

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Simone Merlini**

**IMPACTO DAS EMISSÕES DE POLUENTES GERADOS PELO CORTE  
A PLASMA DE CHAPAS METÁLICAS**

Santa Maria, RS  
2024

**Simone Merlini**

**IMPACTO DAS EMISSÕES DE POLUENTES GERADOS PELO CORTE A  
PLASMA DE CHAPAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

Santa Maria, RS  
2024

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Merlini, Simone  
IMPACTO DAS EMISSÕES DE POLUENTES GERADOS PELO CORTE A  
PLASMA DE CHAPAS METÁLICAS / Simone Merlini.- 2024.  
77 p.; 30 cm

Orientador: Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, RS, 2024

1. Emissão de poluentes 2. Corte a plasma 3.  
Indústria metalmeccânica I. Neuenfeldt Júnior, Alvaro Luiz  
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, SIMONE MERLINI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Simone Merlini**

**IMPACTO DAS EMISSÕES DE POLUENTES GERADOS PELO CORTE A  
PLASMA DE CHAPAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Engenharia de Produção.**

Aprovada em 15 de março de 2024:

---

**Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Ismael Cristofer Baierle, Dr. (FURG)**

---

**Paula Donaduzzi Rigo, Dra. (UFRGS)**

Santa Maria, RS  
2024

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

## RESUMO

### IMPACTO DAS EMISSÕES DE POLUENTES GERADOS PELO CORTE A PLASMA DE CHAPAS METÁLICAS

AUTORA: Simone Merlini

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

A indústria metalmecânica envolve a transformação de metais em um produto para o seguimento de processos ou em produto pronto para o consumidor final. Um dos problemas enfrentados pela indústria metalmecânica no processo de corte a plasma são as emissões de poluentes. Os poluentes geram impactos no ambiente e também no próprio local de trabalho, através de emissões. Com o uso de máquinas e equipamentos, ocorre a emissão de poluentes, gerada durante o processo de corte das chapas, para obter peças menores. O objetivo geral desta pesquisa consiste em medir o impacto das emissões de poluentes ocasionados pelo corte a plasma de chapas metálicas na indústria metalmecânica. Um procedimento metodológico organizado em etapas foi desenvolvido, iniciando pela definição do problema, seguindo dos parâmetros operacionais e técnicos, descrição técnica dos poluentes, mensuração do impacto, aplicação da sistemática de mensuração e resultados e finalizado nas considerações finais. Também, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com base em artigos científicos selecionados e estudados e a descrição do cenário da pesquisa sobre o processo de corte a plasma de chapas metálicas. Com a utilização de métricas elaboradas para os fatores de impacto do CO<sub>2</sub>, da energia elétrica, da água e da matéria-prima, foi possível desenvolver e analisar os impactos das emissões dos poluentes, onde os mesmos são convertidos em custos de produção. E uma análise de cada fator de impacto com os pilares do tripé da sustentabilidade foi desenvolvida. Por fim, conclui-se, que o impacto nos custos relacionados a matéria-prima é maior comparando o impacto nos custos da energia elétrica, da água e do CO<sub>2</sub>. É possível verificar a importância da utilização de alternativas de redução da emissão de poluentes nas indústrias.

**Palavras-chave:** Emissão de poluentes, Corte a plasma, Indústria metalmecânica.

## **ABSTRACT**

### **IMPACT OF EMISSIONS OF POLLUTANTS GENERATED FOR THE PLASMA CUTTING THE METAL SHEETS**

**AUTHORESS:** Simone Merlini

**ADVISOR:** Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

The metalworking industry involves the transformation of metals into a product for following processes or into a product ready for the final consumer. One of the problems faced by the metalworking industry in the plasma cutting process is pollutant emissions. Pollutants generate impacts on the environment and also on the workplace itself, through emissions. With the use of machines and equipment, pollutants are emitted, generated during the sheet cutting process, to obtain smaller pieces. The main objective of this research is to measure the impact of pollutant emissions caused by plasma cutting of metal sheets in the metalworking industry. A methodological procedure organized in stages was developed, starting with the definition of the problem, followed by the operational and technical parameters, technical description of the pollutants, measurement of the impact, application of the measurement system and results and ending with the final considerations of the research. Furthermore, a bibliographical research was developed, based on selected and studied scientific articles and a description of the research scenario regarding the plasma cutting process of metal sheets. A qualitative and quantitative approach was used in the research. Using metrics designed for the impact factors of CO<sub>2</sub>, electricity, water and raw materials, it was possible to develop and analyze the impacts of pollutant emissions, where they are converted into production costs. And an analysis of each impact factor with the pillars of the sustainability tripod was developed. Finally, it is concluded that the impact on costs related to raw materials is greater compared to the impact on the costs of electricity, water and CO<sub>2</sub>. It is possible to verify the importance of using alternatives to reduce pollutant emissions in industries.

**Keywords:** Pollutant emission, Plasma cutting, Metalmechanical industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de corte a plasma .....	22
Figura 2 - Desenvolvimento das etapas da pesquisa .....	25
Figura 3 - BPMN para a sistemática de mensuração.....	46
Figura 4 - Modelo ilustrativo do Tripé da Sustentabilidade.....	49
Figura 5 - Arranjos da instância <i>ex50</i> com $W=100$ cm e $H=172$ cm .....	58
Figura 6 - Arranjos da instância <i>ex50</i> com $W=150$ cm e $H=111$ cm.....	58
Figura 7 - Arranjos da instância <i>ex50</i> com $W=200$ cm e $H=85$ cm .....	59
Figura 8 - Resultados obtidos para o indicador consumo de gás.....	61
Figura 9 - Resultados obtidos para o indicador consumo de energia elétrica .....	62
Figura 10 - Resultados obtidos para o indicador proporção de matéria-prima sucateada.....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Enquadramento metodológico.....	20
Quadro 2 - Strings utilizadas e o número de artigos encontrados .....	27
Quadro 3 - Principais propriedades dos estados físicos e químicos do gás oxigênio.....	31
Quadro 4 - Fatores de impacto, indicadores e métricas.....	55
Quadro 5 - Valores definidos para os parâmetros operacionais .....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Relatório das saídas de dados obtidas para cada uma das 40 simulações realizadas..	60
Tabela 2 - Comparativa dos custos de cada indicador.....	65

## LISTA DE ABREVIACÕES

AGVs	<i>Automated Guided Vehicles</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
BCA	<i>Biodiversity Conservation Actions</i>
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCRD	<i>Central Composite Rotational Design</i>
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i>
CHAZ	<i>Cut Heat Affected Zones</i>
CM	<i>Conventional Machining</i>
CMI	<i>Chinese Manufacturing Industry</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CRW	<i>Cold Rolling Wastewater</i>
DAF	<i>Dissolved Air Flotation</i>
DoE	Experimento de Fator Completo
EP	<i>Environmental Performance</i>
FP	<i>Financial Performance</i>
FM	<i>Finish Machining</i>
FID	<i>Flame Ionization Detector</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRA	<i>Gray Relational Analysis</i>
HMQL	<i>Hybrid Minimum Quantity Lubrication</i>
ISFs	<i>Implementation Success Factors</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LI	Limite Inferior
LS	Limite Superior
MQL	<i>Minimum Quantity Lubrication</i>
MRR	<i>Material Removal Rate</i>
MWFs	<i>Metalworking Fluids</i>
PAC	Corte por arco de plasma
PAHs	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i>
PIB	Produto Interno Bruto
RG	<i>Revenue Growth</i>

ROA	<i>Return On Assets</i>
RPB	<i>Rotating Packed Bed</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SEM	<i>Structural Equation Modeling</i>
TBL	<i>Triple Bottom Line</i>
TEM	<i>Transmission Electron Microscope</i>
VL	Velocidade Lenta
VR	Velocidade Rápida
WCJ	<i>Technique Combined Oil and Water</i>
WEDM	<i>Wire Electrical Discharge Machining</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	16
1.2	OBJETIVO .....	17
1.3	JUSTIFICATIVA .....	17
1.4	METODOLOGIA .....	19
<b>1.4.1</b>	<b>Enquadramento metodológico</b> .....	19
<b>1.4.2</b>	<b>Cenário de pesquisa: O processo de corte a plasma</b> .....	21
<b>1.4.3</b>	<b>Etapas da pesquisa</b> .....	25
<b>2</b>	<b>SISTEMÁTICA DE MENSURAÇÃO</b> .....	30
2.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS .....	30
2.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS TÉCNICOS .....	32
2.3	DESCRIÇÃO TÉCNICA DOS POLUENTES .....	35
<b>2.3.1</b>	<b>Emissão de CO<sub>2</sub></b> .....	37
<b>2.3.2</b>	<b>Água</b> .....	40
<b>2.3.3</b>	<b>Energia elétrica</b> .....	41
<b>2.3.4</b>	<b>Matéria-prima</b> .....	43
2.4	MENSURAÇÃO DO IMPACTO .....	45
<b>2.4.1</b>	<b>Business process model and notation (BPMN)</b> .....	45
<b>2.4.2</b>	<b>Tripé da sustentabilidade</b> .....	49
<b>2.4.3</b>	<b>Indicadores e métricas da mensuração</b> .....	53
<b>3</b>	<b>APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA DE MENSURAÇÃO E RESULTADOS</b> .....	56
3.1	VALORES DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS.....	56
3.2	DEFINIÇÃO DAS INSTÂNCIAS E SIMULAÇÃO.....	57
3.3	ANÁLISE QUANTITATIVA: INDICADORES.....	61
3.4	ANÁLISE QUALITATIVA: TRIPÉ DA SUSTENTABILIDADE .....	66
<b>3.4.1</b>	<b>Pilar social</b> .....	66
<b>3.4.2</b>	<b>Pilar ambiental</b> .....	67

<b>3.4.3 Pilar econômico.....</b>	<b>68</b>
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da competitividade e das exigências do mercado nos últimos anos estimula indústrias de diferentes setores a buscarem a otimização dos processos produtivos e conseqüentemente a diminuir os desperdícios (GODKE, 2016). O setor industrial vem crescendo cada vez mais no Brasil, com o pleno desenvolvimento de melhorias contínuas e com clientes cada vez mais exigente. Para que as empresas estabeleçam melhorias nos processos quanto à eficiência, aos preços atrativos, à excelência na qualidade junto com flexibilidade e à resposta rápida aos entraves do mercado, é necessária a identificação de gargalos produtivos (DE GENARO CHIROLI et al., 2016).

