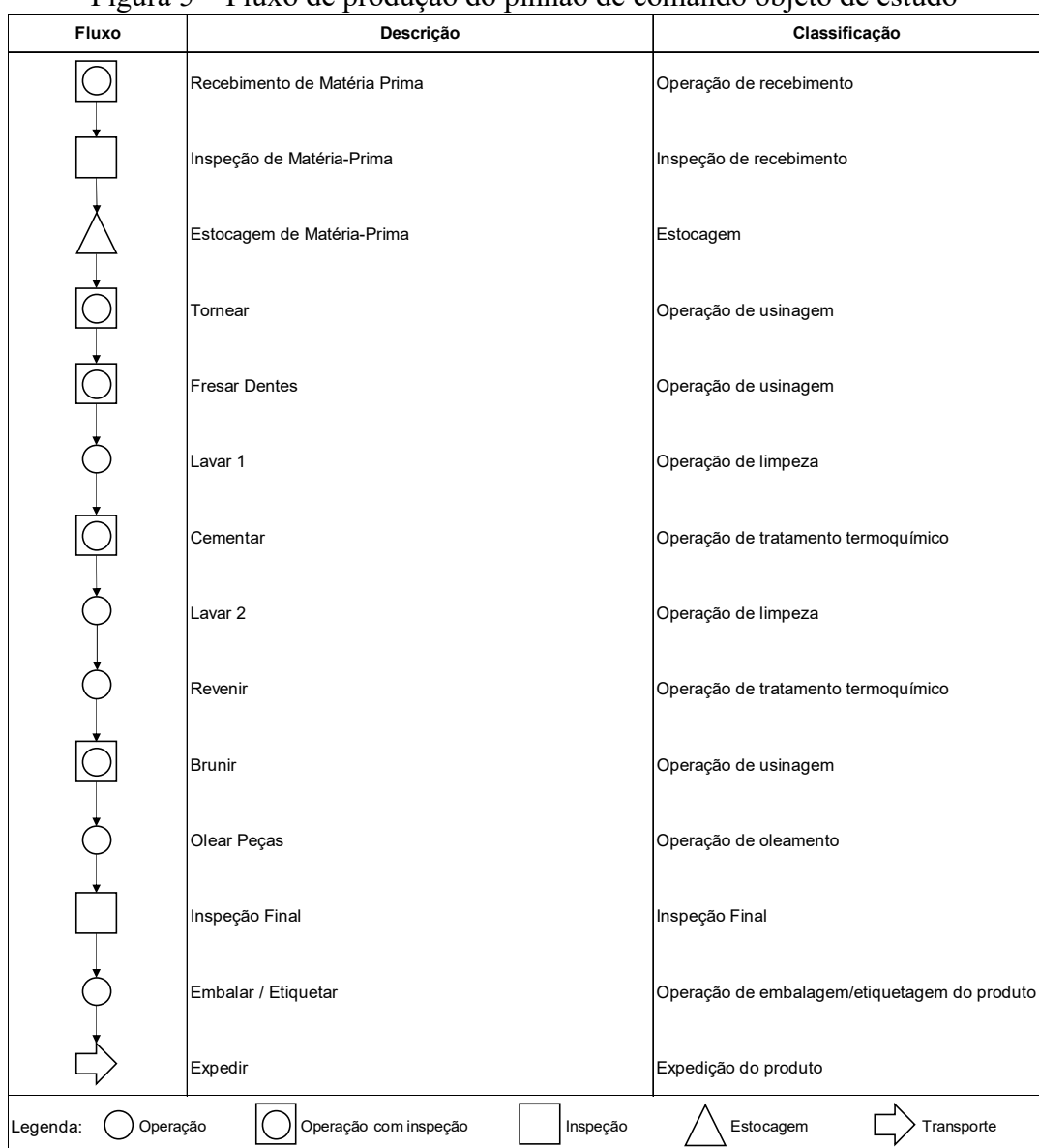
4.3.1 Pinhão de comando

O pinhão de comando é uma peça montada em motocicletas, que tem a finalidade de transmitir movimento do eixo virabrequim para o comando de válvulas, manufaturado em aço carbono por meio de operações sequenciais de usinagem e tratamento termoquímico, conforme fluxo do processo produtivo definido no subitem 4.3.1.1 abaixo.

4.3.1.1 Fluxo de operações envolvidos na manufatura do pinhão de comando

Após o recebimento da matéria-prima (tarugos de aço), o processo de fabricação de pinhões de comando envolve uma sequência de operações de usinagem e tratamento térmico, conforme fluxo apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxo de produção do pinhão de comando objeto de estudo



Fonte: Autora, 2022

4.3.1.2 Análise das operações de usinagem presentes no fluxo de manufatura do pinhão de comando

Para validação da metodologia desenvolvida, serão avaliadas todas as operações de usinagem presentes no fluxo do processo do produto em avaliação, ou seja, as operações de tornear, fresar dentes e brunir.

Desta forma, foi elaborado um inventário dessas operações, à luz dos subcritérios selecionados para aplicação da metodologia proposta.

4.3.1.3 Metodologia definida para elaboração do inventário

A metodologia definida para elaboração dos inventários das operações de tornear, fresar dentes e brunir do pinhão de comando objeto de análise encontram-se descritos a seguir.

4.3.1.3.1 Critério “Resíduos Metálicos” (RM)

O cálculo da massa dos produtos manufaturados nas operações de usinagem analisadas foi calculado por meio do software Autodesk Inventor. Uma vez desenhado tridimensionalmente o produto em análise, é possível obter o volume do mesmo, valor esse que, quando multiplicado pela densidade do aço utilizado na manufatura do produto, fornece como resultado a massa do item em questão.

É importante ressaltar, no entanto, que as dimensões do pinhão de comando após cada uma das operações analisadas são variáveis, conforme tolerâncias definidas no projeto do produto. Isto significa que, mesmo em um processo seriado, as dimensões e consequentemente a massa dos produtos produzidos varia, fazendo-se necessário utilizar valores médios na aplicação da metodologia aqui proposta.

Desta forma, foram utilizadas as especificações nominais (dimensões em seu valor intermediário) para o cálculo da massa dos produtos antes e após cada operação analisada, visando calcular os valores médios de massa de cavaco gerado na operação por unidade de peça produzida. Assim, a massa de cavaco gerado durante cada operação de uma unidade do pinhão de comando foi calculada por meio da subtração da massa da peça manufaturada após a operação em questão menos a massa da matéria-prima utilizada. Em operações intermediárias, lê-se matéria-prima o produto em sua forma obtida na operação anterior, conforme definido no fluxo apresentado na Figura 5.