A indústria metalmeccânica, envolve a transformação de metais como cobre, aço, ferro, prata e ouro em produtos para indústria ou para o consumidor final. A metalurgia é fundamental para a existência de máquinas e veículos, sendo que os processos incluem usinagem, soldagem, deformação plástica e fundição (FIRJAN, 2021). O conjunto de atividades que compõem o setor metalmeccânico gera uma grande diversidade de bens, que constituem, na maioria, insumos e componentes chave para um amplo conjunto de indústrias relevantes, como o setor automotivo, aeronáutico, o setor de energia ou construção. Os produtos derivados da indústria metalmeccânica são fundamentais para garantir uma oferta de qualidade em ambientes competitivos internacionais, pelo que exige o reforço das capacidades competitivas e tecnológicas (TORRES et al., 2018). Em complemento, na indústria metalmeccânica, a concentração produtiva viabiliza ganhos de escala, ações de marketing, grandes investimentos, bem como o esforço inovativo. Invariavelmente, o segmento metalmeccânico é dominado por grandes empresas, com inserção competitiva em nível global (GEREMIA, 2021).

A indústria metalmeccânica é uma grande consumidora de aço, nas diferentes atividades de produção. Segundo o Instituto Aço Brasil (2021), a participação dos principais setores consumidores de aço estão em: construção civil com 41,2%, setor automotivo com 21,3%, bens de capital com 19,6%, utilidades domésticas e comerciais com 6,4%, embalagens e recipientes com 3,4% e outros setores correspondente a 8,1%.

A produção de aço bruto cresceu 14,8% em 2021, para 36,1 milhões de toneladas. Na comparação internacional, a indústria brasileira do aço foi responsável por 1,8% da produção mundial, mantendo-se na 9ª colocação no ranking mundial de produtores de aço. Já no ranking da América Latina, o Brasil se manteve na 1ª posição, com 55,8% da produção de aço da região (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

O corte a plasma em chapas metálicas é utilizado em indústrias metalmeccânicas para o corte de chapas de diferentes espessuras e material, possuindo como característica uma melhor precisão durante o processo de corte em relação ao oxicorte e mais agilidade. O corte a plasma é um processo industrial amplamente utilizado para o corte de metais. O princípio de uma tocha de corte a plasma é estabelecer um arco elétrico entre a tocha e a peça de trabalho, produzindo um jato de alta temperatura que impacta a peça e faz com que o metal da chapa derreta. Devido à forte velocidade do jato, o metal fundido é empurrado para fora da área de impacto e deixa um corte na placa. Com o uso de novos tipos de bicos e outras inovações no projeto de tochas de corte a plasma, os avanços recentes estão melhorando constantemente a eficiência e a precisão do corte a plasma. Isso está tornando o processo cada vez mais interessante em comparação com o corte a laser (GODINAUD et al., 2022). Porém, como consequência, a utilização de máquinas e equipamentos para a realização do corte a plasma em chapas metálicas implicam na emissão de poluentes, causando impactos econômicos, sociais e ambientais no local de trabalho (GUEDES, 2021; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022; NEDERMAN, 2021).

A ciência já determinou de forma incontestável que as fronteiras ecológicas globais estão sendo ultrapassadas, abrindo a probabilidade de transformações bruscas e incontroláveis se não houver mudanças urgentes. O atual momento histórico, marcado por profundas crises ecológicas, econômicas e sociais, exige repensar essa situação à luz dos limites que estão sendo impostos pela própria natureza (MARTINE e ALVES, 2015). Nesse contexto, o impacto gerado pela emissão de poluentes pelas indústrias está cada vez mais preocupante. Os processos utilizados durante uma produção, acabam ocasionando poluentes agressivos ao meio ambiente e até mesmo para as pessoas. Para a indústria metalmeccânica, os impactos gerados pela emissão de poluentes devem ser tratados de forma a melhorar todos os procedimentos utilizados durante todos os processos geradores de poluentes.

## 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Um dos problemas gerados pelo corte a plasma de chapas metálicas na indústria metalmeccânica é as emissões dos poluentes, gerando impactos. Perante a esta situação, buscando entender melhor o problema e em seguida buscar uma solução para minimizar os impactos, foi definido o problema da pesquisa como: Quais são os impactos gerados pela utilização do corte a plasma em chapas metálicas e a influência dentro de um sistema produtivo?

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa consiste em medir o impacto das emissões de poluentes ocasionadas pelo corte a plasma de chapas metálicas.

Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar os poluentes gerados pela utilização do processo de corte a plasma;
- b) Desenvolver uma sistemática de mensuração dos impactos das emissões de poluentes;
- c) Aplicar a sistemática de mensuração desenvolvida.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Com o aumento da industrialização com o passar dos anos, acabou gerando um elevado índice de problemas econômicos, sociais e ambientais, que podem ser caracterizados pelo tripé da sustentabilidade. Assim, é preciso ter um olhar específico sobre estes problemas, para que possam ser estudados, tratados e melhorados.

A relevância econômica da cadeia produtiva associada a indústria metalmeccânica é indiscutível. Porém, é preciso dar mais atenção aos poluentes gerados pelos processos produtivos, dado os possíveis impactos sociais, econômicos e ambientais. Em específico, indústria precisa estar diretamente conectada ao meio ambiente, para promover um desenvolvimento sustentável visível para a sociedade.

Segundo dados do Instituto Aço Brasil, as vendas internas em maio de 2022 tiveram crescimento de 3,5% frente ao verificado em abril de 2022, atingindo 1,8 milhão de toneladas. O consumo aparente de produtos siderúrgicos no mês de maio foi de 2,1 milhões de toneladas, 5,8% acima do verificado em abril de 2022. Em maio, a produção brasileira de aço bruto foi de 3,0 milhões de toneladas, representando alta de 1,7% frente ao apurado no mês de abril de 2022. A indústria do aço teve um crescimento no ano de 2021 com 36,2 milhões de toneladas e um consumo aparente de 26,5 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022). Mesmo com uma grande elevação do preço de compra do aço, foi possível obter um aumento significativo de compra no mesmo ano.

O aço está presente no nosso dia a dia, nos mais diferentes meios, por isso, muitas vezes torna-se despercebido. A utilização do aço faz parte de diferentes áreas como: no setor de

energia, na agricultura, no setor de transporte, na construção civil, nos utensílios domésticos, em embalagens e recipientes, entre outro. Nos últimos anos houve um novo recorde no comércio mundial de produtos siderúrgicos. A partir do rápido aumento da demanda global de aço, mudando para a cadeia de suprimentos de aço do mundo, os produtores de aço enfrentam pressão sobre as matérias-primas e preços (MELE; MAGAZZINO, 2020). Em 2014-2017, houve uma tendência crescente de exportação de alguns dos grandes produtores. De uma exportação média anual de 415,8 milhões de toneladas entre 2011 e 2013, o comércio mundial de aço subiu para 465,2 milhões de toneladas entre 2014 e 2017, com um aumento de 11,9% (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2021). Entre os anos de 2018 e 2020, a exportação do aço foi de 37.288.000 toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021), uma pequena queda, devido a inúmeros fatores relacionados a pandemia do COVID-19. No ano de 2021, a produção de aço bruto foi de 36,2 milhões de toneladas, com uma exportação direta de 11,0 milhões de toneladas e com as exportações indiretas de 2,3 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

O consumo de aço tem aumentado com o passar dos anos. No ano de 2020 o maior consumidor de aço do mundo foi a Ásia, com um consumo de 1.097,6 milhões de toneladas e em segundo lugar, ficou a China com 893,1 milhões de toneladas. Já para o ano de 2021, a Ásia também liderou o ranking com um consumo de 1.103,0 milhões de toneladas e em segundo lugar a China 870,5 milhões de toneladas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022). Na indústria metalmeccânica, a utilização do aço é imprescindível. As chapas metálicas são utilizadas para a fabricação de diferentes produtos em diferentes áreas de atuação, como na fabricação de máquinas e equipamentos, implementos rodoviários, implementos agrícolas, e uma infinidade de novos produtos.

O processo de corte a plasma é muito utilizado pela indústria siderúrgica, pelas inúmeras vantagens na utilização que são entre elas, economia em relação ao gás aplicável, precisão no corte, alta qualidade e acabamento da superfície cortada. Devido à crescente demanda por produtos industriais, houve nos últimos anos um aumento na necessidade de desenvolvimento dos processos já existentes. O desenvolvimento resultou no crescimento do processo de corte por plasma utilizando ar comprimido ou gases diversos, que apresenta mais benefícios do que o oxicorte. Principalmente por cortar todo tipo de material metálico como aço inoxidável, aço carbono, materiais de ligas especiais, cobre, alumínio e o ferro fundido (SUMIG, 2021).

Com o avanço da tecnologia dos inversores nos últimos anos, o corte a plasma substituiu com vantagens as operações do oxicorte e sistemas automatizados em mesas com comandos via CNC. Conhecendo melhor o comportamento dos materiais e as características metalúrgicas,

o corte a plasma tornou um grande aliado nas operações de corte das empresas do setor metalmeccânico (SUMIG, 2021).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2022), a indústria do aço considera importante as discussões sobre o mercado de créditos de carbono nacional, que vem incentivando o desenvolvimento de novos processos e produtos com menor intensidade de carbono. E tem buscado unir esforços com os fornecedores e clientes visando a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a partir do uso de matérias-primas e insumos com menor intensidade de carbono e do desenvolvimento de aços mais leves e resistentes. O cenário para reduzir a emissão do GEE na indústria do aço está especificada em curto, médio e longo prazo, onde orientam a utilização de tecnologias que proporcionam uma baixa emissão de carbono.

O aço é o material mais reciclado no mundo. Automóveis, fogões, geladeiras e outros produtos feitos de aço, após o fim da vida útil, são transformados em sucata que é valiosa matéria-prima encaminhada para as aciarias para produzir aço de excelente qualidade. A sucata de aço desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa do setor. Para cada tonelada de sucata reciclada, é evitada a emissão de 1,5 toneladas de CO<sub>2</sub> (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022). Assim, devido ao crescimento da indústria metalmeccânica no Brasil e também no Mundo, ocorreu um elevado aumento de emissões de poluentes gerados pelas mesmas. As emissões de poluentes impactaram diretamente em fatores ambientais, mas também em fatores econômicos e sociais.

## 1.4 METODOLOGIA

### 1.4.1 Enquadramento metodológico

Para Marconi e Lakatos (2018), a realização da pesquisa é uma atividade para averiguação de um problema teórico e prático, aplicando-se métodos científicos.

Quanto à abordagem do problema trata-se de uma pesquisa qualitativa e quantitativa, que segundo Richardson (2014), descreve a complexidade de determinado problema, analisar a interação de certas variáveis, compreender e classificar processos dinâmicos vividos por grupos sociais. Segundo a uma abordagem qualitativa, Proetti (2017), afirma que a pesquisa qualitativa não visa à quantificação, mas sim ao direcionamento para o desenvolvimento de

pesquisas que buscam respostas que possibilitam entender, descrever e interpretar fatos. Ela permite ao pesquisador manter contato direto e interativo com o objeto de pesquisa. A pesquisa quantitativa segue com rigor de pesquisa a um plano previamente estabelecido, com hipóteses e variáveis definidas pelo estudioso. Ela visa enumerar e medir eventos de forma objetiva e precisa.

Em relação à pesquisa quantitativa, Lando (2020), apresenta como definição, sendo aquela onde o pesquisador vai analisar uma quantidade de dados de uma amostra, onde as informações são expressas em termos numéricos.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como descritiva. Ela é descritiva porque visa descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática (GIL, 2018).

O procedimento adotado na presente pesquisa é uma pesquisa bibliográfica. Inicialmente é realizada uma pesquisa bibliográfica, para um melhor entendimento do que já foi produzido sobre o assunto. Esse tipo de pesquisa ajuda a compreender se o entendimento de um problema pode ser adquirido por meio dele, ou também é necessário o conhecimento da premissa da pesquisa a resolver. Ainda, a pesquisa bibliográfica, pode ser considerada o primeiro passo de qualquer pesquisa científica (MARCONI; LAKATOS, 2018). Conforme Gil (2018), é classificada em bibliográfica, de revisão sistemática, operacional e estudo de caso, onde é realizada a partir de material já publicado, construído principalmente de livros, artigos de periódicos e informações disponíveis na internet.

Quanto à natureza é uma pesquisa aplicada, pois poderá ser feita a aplicação de ferramentas no ambiente de pesquisa. De acordo com Gil (2018), a pesquisa aplicada é voltada à aquisição de conhecimento com vistas a aplicação numa situação específica. Segundo Matias-Pereira (2019) a pesquisa aplicada tem como objetivo gerar e adquirir conhecimentos para a aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos.

Quadro 1: Enquadramento metodológico.

<b>Natureza</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Procedimentos</b>	<b>Execução</b>
Aplicada	Qualitativa e Quantitativa	Descritiva	Pesquisa bibliográfica	Consulta as fontes apresentadas no capítulo 1
			Revisão narrativa	Aplicação da revisão narrativa para o desenvolvimento dos capítulos 1 e 2
			Análise e comparação dos resultados	Discussão dos resultados obtidos no capítulo 3

Fonte: Elaborado pela autora.

Os procedimentos metodológicos são utilizados na presente pesquisa como ferramentas para o estudo de emissão de poluentes gerados pelo corte a plasma de chapas metálicas, a partir dos procedimentos do enquadramento metodológico.

#### **1.4.2 Cenário de pesquisa: O processo de corte a plasma**

Com o aumento na demanda por produtos industriais, com passar do tempo, ocorreu a necessidade de melhoria dos processos de corte a plasma existentes. Uma das melhorias se deu no corte de metais pelo processo oxicorte, um processo utilizado por muitas empresas. Este desenvolvimento resultou no crescimento do processo de corte por plasma utilizando ar comprimido ou gases diversos, que apresenta mais vantagens do que o oxicorte (SUMIG, 2021).

Segundo Sumig (2021), o corte a plasma tornou um grande adepto nas operações de corte das indústrias metalmeccânicas. Com o progresso da tecnologia dos inversores nos últimos anos, as operações do oxicorte e sistemas automatizados em mesas com comandos do CNC, foram possíveis de serem substituídas pelo processo de corte a plasma.

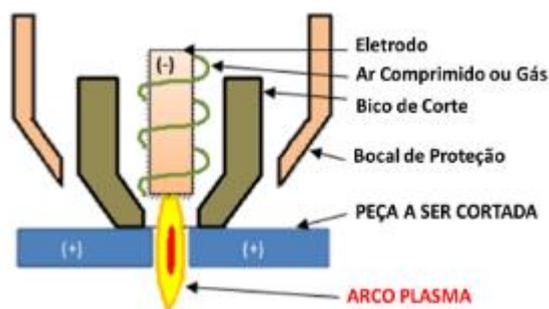
O corte térmico, em particular o corte a arco de plasma é frequentemente usado para preparar elementos. O processo de corte a arco plasma envolve derreter e ejetar o metal líquido da abertura de corte com um arco elétrico de plasma altamente concentrado que é gerado entre o eletrodo não consumível e a peça de trabalho (RZEŹNIKIEWICZ; GÓRKA, 2021).

Todos os gases usados em soldagem podem ser usados para corte a plasma: argônio, nitrogênio, hidrogênio, hélio, oxigênio e misturas com aditivos de hidrocarbonetos. Durante o processo de corte, esses gases afetam a estrutura dos materiais, alterações químicas e estrutura da superfície de corte na camada adjacente ao material de corte. Esses gases também afetam as propriedades operacionais do produto acabado, elementos ou nas juntas soldadas proprietárias (RZEŹNIKIEWICZ; GÓRKA, 2021).

O corte a plasma é um processo de corte de material metálico, que ocorre através da energia gerada por um arco de plasma (que vem a ser o 4º estado da matéria) formado pela ionização do gás utilizado na operação. O gás a ser utilizado depende dos recursos da fonte de energia utilizada, da tocha de corte e da aplicação (tipo de material e espessura a ser cortado). Gases como argônio, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio são utilizados no corte a plasma, inclusive o ar comprimido, pois o ar possui cerca de 78% de nitrogênio, suficiente para ser ionizado e formar o arco de plasma. O corte a plasma utiliza tochas especialmente desenvolvidas

para os diferentes tipos de gases que são alimentados sob alta pressão e vazão apropriada. Assim, não somente geram o arco plasma, mas também forçam a saída do arco através de um pequeno orifício localizado na cabeça da tocha (SUMIG, 2021), como apresentado na Figura 1.

Figura 1: Esquema de corte a plasma.



Fonte: SUMIG, 2021.

O corte a plasma é de suma importância para os processos dentro de uma organização. O desempenho do corte por ar comprimido usa um fluxo de alta energia como fonte de calor, este é um exemplo de aplicação, onde é preciso um procedimento bem elaborado para obter um corte preciso e sem irregularidades.

O corte é geralmente uma das etapas iniciais e básicas operações do processo de fabricação de peças soldadas, estruturas e elementos da realização de construções (RZEŹNIKIEWICZ; GÓRKA, 2021). Para Devaraj et al. (2020), o corte a arco de plasma (PAC), pode ser amplamente utilizado para cortar as chapas metálicas com perfis intrincados. O presente trabalho se concentra em uma modelagem inteligente do processo de PAC e na investigação das características de multiqualidade dos parâmetros de PAC usando a abordagem da lógica *fuzzy*. A metodologia de superfície de resposta *Box-Behnken* é incorporada para projetar e conduzir os experimentos, e estabelecer a relação entre os parâmetros do PAC, como velocidade de corte, pressão do gás, corrente do arco e distância de afastamento e respostas que incluem a taxa de remoção de material, cone de corte e zona afetada pelo calor. Os resultados das variações nos parâmetros do processo PAC nas respostas selecionadas são estimados através da realização da análise de sensibilidade.

O corte por arco de plasma é um processo industrial muito utilizado para o corte de diferentes tipos de metais e condições de operação. Em Magid (2021), a utilização de experimentos de corte a plasma usando características do material e detalhes dos parâmetros, foram a fim de obter um corte de qualidade. A seleção de três parâmetros, foram usados para

identificar a velocidade de corte, a potência do motor de elevação e a pressão do gás de plasma, com 20 leituras experimentais. Com a utilização de um software para a comparação das entradas e respostas dos parâmetros, os resultados foram claros com níveis de agente dos valores mostrados em solução global, sendo a pressão definida em 2.000, potência em 1250 e velocidade em 626,2626. Portanto o nível de aceitação composta dessas três variáveis foi de 0,99996.