As sucatas, por sua vez, são produtos não conforme obtidos durante a execução de uma determinada operação de usinagem. Para o cálculo da massa de sucata gerada na operação, considerou-se o percentual médio de sucata do pinhão de comando gerado anualmente no processo em questão, conforme registrado no banco de dados da empresa, multiplicado pela produção anual desse produto (ano base 2021). Tal resultado fornece a quantidade de peças sucateadas ao longo de um ano, valor esse que, multiplicado pela massa de uma unidade de pinhão de comando após a operação em análise, e dividido pela quantidade de peças produzidas ao longo desse ano, representa a massa média de sucata gerada por peça no processo em questão.

4.3.1.3.2 Critério “Resíduos Sólidos – Fluido de Corte” (RF)

O consumo do fluido de corte foi calculado através dos registros de volume de fluido de corte consumido na operação em um período de um ano (ano base 2021), dividido pela quantidade de peças produzidas nesse período.

Por sua vez, a classificação da natureza do fluido de corte utilizado na operação foi obtida através dos registros contidos na Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) do mesmo.

4.3.1.3.3 Critério “Consumo de Energia” (CE)

Na indústria metalmeccânica onde o presente estudo foi desenvolvido, não haviam métodos disponíveis para obtenção direta do consumo de energia elétrica por operação de usinagem. Desta forma, tendo em vista que o consumo de energia elétrica por peça produzida é proporcional ao tempo em que o equipamento fica ligado realizando a operação, definiu-se como parâmetro de avaliação o tempo de ciclo da operação, ou seja, o tempo efetivo gasto para a usinagem de uma peça na operação em análise.

Durante o desenvolvimento do processo produtivo de um determinado produto, é definido um valor médio atingível para o tempo de ciclo de cada operação, valor este que, com o passar do tempo e sob efeito de diferentes agentes no processo, sofre variações na prática, no geral reduzindo a eficiência da operação. Vale ressaltar que o tempo real do ciclo de cada operação de usinagem avaliada foi medido utilizando um cronômetro, em que se registrou a média de tempo obtida para um total de dez consecutivas peças produzidas.

4.3.1.3.4 Critério “Materiais Secundários” (MS)

Para análise do critério de materiais secundários, foram avaliados os tipos de ferramentas utilizados em cada processo de usinagem, tendo sido estas ferramentas pesadas em uma balança visando definir sua massa. Assim, para obtenção do parâmetro de massa de ferramentas por unidade de peça produzida, a massa de cada ferramenta foi multiplicada pela respectiva quantidade de ferramentas utilizadas no período de um ano (ano base 2021), e dividida pela produção anual do item em questão na operação avaliada. O *benchmarking* de consumo de ferramentas por peças produzidas foi definido com base em registros dos últimos cinco anos, tomando-se os melhores valores históricos para o parâmetro em questão,

avaliando a operação do produto em análise e de outros modelos de pinhão de comando manufaturados por meio de processos semelhantes.

Ainda, no que tange o consumo de óleo hidráulico e óleo lubrificante, registrou-se o volume total de óleo consumido em cada operação no ano de 2021, dividido pela quantidade de peças produzidas nesse período.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE PROCESSOS DE USINAGEM

A equação para avaliação de desempenho ambiental de uma operação é dada pelo somatório dos critérios definidos multiplicados pelos respectivos pesos a eles atribuídos.

Levando em consideração a definição de que o peso de cada subcritério equivale à metade do peso definido para o respectivo critério ao qual o mesmo pertence, temos que:

$$\text{Desempenho ambiental da operação} = W_{RM} \cdot (0,5 \cdot SRM1 + 0,5 \cdot SRM2) + W_{RF} \cdot (0,5 \cdot SRF1 + 0,5 \cdot SRF2) + W_{CE} \cdot (0,5 \cdot SCE1 + 0,5 \cdot SCE2) + W_{MC} \cdot (0,5 \cdot SMS1 + 0,5 \cdot SMS2) \quad (6)$$

Desta forma, utilizando os pesos atribuídos para cada critério avaliado, conforme apresentado na Tabela 4, tem-se que:

$$\text{Desempenho ambiental da operação} = 0,25 \cdot (0,5 \cdot SRM1 + 0,5 \cdot SRM2) + 0,375 \cdot (0,5 \cdot SRF1 + 0,5 \cdot SRF2) + 0,25 \cdot (0,5 \cdot SCE1 + 0,5 \cdot SCE2) + 0,125 \cdot (0,5 \cdot SMS1 + 0,5 \cdot SMS2) \quad (7)$$

Então:

$$\text{Desempenho ambiental da operação} = 0,125 \cdot (SRM1 + SRM2 + SCE1 + SCE2) + 0,1875 \cdot (SRF1 + SRF2) + 0,0625 \cdot (SMS1 + SMS2) \quad (8)$$

Na equação em questão, o fator que apresentou maior importância para a definição do desempenho ambiental de uma operação de usinagem foi o de resíduos fluidos, com peso de 0,375, o que significa que esse fator tem 37,5% de influência sobre o valor final do índice calculado.

Aos fatores de resíduos metálicos e consumo energético foram atribuídos pesos de 0,25, ou seja, ambos representam 25% de influência sobre o valor final do índice de desempenho ambiental em questão. Kurukulasuriya, Gamage e Mangala (2020) obtiveram resultados semelhantes ao realizar estudo para avaliação do desempenho ambiental de uma operação de usinagem de acordo com o método ReCiPe Endpoint, ao concluir que o material

da peça e a energia elétrica são os dois fatores que mais contribuem para o impacto ambiental adverso.

Por fim, o fator de materiais secundários recebeu o peso de 0,125, indicando que o mesmo representa 12,5% de influência no resultado do desempenho ambiental de operações de usinagem.

Jiang, Zhang e Sutherland (2011) definiram uma metodologia de avaliação de desempenho ambiental de processos de usinagem utilizando o método AHP, cujos resultados encontram-se dispostos na Tabela 5. Vale ressaltar que Jiang, Zhang e Sutherland (2011) definiram apenas critérios qualitativos no desenvolvimento de sua metodologia, enquanto que a metodologia proposta no presente estudo inclui tanto avaliações qualitativas quanto quantitativas dos critérios selecionados.