Em Duplak et al. (2019), a otimização do processo de corte é muito importante do ponto de vista de qualidade e economia. Para a realização do experimento, utilizaram a máquina de corte a plasma e material S355JR, sendo necessário conhecer as principais propriedades mecânicas e composição química. Também utilizado o experimento de fator completo (DoE) para a detecção e posterior avaliação do parâmetro de rugosidade da superfície  $R_z$  e a análise do efeito de três fatores, a corrente em A, velocidade de deslocamento em m/min e pressão do gás de plasma em MPa. O resultado de cada série de experimentos é uma função de regressão que pode prever o  $R_z$  valores de acordo com os parâmetros do processo em determinados intervalos. Na primeira série de experimentos é praticamente aplicável, principalmente devido ao baixo preço do gás de processo, mas é mais adequada para a divisão grosseira de produtos semiacabados. Na segunda série de experimentos, a qualidade superficial exigida já foi alcançada. Na terceira série de experimentos, a melhor qualidade da superfície de corte foi alcançada, mas esta alternativa é economicamente menos vantajosa.

Para Tsiolikas et al. (2018), os dados experimentais obtidos, foram utilizados para treinar a propagação *feed forward back* para prever os indicadores de qualidade do processo de corte a plasma. A partir da realização de uma investigação experimental do processo de corte a arco, os parâmetros de processo examinados foram a velocidade de corte, distância de afastamento da tocha e tensão do arco. Os parâmetros de treinamento e arquitetura da rede neural artificial foram otimizados pela implementação do método Taguchi. A qualidade da superfície de corte foi identificada medindo a rugosidade da superfície e a precisão dimensional dos corpos de prova usinados. Os resultados mostraram que o fator mais significativo é a taxa de aprendizagem, que possui o maior percentual de contribuição (68,78%). Além disso, de acordo com o diagrama Anom, o erro quadrático médio mínimo pode ser alcançado quando os três parâmetros são definidos no nível mais baixo.

A pesquisa de Tashiro et al. (2017), tem como objetivo desenvolver um novo processo de corte a plasma de oxigênio para uma chapa grossa de aço. Para o método experimental, utilizou uma máquina de corte com corrente de 300 A, gás principal e o gás twister foram  $O_2 + 10\% N_2$  e ar, introduzidos na vazão de 32 L/min e 40 L/min, respectivamente. O afastamento

foi de 5 mm e o metal base era suave, aço com espessura de 25 mm ou 36 mm, onde a aparência do corte foi gravada com a câmera de vídeo colorida de alta velocidade. O metal base foi aquecido por um gás queimador com antecedência e as temperaturas da superfície superior e da superfície inferior foram medidos por um termopar e um termômetro de radiação. Foi confirmado que as temperaturas medidas por ambos os métodos aumentaram uniformemente em ambas as superfícies. Nesse processo, a reação da oxidação é aprimorada pelo preaquecimento da superfície de corte perto da parte inferior por uma fonte de calor adicional para realizar o corte da chapa grossa. O corte a plasma tem sido amplamente utilizado para corte térmico de ligas de aço e metais não ferrosos (que não pode ser cortado com corte de oxigênio). Isso é também amplamente utilizado para o corte de aços carbono e baixa liga, no lugar do corte de oxigênio existente (RZEŹNIKIEWICZ; GÓRKA, 2021).

Para Sateria et al. (2020), o corte de chapas metálicas por corte a plasma é geralmente usado na indústria de manufatura, pois o resultado de corte do material tem uma boa rugosidade de superfície e tempos rápidos de corte. O objetivo do trabalho é decidir o valor ideal de configuração de parâmetros para produzir a melhor resposta com múltiplos resultado do processo de corte a plasma. O método utilizado foi a taxa de remoção de material (MRR) e largura de kerf usada para observar o desempenho de um processo de corte a plasma de baixo custo. Também utilizado o L9 Taguchi adotado como desenho experimental com experimentos conduzidos e replicados duas vezes e a análise relacional gray (GRA) método usado para o processo de otimização. Como resultados dos níveis dos processos, a melhor configuração de corte a arco de plasma, foram os parâmetros usando na GRA, que é possível maximizar a taxa de remoção de material e minimizar a largura do kerf, e pode ser obtido usando corrente de plasma de 35 Amperes, um avanço de corte de 400 mm/min e altura da tocha de 0,3 mm. O processo de corte foi realizado em chapa de aço inoxidável série 2011.

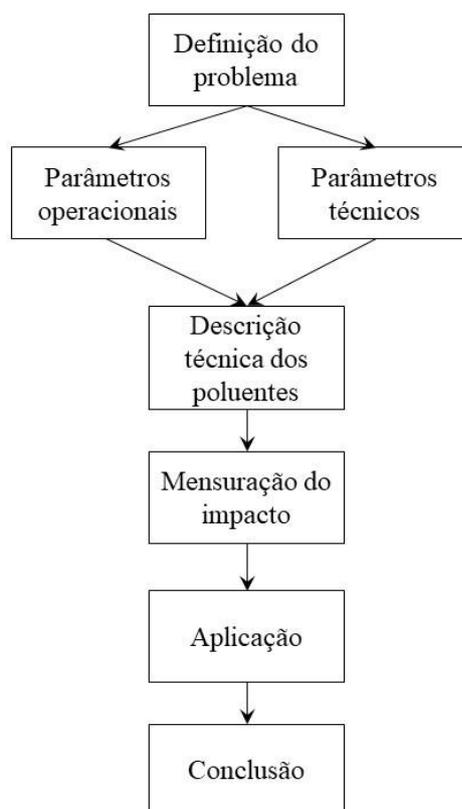
Em Aldazabal et al. (2018), o objetivo do trabalho é estudar a influência dos processos de corte a plasma no comportamento mecânico das arestas de corte de aço. Apresenta os resultados da caracterização de arestas de corte a plasma reto, de chapa de aço grau S460M, com 15 mm de espessura. O comportamento mecânico de diferentes camadas de CHAZ sob a superfície da aresta de corte foi obtido por meio de testes de corpos de prova com instrumentados de ministação de 300  $\mu\text{m}$  de espessura e a distribuição de tensão residual na CHAZ foi medida por difração de raios X, são métodos utilizados para a pesquisa. Como resultados, a zona afetada pelo calor de corte (CHAZ) gerada pelo corte a plasma é bastante estreita (cerca de 700  $\mu\text{m}$  e, em qualquer caso, inferior a 1 mm) e bastante uniforme em toda a

espessura do corte. Quanto maior a resistência mecânica, menor a ductilidade e resiliência. Obviamente, os valores estão relacionados às microestruturas formadas no CHAZ.

### 1.4.3 Etapas da pesquisa

A presente pesquisa foi desenvolvida em sete etapas, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: Desenvolvimento das etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Etapa 1 correspondeu a definição do problema e objetivos, onde foi realizado o levantamento da problemática com o desenvolvimento para a presente pesquisa e também os objetivos, tanto geral como os específicos que nortearão os resultados que o projeto pretende alcançar. Também nesta etapa a justificativa e a relevância do problema foram definidas, com a contextualização das emissões de poluentes gerados pela indústria metalmeccânica. Para o desenvolvimento da justificativa e relevância prática do tema, foram consultadas fontes com informações atualizadas sobre a temática da pesquisa, sendo o Instituto Aço Brasil e o *World Steel Association* as principais referências que contextualizam sobre a indústria metalmeccânica, produção e consumo do aço.

A Etapa 2 corresponde a primeira fase do processo de sistemática da mensuração do impacto das emissões de poluentes ocasionadas pelo corte a plasma de chapas metálicas. Na definição operacional, parâmetros básicos para compor o processo de corte a plasma são definidos, contendo definições e características utilizando como referência a máquina de corte a plasma Hypertherm® Powermax45 XP (HYPERTHERM, 2018). Os parâmetros operacionais são baseados em aspectos físico-químico como, por exemplo, a espessura da chapa, o tempo de preaquecimento e a altura do corte, e também nas características físicas e geométricas da chapa metálica e dos itens a serem cortados, definidos nesta pesquisa como “retângulos”.

Na Etapa 3 a descrição dos parâmetros técnicos é proposta, com a definição da forma com que os retângulos são arranjados para o corte da chapa metálica em cada instância simulada. Para tanto, dado que a obtenção de uma solução ótima não é um requisito básico para a presente pesquisa, uma heurística construtiva *bottom-left-fill* (Baker et al., 1980) foi adotada para ordenar a alocação de cada retângulo, até obter um arranjo de corte da chapa metálica composto por todos os retângulos da instância. Em conjunto, uma heurística de melhoria *tabu search* é usada com a função de testar diferentes possibilidades de arranjos, de forma a melhorar a qualidade do arranjo de corte da chapa metálica ao fim das iterações propostas para o processo de melhoria. Detalhes teóricos sobre o uso de heurísticas no contexto do problema de corte de chapas metálicas podem ser encontrados em Oliveira et al. (2016) e Neuenfeldt Júnior et al. (2022). Nesta pesquisa, a heurística construtiva *bottom-left-fill* e a heurística de melhoria *tabu search* foram implementadas usando C/C++, com base em Neuenfeldt Júnior et al. (2023).

Na Etapa 4 a descrição técnica dos poluentes é apresentada, formando o escopo central para permitir a mensuração dos impactos das emissões de poluentes ocasionadas pelo corte a plasma de chapas metálicas. Para o desenvolvimento do estado da arte, buscas de artigos científicos sobre o processo de corte a plasma, a emissão de poluentes no corte a plasma e o tripé da sustentabilidade foram realizadas, usando a Plataforma Scopus. O ano de publicação não foi considerado. Os filtros de busca utilizados na Plataforma Scopus foram: Engenharia; Ciência de materiais, Energia; e Ciência ambiental. Para formar a *string* de busca, foram utilizadas palavras-chaves como: “Plasma cutting process”; “Pollutants emission by the plasma cutting process”; “Emission of pollutants by the metalworking industry”; “Emission of pollutants by the machining industry and by the metal plate plasma cutting process”; “Emission CO<sub>2</sub> by the metalworking industry and the machining industry”; “Water contamination by the processes of the metalworking industry and by machining industry”; “Impacts of the use of electricity in the machining industry”; “Sustainability tripod”; “Economic, social and environmental responsibility in the metal industry and at the steel industry”; “Impact of steel

scrapping”; e “Metal sheets scrapping”. O Quadro 2 mostra o número de artigos encontrados usando cada uma das strings desenvolvidas.

Quadro 2: Strings utilizadas e o número de artigos encontrados.

<b>Strings</b>	<b>Artigos encontrados</b>
Plasma cutting process	38
Pollutants emission by the plasma cutting process	7
Emission of pollutants by the metalworking industry	8
Emission of pollutants by the machining industry and by the metal plate plasma cutting process	19
Emission CO <sub>2</sub> by the metalworking industry and the machining industry	79
Water contamination by the processes of the metalworking industry and by machining industry	37
Impacts of the use of electricity in the machining industry	21
Sustainability tripod	27
Economic, social and environmental responsibility in the metal industry and at the steel industry	51
Impact of steel scrapping	14
Metal sheets scrapping	75

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a *string* “Plasma cutting process”, 7 artigos foram selecionados: Rzeźnikiewicz e Górka (2021), Magid (2021), Sateria et al. (2020), Duplák et al. (2019), Aldazabal et al. (2018), Tsiolikas et al. (2017), Tashiro et al. (2017) e Devaraj et al. (2020). Na *string* “Pollutants emission by the plasma cutting process”, 1 artigo foi selecionado: Wang et al. (2017). Na *string* “Emission of pollutants by the metalworking industry”, 2 artigos: Arndt et al. (2021) e Wlaschitz e Hoflinger (2007). Para a *string* “Emission of pollutants by the machining industry and by the metal plate plasma cutting process”, 2 artigos: Michalek et al. (2010) e Wang et al. (2017). A *string* “Emission CO<sub>2</sub> by the metalworking industry and the machining industry”, 7 artigos: Boufellouh e Belkaid (2020), Rodriguez et al. (2021), Pan et al. (2013), Zheng et al. (2022), Brillinger et al. (2021), Khan et al. (2021), Priarone e Ingarao (2017). Para a *string* “Water contamination by the processes of the metalworking industry and by machining industry”, 3 artigos: Abellan-nebot e Rogero (2019), Xie et al. (2018) e Santana et al. (2017). Na *string* “Impacts of the use of electricity in the machining industry”, 5 artigos: Brillinger et al. (2021), Kiswanto et al. (2018), Belloufi et al. (2017), Liu et al. (2017), Anand et al. (2016). Na *string* “Sustainability tripod”; 2 artigos: Reale et al. (2022) e Osiro et al. (2021). Para a *string* “Economic, social and environmental responsibility in the metal industry and at the steel industry”, 5 artigos: Kazakova et al. (2020), Liu et al. (2020), Jain e Singh (2020), Aigbedo (2021) e Aguiar et al. (2019). Na *string* “Impact of steel scrapping”, 3 artigos: Arndt et al. (2021), Wen et al. (2023) e Rabbi e Rahman (2017). Por fim, para a *string* “Metal sheets

scrapping”, 4 artigos: Haghghi et al. (2016), Latham e Giannetti (2023), Liu et al. (2022) e Kalbe e Witthaut (2022).

Com base nos artigos científicos encontrados, os poluentes foram classificados em quatro fatores de impacto no corte a plasma de chapas metálicas: CO<sub>2</sub>; energia elétrica; água; e matéria-prima. A descrição detalhada de cada um dos quatro fatores de impacto e as relações com o processo de corte a plasma de chapas metálicas é mostrada em detalhes na Seção 2.3.

Na Etapa 5, a sistemática de mensuração dos impactos gerados pelo corte a plasma de chapas metálicas é proposta, iniciando pela definição das quatro fases (produção, fornecedores, manutenção e meio ambiente) para a obtenção dos dados de entrada necessários e, conseqüentemente, do relatório de saída de dados, admitindo as análises descritivas e técnicas em todo o processo de corte a plasma de chapas metálicas. Para tanto, um Business Process Model and Notation (BPMN) foi elaborado com base nos pressupostos descritos em Wohed et al. (2006), Chinosi e Trombetta (2012) e Kocbek et al. (2015). O BPMN foi escolhido por ser um método amplamente utilizado para o gerenciamento de processos, sendo possível organizar os fluxos dos processos para melhor visualização e entendimento.

A seguir, o tripé da sustentabilidade (GUEDES, 2021; REIS, 2022) foi adotado para referenciar a análise qualitativa dos impactos gerados pelo corte a plasma de chapas metálicas, uma importante ferramenta que possibilita a análise e o desenvolvimento de medidas de melhoria para os impactos gerados, além da função de medir os aspectos sociais, ambientais e econômicos. O tripé da sustentabilidade possui uma vantagem competitiva perante aos cenários corporativo, dando maior destaque para que as indústrias de manufatura possam apresentar os aspectos sustentáveis dos processos.

Por fim, para a análise quantitativa dos impactos gerados pelo corte a plasma de chapas metálicas, quatro indicadores, com as respectivas métricas, foram propostos (consumo de gás, consumo de energia elétrica, consumo de água para a mesa de corte e proporção de matéria-prima sucateada), com base na definição dos fatores de impacto realizada na Etapa 4, usando como métrica de referência os custos (em R\$) da produção.

Na Etapa 6 estão os resultados da aplicação da mensuração do impacto são apresentados, iniciando pela descrição dos valores definidos para os parâmetros operacionais relacionados a máquina de corte usada como referência na pesquisa. Os valores dos parâmetros operacionais foram definidos usando como referência as características do corte a plasma desejado e, por consequência, o Manual do Operador para o sistema de corte a plasma da máquina da Hypertherm® (HYPERTHERM, 2018). A seguir, quatro instâncias da literatura (Oliveira et al., 2016; Chazelle, 1983) foram adotadas para atender a demanda de obtenção dos arranjos dos

retângulos na chapa metálica, permitindo assim simular as condições do corte a plasma e verificar os impactos quantitativos e qualitativos propostos.

Um arranjo de cada instância foi obtido usando a rotina da heurística proposta na Etapa 3. Por consequência, os cinco arranjos obtidos para cada instância variando os valores da largura da chapa metálica foram desenhados digitalmente utilizando o SketchUp® 2020 (versão 2020-0-1), escolhido por ser o mais flexível programa de projetos e desenhos em realizar a modelagem geométrica dos arranjos. Os arquivos dos desenhos digitais são codificados para serem lidos no formato controle numérico computadorizado (G-code) com o Sheetcam® (versão 6.0.0), permitindo assim serem usados como dados de entrada juntamente com os valores dos parâmetros operacionais no software de simulação Mach3®. Ao final, a simulação de cada arranjo gera um relatório de saída de dados contendo os valores relativos ao tempo de corte e distâncias de corte e de não corte. Tal procedimento é padrão e foi adotado para simular os vinte arranjos da mesma forma. A escolha pelos softwares Sheetcam® (versão 6.0.0) e Mach3® está interligada com o controle da implementação do G-code, pois pode haver a necessidade de retrabalho manual nas linhas de comando arranjos específicos, conforme as características dos retângulos e da chapa da instância.

Por fim, na Etapa 7 está a apresentação das conclusões, expondo as principais argumentações sobre as informações obtidas ao longo da pesquisa e possíveis formas de soluções para o problema proposto, além de limitações e perspectivas da continuidade científica do problema de pesquisa.

## 2 SISTEMÁTICA DE MENSURAÇÃO

### 2.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

Usando como referência as configurações verificadas em máquinas de corte, mas principalmente as características da máquina Hypertherm® Powermax45 XP, um total de sete parâmetros operacionais devem ser considerados para viabilizar o pleno processo de corte a plasma de chapas metálicas, sendo: Tempo de preaquecimento; taxa de alimentação; altura de corte; gás utilizado; faixa de fluxo de gás; potência de corte; e largura do corte (HYPERTHERM, 2018).

O tempo de preaquecimento é necessário para aquecer os componentes antes de iniciar o processo de corte. Embora o tempo de preaquecimento dos componentes da máquina a plasma seja praticamente mínimo, especialmente para superfícies de chapas metálicas finas (Neuenfeldt Júnior et al., 2022). A taxa de alimentação é a velocidade quando o arco de plasma ativo está operacional. Em complemento, a taxa de mergulho é definida a velocidade de descida do bico da tocha da altura de perfuração para a altura de corte. Já o atraso na perfuração é o tempo em que o plasma de arco ativo permanece estático para perfurar verticalmente a chapa metálica. A altura de corte é a distância entre o bico do maçarico e a superfície da chapa metálica quando o arco ativo está operacional. Já a altura de perfuração é relativa à distância entre o bico do maçarico e a superfície da chapa metálica antes que o arco ativo esteja operacional.