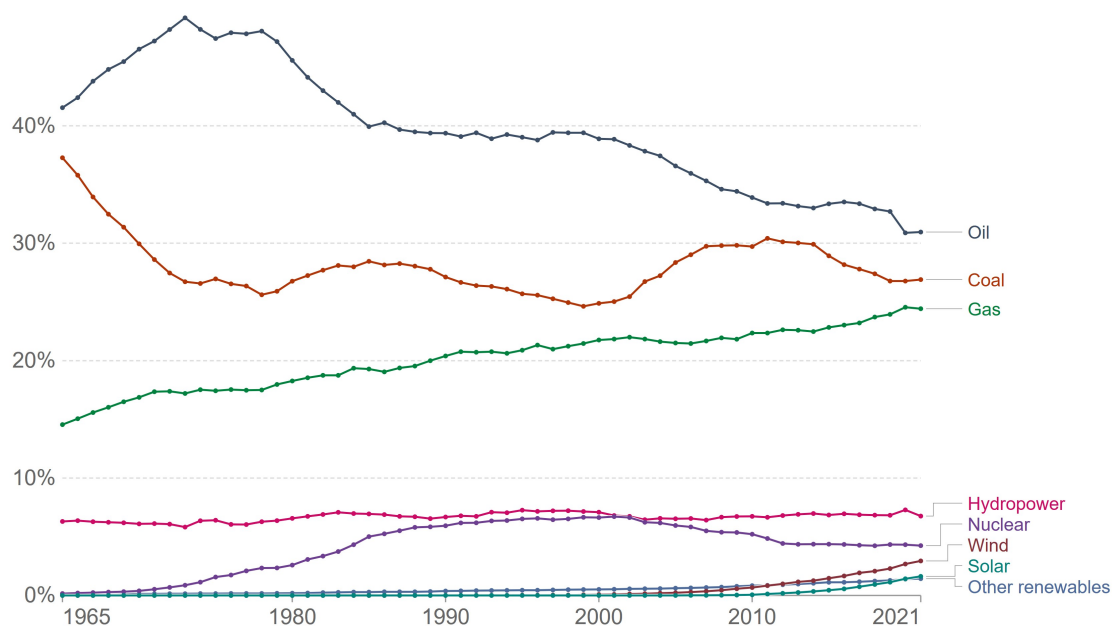
Tabela 5 – Pesos atribuídos por Jiang, Zhang e Sutherland (2011) aos critérios selecionados para avaliação do desempenho ambiental de processos de usinagem

Critério	Peso
Consumo de matéria-prima	0,217
Consumo de materiais secundários	0,051
Consumo energético	0,409
Emissões atmosféricas	0,158
Resíduos líquidos	0,091
Resíduos sólidos	0,074

Fonte: Adaptado de Jiang, Zhang e Sutherland (2011)

Avaliando a Tabela 5, é possível perceber que Jiang, Zhang e Sutherland (2011) pontuaram o critério de consumo energético com o peso de 0,409, equivalente a 40,9% de influência no resultado do desempenho ambiental de operações de usinagem, sendo esta a maior pontuação definida dentre os critérios avaliados. Por sua vez, no presente estudo tal critério obteve pontuação de 0,25, caracterizando-se como o critério de segundo maior peso. Uma possível justificativa para essa diferença entre os pesos atribuídos deve-se ao fato de que fontes de energia limpa tem representado um percentual cada vez mais significativo na matriz energética mundial ao longo dos anos, conforme apresentado na Figura 6. Dessa forma, o cenário atual de impactos ambientais causados pelas fontes de energia é, em geral, menos significativo que aquele percebido por Jiang, Zhang e Sutherland durante o desenvolvimento de seu estudo.

Figura 6 - Participação mundial do consumo de energia por fonte



Fonte: Ritchie, Roser E Rosado (2022)

Jiang, Zhang e Sutherland (2011) atribuíram pesos de 0,217 e 0,074 para os critérios de consumo de matéria-prima e resíduos sólidos, respectivamente. No presente estudo, a avaliação qualitativa do critério de resíduos sólidos metálicos representa uma composição desses dois critérios definidos por Jiang, Zhang e Sutherland (2011), contribuindo com 25% de influência no resultado do desempenho ambiental de operações de usinagem, demonstrando, dessa forma, convergência entre os resultados obtidos em ambos os estudos.

A diferença mais significativa entre os pesos definidos para os critérios selecionados no presente estudo e aqueles obtidos por Jiang, Zhang e Sutherland (2011) refere-se à temática de resíduos fluidos gerados nas operações de usinagem. Enquanto na metodologia aqui definida, tal critério obteve pontuação de 0,375, caracterizando-se como o critério de maior peso frente aos demais, Jiang, Zhang e Sutherland (2011) atribuíram ao mesmo um peso de 0,091, somado a uma parcela do peso de 0,051 atribuído de consumo de materiais secundários, que considera em seus cálculos o volume consumido de fluidos de corte, além de ferramentas e dispositivos. Tal diferença justifica-se em função dos julgamentos realizados durante a aplicação da metodologia de Análise Hierárquica de Processos, cujas percepções dos julgadores acerca dos temas avaliados pode gerar resultados significativamente diferentes. Vale ressaltar que no presente estudo utilizou-se a metodologia de avaliação de aspectos impactos ambientais como ferramenta auxiliar à tomada de decisão para definição dos pesos atribuídos na matriz de julgamentos paritários, no entanto Jiang, Zhang e Sutherland (2011)

não deixam claro em seu estudo se foram utilizadas ferramentas auxiliares para auxiliar a avaliação da equipe julgadora. Entretanto, como parte da aplicação da metodologia AHP, em ambos os estudos foi avaliada a consistência da matriz de critérios aos pares, de forma a garantir que os resultados obtidos após sua aplicação são, de fato, consistentes.

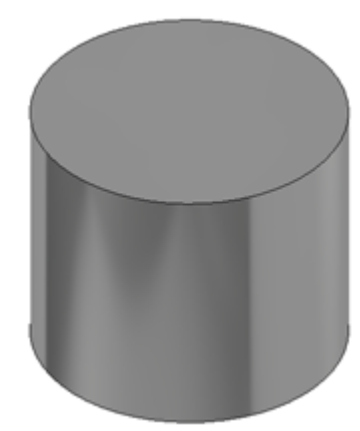
5.2 APLICABILIDADE PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO

5.2.1 Elaboração do inventário por operação

5.2.1.1 Operação de Tornear

A matéria-prima utilizada na operação de torneamento do pinhão de comando é um blank de metal, conforme apresentado na Figura 7, que consiste em uma pequena peça cilíndrica de aço com dimensões médias de 29 mm de comprimento e 33,34 mm de diâmetro.

Figura 7 – Forma da matéria-prima utilizada na operação de Tornear



Fonte: Autora, 2022

Para aplicação da metodologia desenvolvida no presente estudo, foram registrados os dados de inventário da operação de torneamento, dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Inventário operação de Tornear

Critério	Descrição	Inventário
RM	Massa de cavaco gerado	152,933 g/peça
	Massa de sucata gerada	0,103 g/peça
	Massa do blank (matéria-prima)	191,888 g/peça
	Resíduo metálico gerado	Cavaco e sucata contaminados com óleo
	Destinação resíduo metálico	Reciclagem externa (produção de aço FEA)
RF	Consumo de fluido de corte	1,3265 ml/peça
	Consumo de fluido de corte (benchmarking)	0,7785 ml/peça
	Natureza do fluido de corte	Solução (concentração 3 ~ 10%)
CE	Tempo de ciclo da peça (real)	55 s/peça
	Tempo de ciclo da peça (meta)	53 s/peça
	Fonte energética	Hidrelétrica
MS	Ferramenta utilizada	Insertos (4 diferentes modelos)
	Massa de ferramentas (real)	0,0368 g/peça
	Massa de ferramentas (benchmarking)	0,0204 g/peça
	Consumo de óleo hidráulico/lubrificante	0,7148 ml/peça
	Consumo de óleo hidráulico/lubrificante (benchmarking)	0,6807 ml/peça

Fonte: Autora, 2022

Após a operação de torneamento, o se produto apresenta na forma disposta na Figura 8.

Figura 8 – Forma do pinhão de comando após a operação de Tornear



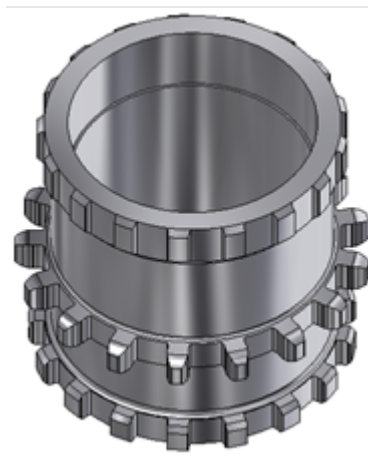
Fonte: Autora, 2022

5.2.1.2 Operação de Fresar Dentes

A matéria-prima utilizada na operação de fresar tem a forma e dimensões do produto obtido após a operação de torneamento.

Após a operação de fresamento, o produto se apresenta na forma disposta na Figura 9.

Figura 9 – Forma do pinhão de comando após a operação de Fresar Dentes



Fonte: Autora, 2022

Os dados de inventário da operação de fresamento encontram-se dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Inventário operação de Fresar Dentes

Critério	Descrição	Inventário
RM	Massa de cavaco gerado	4,837 g/peça
	Massa de sucata gerada	0,001 g/peça
	Massa peça torneada (matéria-prima)	38,955 g/peça
	Resíduo metálico gerado	Cavaco e sucata contaminados com óleo
	Destinação resíduo metálico	Reciclagem externa (produção de aço FEA)
RF	Consumo de fluido de corte	0,2979 ml/peça
	Consumo de fluido de corte (benchmarking)	0,28 ml/peça
	Natureza do fluido de corte	Óleo de Corte Integral
CE	Tempo de ciclo da peça (real)	26 s/peça
	Tempo de ciclo da peça (meta)	25 s/peça
	Fonte energética	Hidrelétrica
MS	Ferramenta utilizada	Caracol/Hob
	Massa de ferramentas (real)	0,0052 g/peça
	Massa de ferramentas (benchmarking)	0,0048 g/peça
	Consumo de óleo hidráulico/lubrificante	1,0682 ml/peça
	Consumo de óleo hidráulico/lubrificante (benchmarking)	0,9097 ml/peça

Fonte: Autora, 2022

5.2.1.3 Operação de Brunir

A matéria-prima utilizada na operação de brunir tem a forma e dimensões do produto obtido após a operação de fresamento.

Os dados de inventário da operação de brunimento se encontram dispostos na Tabela 8.

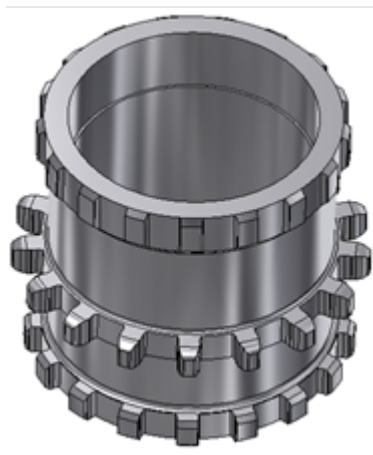
Tabela 8 – Inventário operação de Brunir

Critério	Descrição	Inventário
RM	Massa de cavaco gerado	0,102 g/peça
	Massa de sucata gerada	0,073 g/peça
	Massa peça fresada (matéria-prima)	34,118 g/peça
	Resíduo metálico gerado	Borra de brunimento e sucata contaminados com óleo
	Destinação resíduo metálico	Aterro sanitário
RF	Consumo de fluido de corte	0,7278 ml/peça
	Consumo de fluido de corte (benchmarking)	0,3937 ml/peça
	Natureza do fluido de corte	Mistura de óleo mineral com aditivos
CE	Tempo de ciclo da peça (real)	9 s/peça
	Tempo de ciclo da peça (meta)	9 s/peça
	Fonte energética	Hidrelétrica
MS	Ferramenta utilizada	Réguas abrasivas
	Massa de ferramentas (real)	0,0298 g/peça
	Massa de ferramentas (benchmarking)	0,0194 g/peça
	Consumo de óleo hidráulico/lubrificante	0,0030 ml/peça
	Consumo de óleo hidráulico/lubrificante (benchmarking)	0,0029 ml/peça

Fonte: Autora, 2022

Após a operação de brunimento, o produto se apresenta na forma disposta na Figura 10.

Figura 10 – Forma do pinhão de comando após a operação de Brunir



Fonte: Autora, 2022

5.2.2 Definição de índice de desempenho ambiental das operações de usinagem do pinhão de comando

Os dados de inventário dispostos no subitem 5.2.1 foram utilizados para calcular os valores individuais de cada subcritério definido, conforme disposto na Tabela 9.

Vale ressaltar que, para a valoração dos critérios qualitativos, foram utilizados os valores definidos na escala apresentada no Quadro 7, tendo sido adotados os valores máximos da classificação das faixas da escala atribuídas para os subcritérios S.RM.2 (destinação dada ao resíduo sólido metálico gerado na operação) e S.RF.2 (natureza do fluido de corte utilizado) para o item em avaliação. O critério definido para adoção dos valores máximos das respectivas faixas das escalas se deu em função de uma avaliação detalhada da robustez do sistema de gestão ambiental da empresa no que tange as temáticas relacionadas aos subcritérios analisados. Os principais motivos que sustentam esta decisão são: a política de gerenciamento de resíduos, a busca contínua pela redução na geração dos mesmos, a garantia do atendimento às legislações vigentes, a gestão de vida útil de fluidos de corte visando redução de consumo e aumento de sua vida útil.

Por sua vez, foi atribuída uma pontuação intermediária (0,85 pontos) para o subcritério S.CE.2 (fonte energética), uma vez que, apesar da indústria em que o presente estudo foi desenvolvido apresentar uma política robusta de gestão dos recursos energéticos, buscando continuamente o desenvolvimento de projetos que proporcionem a redução no consumo de energia elétrica em seus processos, observou-se que as metas definidas de eficiência energética da organização não tem sido atendidas ao longo do último ano, o que demonstra

que esforços devem ser concentrados visando garantir uma redução no consumo de energia elétrica.