Os principais gases utilizados para o processo de corte a plasma são o oxigênio, nitrogênio, ar comprimido e as misturas de argônio-hidrogênio e hidrogênio-nitrogênio. A escolha do gás a ser utilizado, depende de vários fatores do processo e características do material a ser cortado. O gás oxigênio é utilizado quando se deseja um corte com alta qualidade, principalmente em materiais de aço carbono, resultando em um corte sem rebarbas e com escória de fácil remoção. O corte a plasma baseado no oxigênio tornou-se padrão na indústria do aço carbono, principalmente porque oferece a melhor qualidade e maior velocidade durante o corte. Porém, o oxigênio não é recomendado para uso em aços inoxidáveis e alumínio em função do custo (esses materiais são mais “fáceis de serem cortados, portanto, não precisam de tanto investimento) e por reduzir a vida útil dos consumíveis com mais rapidez (MEGAPLASMA 2023).

Segundo Hypertherm (2018), o gás oxigênio tornou-se o padrão da indústria para cortar aço carbono, visto que, oferece a melhor qualidade de corte e a velocidade de corte é mais rápida que qualquer gás de plasma. O gás de plasma a oxigênio reage com o aço carbono para produzir um spray de metal derretido mais fino. Cada gota tem uma tensão superficial mais baixa. Esse spray é ejetado com mais facilidade do kerf. A desvantagem do oxigênio é o custo do gás e a vida útil dos consumíveis. O aumento nos custos com consumíveis e gás é normalmente compensado por uma redução nas caras operações secundárias para retirar a escória e retificar peças chanfradas.

Os gases que podem ser utilizados para os processos de corte a plasma, segundo White Martins (2018), são gases ou vapor mais pesados que o ar e podem se aglomerar em espaços confinados, em especial ao nível ou abaixo do solo. O gás oxigênio tem aparência e cor incolor, não possui odor detectável pelo cheiro, com ponto de fusão maior do que  $-219\text{ }^{\circ}\text{C}$  e ponto de ebulição igual a  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A densidade relativa de um gás é a classificação as densidades absolutas de dois gases que estão igualmente nas condições de temperatura e pressão. O gás oxigênio apresenta uma densidade relativa de  $1,1\text{ kg/m}^3$ , e possui propriedades oxidantes capazes de provocar oxidação em superfícies utilizadas. O Quadro 3 mostra informações sobre as propriedades físicas e químicas do gás oxigênio utilizado em processos de corte a plasma de chapas metálicas, segundo White Martins (2018).

Quadro 3: Principais propriedades dos estados físicos e químicos do gás oxigênio.

<b>Estado físico e químico</b>	<b>Gás oxigênio</b>
Aparência	Gás incolor
Cor	Incolor
Odor	Não detectável pelo cheiro
Ph	Não aplicável
Ponto de fusão	$> -219\text{ }^{\circ}\text{C}$ ( $-362^{\circ}\text{F}$ )
Ponto de ebulição	$-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ( $-297^{\circ}\text{F}$ )
Taxa de evaporação relativa (éter = 1)	Não aplicável
Inflamabilidade (sólido/gás)	Não inflamável
Pressão de vapor	Não aplicável
Densidade relativa do vapor a $20^{\circ}\text{C}$	$1,325\text{ kg / m}^3$
Densidade relativa	$1,1\text{ kg/m}^3$
Densidade relativa do gás	$1,1\text{ kg/m}^3$
Solubilidade	Água: $39\text{ mg/L}$
Temperatura de auto-ignição	Não aplicável
Viscosidade, cinemática e dinâmica	Não aplicável
Propriedades explosivas	Não aplicável
Propriedades oxidantes	Oxidante

Fonte: White Martins (2018).

A faixa de fluxo de gás é definida pela quantidade/volume de gás utilizado durante o processo de corte da chapa e caracterizada como faixa de fluxo quente aplicada no fluxo de corte e faixa de fluxo de gás frio aplicada no pós-fluxo. Segundo Hypertherm (2018), a potência de corte de um sistema a plasma é determinada mais pela saída de potência do que pela saída de corrente, que determina a saída nominal do sistema. A potência de corte é um dos fatores mais importante para a escolha de uma máquina ou ferramenta a ser utilizada, definindo principalmente a velocidade em relação ao tempo de corte. Por fim, a largura do corte é o processo de corte realizado em uma chapa metálica, a largura do material cortado, e também pode ser descrito como o tamanho/quantidade de material consumido pelo processo de corte.

## 2.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS TÉCNICOS

Segundo Baker et al. (1980), um arranjo ortogonal considera todas as arestas de cada retângulo são paralelas a borda inferior ou as bordas verticais do preenchimento esquerdo. O arranjo ortogonal também é orientado se os retângulos são considerados estritamente como pares ordenados. Um retângulo  $(x_i, y_i)$  deve ser ordenado de tal forma que as arestas de comprimento  $x$  sejam paralelas à aresta inferior esquerda da chapa metálica.

A heurística construtiva *bottom-left* é uma opção de rápido processamento, com uma complexidade  $O(n^2)$  (onde  $n$  é o número de retângulos), onde os retângulos devem ser embalados de modo a preservar a orientação ortogonal, alocados um de cada vez, em sequência, o mais abaixo e a esquerda possível da chapa metálica. No entanto, uma das principais desvantagens é o não preenchimento de “buracos”, espaços vazios que são circundados por retângulos que foram alocados anteriormente. Para superar tal limitação, uma série de versões modificadas da heurística construtiva *bottom-left* foram propostas ao longo dos anos (Oliveira et al., 2016). Dentre as opções, a heurística mais relevante é o *bottom-left-fill*, desenvolvido por Chazelle (1983), onde o objetivo principal é alocar novamente os retângulos na aresta mais inferior e a esquerda possível da chapa metálica, permitindo a utilização de espaços internos disponíveis no arranjo dos retângulos já alocados, em tempo  $O(n^2)$  e espaço  $O(n)$ .

Quanto as opções de heurísticas de melhoria, o *tabu search* é um procedimento adaptativo para guiar a busca local na exploração contínua do espaço de busca, explorando o imediatismo de uma solução atual, mesmo que a qualidade da solução seja pior em relação às soluções já encontradas, permitindo a fuga de ótimos locais (Glover, 1990). As heurísticas de

melhoria são utilizadas para melhorar a qualidade de uma solução inicial gerada aleatoriamente ou por uma heurística construtiva, explorando o espaço de soluções viáveis (Alvarez-Valdes et al., 2005).

O princípio é reunir um pequeno pool de soluções de elite e explorar trajetórias ligando duas soluções do pool no espaço de soluções, para tentar encontrar uma melhor. A origem e o destino do caminho geralmente são chamados de *solução inicial* e *solução de destino*. Os atributos da solução alvo são progressivamente introduzidos na solução inicial, o que gera uma sequência de soluções intermediárias (Tashiro et al., 2017).

Procedimentos baseados no *tabu search* exploram o espaço de busca movendo-se de uma solução para uma melhor solução vizinha (com o melhor valor objetivo entre as soluções candidatas), mesmo que isso resulte em uma deterioração do valor da função objetivo, a fim de aumentar a probabilidade de escapar de um ótimo local ruim. Para evitar ciclos no decorrer da busca, os reversos do último determinado número de movimentos, formados como uma lista tabu, são proibidos ou declarados como tabu restritos a um determinado número de iterações (isso é conhecido como duração tabu). Para evitar uma configuração muito estrita da restrição tabu, critérios de aspiração são geralmente introduzidos para substituir a restrição tabu e, assim, levar a busca a uma região promissora do espaço de soluções. Estratégias de intensificação e diversificação também são aplicadas para acentuar e ampliar a busca no espaço de soluções, respectivamente (Glover, 1990). Assim, as informações das iterações anteriores são memorizadas por meio de um conjunto de listas de proibições de curto e longo prazo. A cada iteração, são introduzidas proibições para não permitir alterações de alguns retângulos na ordem da sequência (Neuenfeldt Júnior et al., 2022).

Com base em Neuenfeldt Júnior et al. (2023), a heurística construtiva *bottom-left-fill* e a heurística de melhoria *tabu search* permitem uma melhoria na eficiência na busca por arranjos de qualidade, porém sem garantir a optimalidade. Na heurística construtiva *bottom-left-fill*, a execução da alocação dos retângulos é incremental, onde a cada loop um retângulo é posicionado na chapa metálica até que todos os retângulos sejam alocados. Conforme mostrado no Algoritmo 1, na inicialização a busca por arranjos de qualidade começa com a predefinição dos parâmetros de entrada características da chapa metálica e dos retângulos, além das listas de proibições de curto e longo prazo do *tabu search* e do número máximo de iterações para a melhoria dos arranjos. A cada iteração, os parâmetros do *tabu search* são redefinidos e a ordem da sequência de entrada dos retângulos é modificada aleatoriamente, mantendo inalterada a posição de entrada dos retângulos penalizados em ambas listas de proibições de curto e longo prazo. Em seguida, cada retângulo é alocado individualmente nos espaços vazios inferiores e

esquerdos disponíveis na chapa metálica, de acordo com as restrições retangulares de espaço verificadas para o problema. Se a relação entre as dimensões do retângulo e o espaço disponível (mais à esquerda e abaixo possível) for viável, sem sobreposição com outros retângulos já alocados e sem sobreposição dos limites da chapa metálica, o retângulo pode ser alocado no espaço disponível. Além disso, o espaço da chapa metálica utilizado é eliminado e novos espaços vazios são definidos considerando o arranjo com o novo retângulo alocado.

Algoritmo 1: Pseudocódigo para a heurística construtiva *bottom-left-fill* com a heurística de melhoria *tabu search*.