Tabela 9 – Resultados por subcritério das operações de usinagem do pinhão de comando

Critério	RM		RF		CE		MS	
W_C	0,25		0,38		0,25		0,13	
Subcritério	S.RM.1	S.RM.2	S.RF.1	S.RF.2	S.CE.1	S.CE.2	S.MS.1	S.MS.2
W_S	0,125	0,125	0,19	0,19	0,125	0,125	0,065	0,065
Operação								
Tornear	0,202	0,700	0,587	0,700	0,964	0,850	0,554	0,952
Fresar	0,876	0,700	0,940	0,300	0,962	0,850	0,929	0,852
Brunir	0,995	0,300	0,541	0,300	1,00	0,850	0,651	0,966

Fonte: Autora, 2022

De posse de tais dados, é possível calcular o índice de desempenho ambiental das operações de usinagem presentes no fluxo produtivo do pinhão de comando em análise, conforme apresentado na Tabela 10, utilizando, para tal, a Equação 8.

Tabela 10 – Definição do índice de desempenho ambiental de operações de usinagem do pinhão de comando

Critério	RM		RF		CE		MS		
W_C	0,25		0,38		0,25		0,13		
Subcritério	S.RM.1	S.RM.2	S.RF.1	S.RF.2	S.CE.1	S.CE.2	S.MS.1	S.MS.2	ÍNDICE
W_S	0,125	0,125	0,19	0,19	0,125	0,125	0,065	0,065	
Operação									
Tornear	0,025	0,088	0,111	0,133	0,120	0,106	0,036	0,062	0,682
Fresar	0,109	0,088	0,179	0,057	0,120	0,106	0,060	0,055	0,775
Brunir	0,124	0,038	0,103	0,057	0,125	0,106	0,042	0,063	0,658

Fonte: Autora, 2022

Os resultados registrados na Tabela 10 demonstram que, dentre os três processos analisados, a operação de brunir é a que possui pior desempenho ambiental, visto que o índice calculado para essa operação (0,658) se apresentou inferior aos demais. Desta forma, a aplicação da metodologia definida no presente estudo demonstra que esforços deveriam ser concentrados na implantação de melhorias nessa operação, visando melhorar seu desempenho ambiental.

Analisando a operação de brunimento, conforme resultados registrados na Tabela 10 acima disposta, é possível perceber, ainda, que dos seis subcritérios avaliados, dois destacam-se por apresentarem resultados muito abaixo dos demais: os subcritérios S.RM.2, que obteve pontuação individual 0,038 após aplicação da metodologia, e S.MS.1, que obteve pontuação

individual 0,042.

O subcritério S.RM.2 se refere à destinação dada ao resíduo sólido metálico gerado na operação (aterro, reciclagem interna, reciclagem externa). Visando melhorar o desempenho ambiental da operação de brunimento do pinhão de transmissão em avaliação, sugere-se que o resíduo metálico gerado seja destinado para reciclagem externa (uma vez que, na indústria metalmeccânica em que a presente análise foi realizada, não há recursos disponíveis para execução de reciclagem interna do material em questão). Uma aplicação prática comum para o resíduo gerado nessa operação é sua utilização como matéria-prima na indústria cimenteira.

Já o subcritério S.MS.1 avalia a eficiência na utilização de ferramentas de corte. No cálculo deste subcritério, foram considerados os valores de consumo de ferramentas na operação de brunir, relativizados em função de um valor de *benchmarking* de consumo de ferramentas nessa operação, obtido por meio de análise de dados históricos de consumo de processo semelhante (operação de brunimento de diferentes modelos de pinhão de comando produzidos na indústria metalmeccânica em questão). Conforme apresentado na Tabela 9 acima disposta, a eficiência na utilização de ferramentas na operação de brunir é de apenas 65,1%, indicando que existem oportunidades de melhoria significativas relacionada à redução no consumo dessas ferramentas.

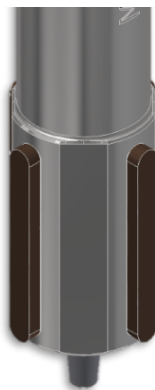
Desta forma, foi desenvolvido um projeto de aumento na eficiência do consumo de réguas abrasivas, conforme disposto no subitem 5.2.3. Após a implantação da melhoria, a metodologia aqui definida será utilizada para reavaliar o índice de desempenho ambiental da operação de brunir, possibilitando a análise de eficácia das ações tomadas para melhoria do índice em questão.

5.2.3 Projeto de melhoria do consumo de ferramentas na operação de brunir

5.2.3.1 Ferramentas utilizadas na operação de brunir

Na operação de brunimento do pinhão de transmissão em avaliação, utiliza-se um total de quatro réguas abrasivas, responsáveis pela retificação da região correspondente ao diâmetro interno do produto frente às especificações definidas no projeto, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Réguas abrasivas afixadas em haste de brunimento

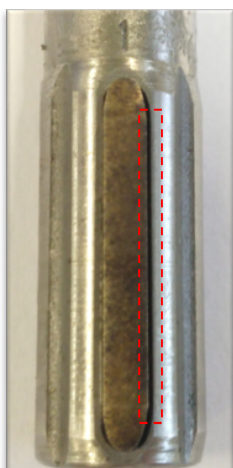


Fonte: Autora, 2022

5.2.3.2 Definição e implantação do projeto de melhoria do consumo de ferramentas na operação de brunir

Uma análise detalhada da operação de brunir demonstrou que a haste utilizada na manufatura do pinhão de comando selecionado como objeto de estudo possui uma folga considerável entre a régua abrasiva e a parede da haste, que possibilita a perda de réguas abrasivas durante a execução da operação, conforme apresentado na Figura 12. Essa folga é definida no projeto da ferramenta, no entanto, após múltiplos ciclos, o movimento de expandir e retrainr da régua abrasiva faz com que o orifício da haste onde a mesma é montada desgaste-se, situação essa que, somada às forças exercidas nas réguas durante o movimento de rotação da haste, faz com que as mesmas sejam arremessadas durante a execução da operação.

Figura 12 – Folga existente entre as superfícies da régua abrasiva e da haste de brunimento

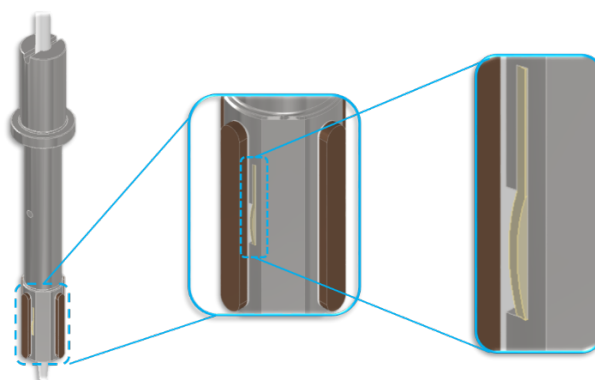


Fonte: Autora, 2022

Tendo em vista as estreitas tolerâncias exigidas nessa operação, o grau de desgaste da régua abrasiva é de extrema relevância, de forma que, uma vez que pelo menos uma das quatro réguas montadas na haste venha a se perder, faz-se necessário a substituição de todo o conjunto de réguas, visando assegurar que todas as réguas utilizadas estarão com as mesmas propriedades de corte e, desta forma, possam garantir o acabamento desejado no produto manufaturado.