---

```

Inicialização
1. set dimensões e coordenadas dos espaços da chapa metálica;
2. set dimensões dos retângulos;
3. set proibições de curto e longo prazo do tabu search;
4. set número máximo de citações maxit;
5. set parâmetros do bottom left fill;
Procedimento
6. for cada iteração do tabu search do
7.   reset parâmetros do tabu search;
8.   set ordem de entrada dos retângulos;
9.   for cada retângulo do
10.    reset parâmetros do bottom left fill;
11.    read dimensões dos retângulos;
12.    set espaços da chapa metálica em ordem decrescente de altura;
13.    for cada espaço da chapa metálica do
14.      set uma variável booleana de validação c1;
15.      while (c1 = 0)
16.        read coordenadas do espaço da chapa metálica;
17.        alocar retângulo;
18.        if (alocar retângulo = viável) then
19.          c1 = 1;
20.          eliminate espaço usado da chapa metálica;
21.          set novos espaços da chapa metálica;
22.        if (todos retângulos estão alocados) then
23.          stop bottom left fill;
24.          report coordenadas dos retângulos;
25.          set proibições de curto e longo prazo do tabu search;
26.        if (iteração do tabu search = maxit) then
27.          select selecionar o melhor arranjo obtido;
28.          stop procedimento;
29.    end.

```

---

Fonte: Neuenfeldt Júnior et al. (2023).

Após arrumar todos os retângulos, as posições em coordenadas de cada retângulo e a quantidade de chapa metálica usada são relatados, as penalidades de lista de curto e longo prazo são aplicadas após definir a próxima ordem de sequência de entrada dos retângulos, excluindo retângulos com as posições de entrada já penalizadas. Com todas as iterações do *tabu search*

processadas, o arranjo com menor quantidade de chapa metálica usada para alocar todos os retângulos é selecionado.

Para instâncias de problemas com até 100 retângulos, quando selecionado para a lista de curto prazo, a posição de entrada do retângulo não pode ser movida nas próximas oito iterações consecutivas. Se selecionado para a lista de longo prazo, a posição de entrada do retângulo não pode ser movida nas próximas 15 iterações consecutivas. As penalidades decrescem unitariamente a zero. Por fim, o número máximo de iterações foi estabelecido em 200, independentemente do tamanho da instância usada.

### 2.3 DESCRIÇÃO TÉCNICA DOS POLUENTES

A composição química e a fração inalável da fumaça do corte a plasma são teoricamente determinadas pelo tipo de metal que está sendo cortado e pelos parâmetros de operação. Embora semelhantes aos princípios da soldagem, os parâmetros que governam o corte a plasma (velocidade de corte, corrente do arco) são diferentes da soldagem (gás de proteção, velocidade de alimentação do arame) (WANG et al., 2017). Conforme Nederman (2021), os procedimentos de corte térmico de metais, tanto manuais como automatizadas, apresentam riscos ambientais derivados principalmente das radiações ultravioletas do arco elétrico e da intensa geração de fumos metálicos, gases tóxicos, além de ruído e outros riscos de segurança genéricos. Devido às altas energias envolvidas e à velocidade do corte, a geração de fumos metálicos é muito intensa podendo atingir taxas de emissão da ordem de 26 g/min no corte de aço carbono e 40 g/min no corte de aço inox.

Wang et al. (2017), afirma que a fumaça de metal emitida pelo corte a plasma de aço inoxidável pode consistir em cromo hexavalente, que é cancerígeno, entre outros tóxicos. A superexposição da fumaça de corte, pode causar toxicidade pulmonar e outros efeitos a saúde. O objeto principal da pesquisa, foi avaliar os efeitos dos parâmetros de operação nas taxas de formação de fumaça, cromo hexavalente e outras concentrações de óxidos, distribuições de tamanho de partícula e morfologia de partícula. Uma câmara de fumaça e uma bomba de alto volume foram utilizadas para coletar a fumaça produzida a partir do corte da chapa de aço inoxidável ER308L, com corrente de arco variando entre 20 A e 50 A. Para a análise dos poluentes, utilizaram a cromatografia de íons e a morfologia das partículas foi fotografada através de um microscópio eletrônico de transmissão. Os resultados mostraram que a corrente

mais alta equivale a uma energia mais alta no arco de plasma, o que levou a mais vaporização de metal, mais partículas no ar e uma mudança termodinâmica para favorecer a oxidação, com cerca de sete vezes a diferença na taxa de geração de fumaça entre a corrente de arco mais alta (50 A) e a corrente de arco mais baixa (20 A).

Segundo Arndt et al. (2021), as instalações industriais de metalurgia emitem uma diversidade de gases tóxicos, incluindo compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e metais pesados. O principal objetivo da pesquisa é fornecer novas informações sobre a composição química de partículas com diâmetros aerodinâmicos inferiores a 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) nas proximidades de instalações metalúrgicas. Para investigar essas emissões, uma campanha de campo multi-instrumentos de 1 mês foi realizada em uma unidade industrial em Grande-Synthe, Dunquerque na França. Um espectrômetro de massa de tempo de voo em aerossol, foi implantado para fornecer medições de estado de mistura química com resolução de tamanho de partículas únicas do ambiente em alta resolução temporal. O número de estados de mistura química distintos identificados destaca a complexidade e diversidade na composição de partículas primárias, associadas às emissões da usinagem de metais. Foi possível verificar, que a abordagem de distribuição de fonte de partícula única utilizada, seja útil em outras regiões, onde as contribuições relativas de emissões industriais, incluindo emissões de metalurgia, para concentrações ambientais de  $\text{PM}_{2,5}$  devem ser avaliadas.

Para Wlaschitz et al. (2007), no decorrer do processo de usinagem de metais, a máquina-ferramenta rotativa ou rebolo está gerando gotículas finas e vapores que podem causar problemas de saúde ocupacional. Com a finalidade de tentar resolver os problemas ocasionados pela máquina, um novo método de medição contínua foi desenvolvido para detectar gotas e vapor de névoa de fluido de usinagem e fornecer informações sobre a distribuição do tamanho das gotas. Assim, uma amostra de ar da névoa de fluido de usinagem é segregada por impactadores de diferentes tamanhos de corte, realizados em várias passagens sucessivas. Em cada passagem as gotículas que não são coletadas no impactador são alimentadas em um evaporador que evapora imediatamente todas as gotículas e, posteriormente, a amostra é analisada em linha por um detector de ionização de chama (FID). O procedimento adotado foi desenvolvido para determinar tanto gotículas quanto vapor de névoa de fluido de usinagem aerotransportada, fornecendo informações sobre a distribuição do tamanho das gotas da concentração de óleo.

Segundo Michalek et al. (2010), a utilização de fluidos de corte em operações de usinagem está sendo cuidadosamente analisado pela indústria por motivos, incluindo o custo total no processo de fabricação e o impacto na saúde do trabalhador, auxiliando no

desenvolvimento e implementação de estratégias para reduzir ou eliminar os efeitos negativos dos fluidos de corte. Com as preocupações associadas ao uso de fluidos de corte, uma série de pesquisas experimentais e analíticas foram conduzidas para entender o papel dos fluidos em processos de usinagem para determinar as variáveis que influenciam a qualidade do ar durante as operações de torneamento, bem como caracterizar as emissões de aerossóis associadas ao torneamento úmido e seco. Como resultados da pesquisa, a qualidade do ar é caracterizada pela medição da concentração de massa e distribuição de tamanho de partícula da poeira e névoa criada durante um conjunto de experimentos de usinagem. Os experimentos revelaram que a velocidade do fuso tem um efeito dominante tanto na concentração de massa da névoa quanto no tamanho das partículas aerodinâmicas.

### **2.3.1 Emissão de CO<sub>2</sub>**

Para o setor de Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU), em 2016, foram contabilizadas 93.359 Gg de CO<sub>2</sub> que representou um aumento de 7% em relação a 2010. O subsetor Indústria Metalúrgica contribuiu com a maior parte das emissões, com uma representação de 52% das emissões em CO<sub>2</sub> e do setor em 2016. O subsetor Indústria Mineral foi o segundo mais representativo, com 31%. Para as emissões de CO<sub>2</sub>, cujo gás corresponde a quase totalidade das emissões do setor (92% do total do setor em CO<sub>2</sub>), e os subsetores Indústria Metalúrgica e Indústria Mineral contribuíram com participação aproximada de 56% e 34% (UNFCCC, 2021).

O aço é um material infinitamente reciclável e o mais reciclado no Mundo. Automóveis, fogões, geladeiras e outros produtos feitos de aço, após o fim da vida útil, transformam-se em sucata que é valiosa matéria prima encaminhada para as aciarias para produzir aço de excelente qualidade. A sucata de aço desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa do setor. Para cada tonelada de sucata reciclada, é evitada a emissão de 1,5 toneladas de CO<sub>2</sub>. A maior produção de aço via reciclagem da sucata está condicionada à disponibilidade dessa matéria prima no mercado e o aumento da oferta de sucata depende do aumento do consumo per capita de aço e da taxa de reciclagem. Em um cenário ambicioso de descarbonização da indústria do aço brasileira, é preciso elevar a oferta de sucata no país (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Para Boufellouh et al. (2020), o setor industrial é o principal contribuinte mundial para o aquecimento global, com a enorme descarga de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os pesquisadores estão procurando uma maneira eficaz de melhorar a eficiência de carbono nas fábricas, investigando estratégias de programação visando reduzir o efeito estufa de processos de produção. O objetivo da pesquisa é investigar um problema de escalonamento de *flowshop* de permutação com atividades de substituição de ferramentas restritas onde os objetivos do problema de escalonamento são minimizar simultaneamente a emissão total de carbono e o tempo máximo de conclusão. O problema é formulado como uma Programação Inteira Mista Não-Linear e o software LINGO 10 foi aplicado para resolver exatamente um processo de torneamento de passagem múltipla do mundo real de uma empresa metalúrgica. Os resultados computacionais mostram a eficácia do algoritmo proposto para resolver o problema, demonstrada com um estudo de caso real de um processo de torneamento que é manipulado por uma máquina-ferramenta multifuso. A substituição de ferramentas pode ser realizada para melhorar a eficiência de carbono das máquinas ou por necessidade de descarte devido à inadequações.