Tal situação aumenta consideravelmente o consumo de ferramentas na operação, reduzindo a eficiência do processo. Assim, visando eliminar o risco de desprendimento das réguas abrasivas da haste e possível perda das mesmas, propôs-se uma alteração no projeto da haste, de forma a incluir um orifício para encaixe de uma espécie de mola de metal, cuja finalidade é comprimir a régua contra a parede da haste e, dessa forma, evitar que a mesma venha a soltar-se, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Proposta de projeto para eliminar a folga existente entre as superfícies da régua abrasiva e da haste de brunimento



Fonte: Autora, 2022

Após manufatura da nova haste e execução dos testes, identificou-se que os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que o consumo de ferramentas reduziu de 0,0298 g/peça para 0,0232 g/peça produzida na operação, uma redução de mais de 22% do consumo em questão.

Figura 14 – Implantação do projeto proposto



Fonte: Autora, 2022

Assim, com um projeto de haste mais robusto, decidiu-se avaliar a vida útil das réguas abrasivas, de forma a identificar fornecedores que pudessem fornecer produtos semelhantes, com preços competitivos e que atendessem às especificações do projeto da peça manufaturada.

Após uma série de testes realizados, foi selecionada uma régua abrasiva com vida útil quatro vezes maior que a anteriormente utilizada, em média, reduzindo o consumo de ferramenta por peça produzida de 0,0232 g/peça (valor médio de consumo após a alteração no projeto da haste) para 0,0058 g/peça (valor médio de consumo após alteração do tipo de régua abrasiva utilizada).

5.2.4 Reavaliação do índice de desempenho ambiental da operação de brunir após implantação das melhorias

Após implantação das melhorias propostas para aumento na eficiência de utilização de ferramentas na operação de brunir do pinhão de comando avaliado, foi possível recalcular o índice de desempenho ambiental dessa operação visando avaliar o grau de impacto das ações tomadas. Vale ressaltar que os índices de desempenho ambiental das operações de torneiar e fresar não sofreram alteração, visto que não foram implantadas mudanças nas mesmas.

Por sua vez, os dados de inventário da operação de brunimento apresentados na Tabela 8 se mantiveram constantes, com exceção do consumo real de ferramentas, que passou a ser de 0,0058 g/peça, conforme apresentado no subitem 5.2.3, possibilitando a obtenção dos valores individuais por subcritério avaliado após a implantação da melhoria, conforme

apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados por subcritério das operações de usinagem do pinhão de comando

Critério	RM		RF		CE		MS	
W_C	0,25		0,38		0,25		0,13	
Subcritério	S.RM.1	S.RM.2	S.RF.1	S.RF.2	S.CE.1	S.CE.2	S.MS.1	S.MS.2
W_S	0,125	0,125	0,19	0,19	0,125	0,125	0,065	0,065
Operação								
Tornear	0,202	0,700	0,587	0,700	0,964	0,850	0,554	0,952
Fresar	0,876	0,700	0,940	0,300	0,962	0,850	0,929	0,852
Brunir	0,995	0,300	0,541	0,300	1,00	0,850	3,345	0,966

Fonte: Autora, 2022

Assim, após aplicação da metodologia de avaliação de desempenho ambiental de operações de usinagem aqui definida, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 12, cujos valores para cada subcritério já se encontram multiplicados pelo respectivo peso do subcritério.

Tabela 12 – Definição do índice de desempenho ambiental de operações de usinagem do pinhão de comando após implantação de melhorias

Critério	RM		RF		CE		MS		
W_C	0,25		0,38		0,25		0,13		
Subcritério	S.RM.1	S.RM.2	S.RF.1	S.RF.2	S.CE.1	S.CE.2	S.MS.1	S.MS.2	ÍNDICE
W_S	0,125	0,125	0,19	0,19	0,125	0,125	0,065	0,065	
Operação									
Tornear	0,025	0,088	0,111	0,133	0,120	0,106	0,036	0,062	0,682
Fresar	0,109	0,088	0,179	0,057	0,120	0,106	0,060	0,055	0,775
Brunir	0,124	0,038	0,103	0,057	0,125	0,106	0,217	0,063	0,833

Fonte: Autora, 2022

Analisando a Tabela 12, é possível perceber que o índice de desempenho ambiental da operação de brunir do pinhão de comando avaliado aumentou significativamente, passando de 0,658 para 0,833, o que representa um aumento de mais de 26%.

Observa-se, ainda, que o índice de desempenho ambiental da operação de brunir superou os índices relativos às operações de tornear e fresar, de forma que, nesse novo cenário, a operação de torneamento passou a ser a mais crítica, que demandaria esforços focados na melhoria de sua eficiência ambiental.

Vale ressaltar que após a implantação da melhoria apresentada no subitem 5.2.3, o valor referente ao subcritério S.MS.1 (eficiência na utilização de ferramentas de corte) superou o

valor máximo de eficiência (100%), sendo registrado como 3,345. Tal situação se deve ao fato de que a massa média de ferramentas consumidas por peça produzida após a implantação da melhoria atingiu um resultado mais de três vezes superior ao valor de benchmarking registrado. Assim, visando a melhoria contínua do processo, é importante que esse novo valor obtido referente à eficiência no consumo de ferramentas na operação de brunimento do pinhão de comando seja utilizado como novo valor de benchmarking, quando da aplicação da metodologia definida nesse mesmo processo ou em processos semelhantes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

No contexto de melhoria contínua das atividades industriais, mostra-se de extrema relevância o desenvolvimento de ferramentas auxiliares ao processo de tomada de decisão, que possibilitem a identificação dos itens de atuação prioritários frente aos objetivos definidos.

Destaca-se que o método AHP foi utilizado como base para definição da metodologia aqui desenvolvida, no entanto algumas adaptações foram realizadas visando tornar o processo de comparação paritária dos critérios estabelecidos menos dependente do julgamento humano. No método AHP, tal processo normalmente é realizado por meio da utilização da Escala Fundamental de Saaty (1980), que define diferentes graus de importância de um critério em relação a outro, baseado na experiência e juízo dos avaliadores. No entanto, no presente estudo se optou por utilizar a ferramenta de avaliação de aspectos e impactos ambientais como parâmetro auxiliar ao processo de comparação paritária dos critérios, assegurando um maior nível de impessoalidade nas decisões tomadas.

Vale ressaltar, ainda, que as particularidades de cada empresa devem ser levadas em consideração antes da aplicação da metodologia desenvolvida, uma vez que a equação final definida para cálculo do desempenho ambiental pode ser adaptada a diferentes cenários produtivos. Após uma prévia avaliação do contexto organizacional pela equipe de julgadores, podem ser realizadas alterações nas pontuações atribuídas para o parâmetro de frequência dos impactos ambientais relacionados aos critérios selecionados, visando melhorar a acurácia dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia.

Ainda no que tange as especificidades de cada processo, a atribuição de valores numéricos aos subcritérios qualitativos definidos na metodologia deve ser realizada pela equipe avaliadora após uma análise detalhada do cenário no qual a temática relacionada ao respectivo subcritério em avaliação se encontra inserido. A valoração do subcritério qualitativo deve ser realizada com base nas políticas adotadas pela empresa, indicadores ambientais monitorados e grau de maturidade do sistema de gestão da organização referentes ao subcritério em avaliação, tomando como base os limites de pontuação definidos na escala elaborada no presente estudo.

Quanto a aplicação para validação da metodologia definida em uma indústria metalmeccânica pertencente à cadeia automotiva, identificou-se que a metodologia em questão se mostrou adequada aos seus propósitos, uma vez que esta proporciona o cálculo de índices de desempenho ambiental de diferentes operações de usinagem de metais, possibilitando a

comparação entre esses e, conseqüentemente, orientando a priorização de intervenções nas operações que apresentem uma pior performance frente às questões ambientais avaliadas. De posse dos índices de desempenho ambiental das operações analisadas, foi possível focar os esforços em um dos subcritérios que apresentou baixo desempenho em termos de eficiência e, desta forma, deu-se início ao processo de inovação, promovendo mudanças significativas e duradouras na organização. É importante ressaltar que o projeto de melhoria desenvolvido deve ser replicado para operações semelhantes, visando um melhor desempenho destas.

Outro ponto a ser observado é a importância de reavaliação do desempenho ambiental da operação após a implantação de quaisquer melhorias no processo, visando avaliar a eficácia das ações tomadas no que tange a melhoria da performance ambiental da respectiva operação de usinagem que sofreu alterações.

Objetivando a melhoria contínua dos processos da organização, faz-se relevante que a metodologia definida seja aplicada nos processos de usinagem com frequência mínima anual, uma vez que os dados de inventário levantados para aplicação da metodologia podem sofrer alterações significativas no período de um ano. Desta forma, operações que antes apresentaram uma boa performance ambiental comparadas às demais, podem demonstrar uma alteração significativa em seu desempenho após sua reavaliação, principalmente em função da ocorrência de causas especiais não previstas que podem ser, por vezes, facilmente identificadas e eliminadas.

Como trabalhos futuros, sugere-se a definição de uma metodologia específica para valoração dos subcritérios qualitativos, de forma a reduzir as limitações no tocante à subjetividade dos mesmos. Assim, a atribuição de valores na aplicação dos subcritérios qualitativos deverá ter o mínimo de dependência possível da decisão dos julgadores, de forma que os mesmos serão mais facilmente comparáveis aos subcritérios quantitativos e, por conseqüência, será maior a precisão dos resultados obtidos após a aplicação da metodologia.

Sugere-se, ainda, uma aplicação conjunta da metodologia definida no presente estudo somada a uma matriz de esforço e impacto, visando definir os pontos focais de atuação para aplicação de melhorias de processo não apenas se baseando no valor de índice de desempenho ambiental calculado, mas também avaliando os recursos necessários para proposição e posterior implantação das melhorias. A utilização de ambas as metodologias em conjunto irá propiciar às organizações uma maior segurança em seus processos de tomada de decisão, uma vez que estarão sendo quantificados os pontos prioritários de atuação somados aos esforços necessários para a implantação de projetos ambientais específicos, garantindo uma maior assertividade nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ACADEMIA PEARSON. **Criatividade e Inovação**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ALVES, M.S.; OLIVEIRA, J.F.G. **Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact**. Journal of Materials Processing Technology, n. 179, 2006, pg.185-189.
- ANTUNES, C. V.; UGAYA, C. M. L. **Método para Coleta e Análise de Dados para Avaliação de Desempenho Ambiental da Indústria Metal Mecânica**. 4th International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2013.
- BANDEIRA, Michelle Carvalho G. da S. P.; CORREIA, Anderson Ribeiro. Determinação dos critérios para avaliar o nível de serviço em um aeroporto. **Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, São José dos Campos, 2006.
- BARANA, Ana Cláudia; TOMMASO, Giovana; GOMES, Simone Damasceno. Geração, disposição e tratamento de resíduos em indústria de bebidas. In: VENTURINI FILHO, Waldemar Gastoni (Org.) **Indústria de bebidas: inovação, gestão e produção**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2011. Cap. 19, p. 389-408.
- BARBACOVİ, N. E.; PEREIRA, R. S.; GUTERRES, A. M.; LOCATELLI, D. R. S. Diagnóstico de resíduos sólidos industriais: um estudo em indústrias metal-mecânica em um município de médio porte do Rio Grande do Sul. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente.
- BARBOSA, Gabriela Gonçalves. Recursos Naturais Renováveis e Produção de Energia. **Revista Política Hoje**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 193-215, 2014. Semestral.
- BERTÉ, Rodrigo; MAZZAROTTO, Angelo Augusto Valles de Sá. **Gestão ambiental no mercado empresarial**. Curitiba: Intersaberes, 2013.
- BISPO, C. DE O. et al. Suscetibilidade induzida a escorregamentos, via aplicação do método AHP. **Diversitas Journal**, v. 5, n. 1, p. 298–314, 13 jan. 2020.
- BRASIL. **LEI Nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, Art 2º, 2 dez. 2004.
- BRASIL. **LEI Nº 13.243, de 11 de janeiro de 2016. Dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação e altera a Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, a Lei nº 6.815, de 19 de agosto de 1980, a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, a Lei nº 12.462, de 4 de agosto de 2011, a Lei nº 8.745, de 9 de dezembro de 1993, a Lei nº 8.958, de 20 de dezembro de 1994, a Lei**

nº 8.010, de 29 de março de 1990, a Lei nº 8.032, de 12 de abril de 1990, e a Lei nº 12.772, de 28 de dezembro de 2012, nos termos da Emenda Constitucional nº 85, de 26 de fevereiro de 2015. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, Art 2º, 11 jan. 2016.

CALDAS, Ricardo Melito (org.). **Gerenciamento dos Aspectos e Impactos Ambientais.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

CARÍSSIMO, Cláudio Roberto. **Análise da preferência dos peritos contadores quanto à escolha do método de avaliação de sociedades em perícias de apuração de haveres com base na análise hierárquica (AHP).** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº362. 23/06/2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A importância da Indústria de Transformação para o Brasil.** [S. l.], 18 mar. 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A importância da Indústria para o Brasil.** [S. l.], 18 mar. 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Mapa estratégico da indústria 2018-2022.** Brasília: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2018/3/mapa-estrategico-da-industria-2018-2022/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

COSTA, Helder Gomes. Introdução ao método de análise hierárquica análise multicritério no auxílio à decisão: análise multicritério no auxílio à decisão. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Niterói, v. XXXVI, 2002.

DANDOLINI, Décio Luis. **Gerenciamento ambiental de fluidos de corte em indústrias metal-mecânicas.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33–47, nov. 2014.

DIAS, Alexandre Magno de Paula. **Avaliação ambiental de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 8. ed. São Paulo: Artiliber, 2013.

- FERIGATTO, E. A.; BONILLA, S. H. Indústria 4.0 e sustentabilidade. In: SACOMANO, J. B.; GONÇALVES, R. F.; SILVA, M. T.; BONILLA, S. H, SÁTYRO, W. C. (Org.) **Indústria 4.0: conceitos e fundamentos**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2018. Cap. 8, p. 113-120.
- FERRARESI, Dino. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgar Blücher. 1970.
- FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1.ed. Curitiba: InterSaberes, 2017. 337p. (Série Administração da Produção)
- FRANÇA, R. G.; RUARO, É. C. R. Diagnóstico da disposição final dos resíduos sólidos urbanos na região da Associação dos Municípios do Alto Irani (AMAI), Santa Catarina. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 14, n. 6, p. 2191–2197, dez. 2009.
- GARCEZ, Lucília; GARCEZ, Cristina. **Energia**. 1. ed. São Paulo: Callis Editora, 2010.
- GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **REVISTA USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 1 fev. 2007.
- GOMES, Luciana Paulo; KOHL, Claudia Adriana; SOUZA, Caroline Lobato de Lima; REMPEL, Neuri; MIRANDA, Luis Alcides Schiavo; MORAES, Carlos Alberto Mendes. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 449–462, set. 2015.
- GONÇALVES, Penha Suely de Castro. **Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2008.
- IGNÁCIO, E. A. **Caracterização da legislação ambiental brasileira voltada para a utilização de fluidos de corte na indústria metal-mecânica**. 1998. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/77741/142458.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 abr. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Comissão Nacional de Classificação**. Disponível em <<https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?view=divisao&tipo=cnae&versao=10&divisao=25&fbclid=IwAR0Dkkj1fg7RE1Qvmvb1zSFTEPhMJ5mP-qbUWd4-F07VTyHhArL3c-hljrg>>. Acesso em 15.out.2019.
- JIANG, Zhigang; ZHANG, Hua; SUTHERLAND, John W.. Development of an environmental performance assessment method for manufacturing process plans. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. [S. L.], p. 783-790. jun. 2011.
- KURUKULASURIYA, Manoj; GAMAGE, Janaka; MANGALA, Janaka. Sustainable machining: Assessment of environmental performance of milling. **Procedia Manufacturing**. Moratuwa, p. 455-462. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.188>. Acesso em: 31 maio 2022.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos** [livro eletrônico]. 1.ed.digital. São Paulo: Blucher, 2013. 235p.

LIRA, Valdemir Martins. **Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2017. 240p.

LISBOA, F. C.; MORAES, J. J. B.; HIRASHITA, M. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33., 2013, Salvador. **Anais eletrônicos [...]**. Salvador: ABEPRO, 2013. p. 1-16. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_185_056_23095.pdf. Acesso em: 19 abr. 2020.

LONGARAY, A. A. ; BUCCO, G. . Emprego da análise hierárquica de processos no desenvolvimento de sistema de apoio à decisão para seleção de fornecedores de materiais de informática: o caso da FAURG. **Anais do ENEGEP - ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, São Carlos, XXX, 2010.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Blucher, 2015. 407p.

MARINS, Cristiano Souza; SOUZA, Daniela de Oliveira; BARROS, Magno da Silva. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, [s. l.], v. XLI, 2009.

MARTINS, F. G.; COELHO, L. S. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 7, nº 1, p. 65-80, mar/2012.

MOTA, José Carlos; ALMEIDA, Mércia Melo de; ALENCAR, Vladimir Costa de; CURI, Wilson Fadlo. Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 19 jul. 2009.

OLIVEIRA, J. F. G. DE; ALVES, S. M.. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Production**, v. 17, n. 1, p. 129–138, abr. 2007.

PAIXÃO, Márcia Valéria. **Inovação em produtos e serviços**. 1. ed. Curitiba: InterSaberes, 2014.

PHILIPPI JR, Arlindo; SAMPAIO, Carlos Alberto Cioce; FERNANDES, V. **Gestão empresarial e sustentabilidade**. Barueri: Manole, 2017

PIMENTA, Lianne Borja; BELTRÃO, Norma Ely Santos; GEMAQUE, Amanda Madalena da Silva; TAVARES, Paulo Amador. **Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais**. Interações (Campo Grande), [S.L.], v. 20, n. 2, p. 407-420, 5 jul. 2019. <Http://dx.doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfXjpPR8M/?lang=pt#>. Acesso em: 25 set. 2021.

POSSOLLI, Gabriela Eyng. **Gestão da inovação e do conhecimento**. Curitiba: InterSaberes, 2012. v. 2.

REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**. 1.ed. Curitiba: InterSaberes, 2016.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max; ROSADO, Pablo. **Energy**. OurWorldInData.org. 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy>. Acesso em: 10 ago. 2022.

SANTANA, Julie Catherine Siqueira; RIBEIRO, Maria Eduarda de Oliveira; SOUZA, Paulo Roberto de Azevedo; DE SOUZA, João Paulo Silva; PERES, Silane Mattos. O uso e produção da energia limpa como método de preservação ambiental sustentável. **Epitaya E-books**, [S. l.], v. 1, n. 12, p. 99-111, 2020. DOI: 10.47879/ed.ep.2020144p99. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/53>. Acesso em: 6 abril. 2022.

SANTOS, Flávia Ferreira. **Análise de investimentos em AMT (advanced manufacturing technology): uso de um modelo multicriterial – AHP (Analytic hierarchy process)**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SENNA, Márcia Dantas de; GARBIN, Renan Figueira. **Avaliação comparativa entre fontes alternativas de energia considerando incertezas e externalidades**. 2009. 129 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA FILHO, José Carlos Lázaro; BRAGA, Clara Suzana Cardoso; REBOUÇAS, Sílvia Maria Dias Pedro. Percepção de Obstáculos à Inovação na Indústria Brasileira de Transformação. **International Journal Of Innovation**. São Paulo, p. 114-131. Janeiro-Abril, 2017. Disponível em: 10.5585/iji.v5i1.114. Acesso em: 12 dez. 2021.

TEDESCO, A. M.; OLIVEIRA, G. A.; TROJAN, F. Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 401–407, jun. 2021.

TRINDADE JUNIOR, José Carlos Nogueira. **Obtenção, mercado e reciclagem de sucatas ferrosas na indústria siderúrgica brasileira**. 2013. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

WITKOWSKI, Vinicius. **Reaproveitamento de cavacos de usinagem utilizando a metodologia de processamento da metalurgia do pó**. 2018. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.