Conforme Rodriguez et al. (2021), uma das questões mais perigosas relacionadas ao risco ambiental no processo de usinagem é a aplicação de fluidos metalúrgicos (MWFs), especialmente no processo de retificação em que os MWFs são fundamentais para controlar a alta geração de calor e evitar queimaduras na superfície da peça e alterações microestruturais. O trabalho tem como objetivo propor e avaliar a aplicação da técnica híbrida HMQL + WCJ combinada óleo e água a 1:5 óleo-água no  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e processo de retificação do aço AISI 4340. Ensaio experimentais foram realizados em uma retificadora CNC cilíndrica externa de mergulho, o sistema MQL foi composto por compressor de ar, regulador de pressão de ar, medidor de vazão e bocal MQL e técnicas de lubri-resfriamento foram empregadas e discutidas. Foi possível concluir que a técnica HMQL + WCJ apresenta uma eco amigabilidade para aplicação de MWFs a fim de obter um processo de moagem mais verde e limpo, mitigar a geração de  $\text{CO}_2$  e, conseqüentemente, GEEs e aquecimento global.

Pan et al. (2013), afirma que o uso de  $\text{CO}_2$  dos gases de combustão como agentes estabilizadores e neutralizantes, podem diminuir as emissões de  $\text{CO}_2$ . Na análise, o gás de fogão quente *ex situ* contendo 30 vol% de  $\text{CO}_2$  no processo de fabricação de aço foi capturado por carbonatação acelerada de escória BOF acoplada com CRW em um leito rotativo (RPB). O processo RPB desenvolvido apresenta resultados superiores, com significativa eficiência de remoção de  $\text{CO}_2$  de 96 – 99% em gases de combustão alcançados em um curto tempo de reação de 1 min a 25 °C e 1 atm. É possível verificar que a carbonatação da escória BOF acoplada ao

CRW em um RPB é um método viável para captura de CO<sub>2</sub> devido a maior taxa de transferência de massa e eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> em um curto tempo de reação.

Segundo Zheng et al. (2022), a energia e o CO<sub>2</sub> da usinagem de processo tem sido reconhecida como uma forma eficaz e econômica de obter economia de energia, redução de emissões e melhorar a eficiência do processo. A pesquisa propõe um modelo preditivo de consumo de energia e CO<sub>2</sub> emissões no processo Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), considerando as características do processo. Na preparação real, o modelo pode ser usado para prever as emissões de CO<sub>2</sub> de peças com diferentes estruturas geométricas e diferentes processos, de modo a otimizar o processo com emissões de CO<sub>2</sub> como padrão. Assim, o modelo também possui um novo padrão para quando trocar o fluido de corte e diferentes métodos de substituição do fluido de corte têm impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> do material, nas emissões de CO<sub>2</sub> do consumo de energia e nas emissões indesejadas de CO<sub>2</sub>.

A pesquisa de Khan et al. (2021), visa explorar uma avaliação holística de sustentabilidade de tecnologias avançadas de usinagem especificamente, a avaliação de um híbrido criogênico-LN<sub>2</sub> e lubrificação de quantidade mínima (MQL), denominado CryoMQL. Além disso, realizou uma comparação de CryoMQL com usinagem por inundação de Ti-6Al-4V. A potência de usinagem, energia específica de corte, consumo específico de energia elétrica, demanda cumulativa de energia (CED), emissão de carbono por peça, custo de energia e custo de produção são considerados as principais medidas de desempenho sustentável. A usinagem criogênica é proposta como uma alternativa à frente dos processos convencionais de usinagem para alcançar a sustentabilidade na indústria de manufatura chinesa (CMI). Os resultados obtidos são benéficos e ajudam o profissional a avaliar energia, emissão de carbono e custo unitário de produção. Os benefícios potenciais dos métodos CryoMQL são ecologicamente corretos, mais seguros, mais limpos e com maior produtividade.

Em Priarone e Ingarao (2017), uma metodologia sistemática é proposta, baseada na modelagem empírica de processos de manufatura aditiva e subtrativa, que poderia ser usada para identificar a rota de produção que permitiria a menor demanda de energia ou emissão de CO<sub>2</sub>. Uma abordagem de usinagem convencional (CM) para a produção de peças metálicas foi comparada com um processo integrado, baseado em manufatura aditiva mais usinagem de acabamento (AM + FM). A metodologia foi aplicada à análise de rotas de fabricação industrial para a produção de componentes metálicos de Ti-6Al-4V ou aço inoxidável, a fim de verificar o potencial de generalização da ferramenta proposta. Os resultados mostraram que não é apropriado rotular a priori uma estratégia de fabricação como eficiente em energia e recursos, uma vez que as propriedades ecológicas dos materiais envolvidos ou dos processos tornam CM

ou AM + FM preferíveis apenas para cenários de produção definidos, em função das quantidades de refugos de material. Assim, AM + FM torna-se a melhor abordagem a adotar, desde que uma otimização topológica da geometria da peça leve a uma redução de peso efetiva.

### 2.3.2 Água

Em Xie et al. (2018), um modelo de otimização estocástica inexata é desenvolvido para a gestão regional de alocação de recursos hídricos industriais considerando o controle de risco de receita esperado e redução de emissão de poluentes. Métodos de programação de parâmetros de intervalo, programação estocástica de dois estágios e otimização de aversão ao risco de *downside* são incorporados ao modelo desenvolvido para refletir incertezas descritas por valores de intervalo e distribuições de probabilidade e evitar riscos do sistema. O modelo é aplicado a um caso real de planejamento de recursos hídricos industriais na cidade de Chongqing, China. Águas superficiais, águas subterrâneas, águas de reuso, trinta e nove setores da indústria e três poluentes são considerados no modelo de otimização; são desenhados três cenários sobre a redução da emissão de poluentes e diferentes atitudes de aversão ao risco. Os resultados indicaram que o controle da quantidade total de emissões de poluentes e o risco de receita esperado podem ser utilizados como medidas efetivas para o ajuste da estrutura da indústria regional do ponto de vista ambiental e macroeconômico do terminal.

A pesquisa de Abellan-Nebot e Rogero (2019), objetiva uma metodologia para implementação de um sistema MQL para usinagem sustentável. Os procedimentos utilizados na pesquisa são divididos pela configuração do MQL para verificar o efeito na rugosidade superficial, considerando as vazões efetivas e a posição do bocal, a modelagem de processos baseada no projeto de experimentos Box–Behnken (DoE) para modelar rugosidade superficial, consumo de energia e vida útil da ferramenta e a otimização de processos para minimizar custos e impactos ambientais em termos de uso de água e kg de CO<sub>2</sub> equivalente. Os resultados apresentaram que o uso de MQL considerando a influência na rugosidade superficial e desgaste da ferramenta é a melhor opção tanto no aspecto econômico quanto ambiental. Também, que o uso de MQL com parâmetros de corte ótimos e uma estratégia de troca antecipada de ferramenta permite excluir a operação de retificação subsequente, o que resulta em uma melhoria importante em relação às condições seguras de trabalho, impacto ambiental

(redução de 67% em kg de CO<sub>2</sub> equivalente, 3.357 L de água economizada) e custo (redução de 60% no custo).

Em Santana et al. (2017), o objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo de tratamento de um efluente da indústria metalmeccânica composto por água, fluido de corte e grafite. Para o modelo utilizado no trabalho, o tratamento foi realizado em um protótipo de separação de fases em escala laboratorial, construído com tanques de recirculação, bombas, hidrociclones e um decantador contínuo. Inicialmente, o efluente foi acidificado com ácido sulfúrico para quebrar a emulsão sólido-líquido. Para definir as condições adequadas para obter uma fase aquosa com um nível de contaminação que permitiria o retorno ao processo, as condições de aplicação do DAF foram determinadas com experimentos delineado por uma técnica de Desenho Rotacional Composto Central (CCRD). Um modelo estatístico para o DAF com condições de operação do protótipo foi obtido pela metodologia de superfície de resposta (RSM). Os resultados foram satisfatórios, com concentrações de óleo residual 12% abaixo da regulamentação do órgão ambiental brasileiro para descarte em corpos d'água, que é 20 ppm, foram encontrados e a eficiência de separação atingiu valores superiores a 97%.

### **2.3.3 Energia elétrica**

Brillinger et al. (2021), afirma que como as grandes indústrias estiveram em foco na última década, hoje também as pequenas e médias empresas com tamanho de lote de produção estão sendo cada vez mais obrigadas a reduzir as necessidades energéticas na produção. Nos processos de usinagem, a estratégia também tem influência na demanda de energia. Para a fabricação por exemplo, de um lote, a previsão da demanda de energia de uma estratégia de usinagem, antes que uma peça seja fabricada, desempenha um papel decisivo. Para a presente pesquisa, diferentes algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente variações da árvore de decisão ('DecisionTree', 'RandomForest', impulsionado 'RandomForest') são investigados por capacidade de prever a demanda de energia de operações de usinagem CNC com base em dados de produção reais, sem a necessidade de experimentos dedicados. Os resultados obtidos na pesquisa, comprovam que o modelo de energia desenvolvido pode ser usado para prever o consumo de energia. É uma ferramenta válida para ajudar a reduzir custos na usinagem e fornecer feedback direto aos projetistas de peças antes da usinagem.

Sergundo Kiswanto et al. (2018), no processo de usinagem de fresamento, o tempo necessário para produzir um componente deve ser o mínimo possível para minimizar os custos e os impactos ao meio ambiente. O consumo de energia de corte pode ser minimizado otimizando os parâmetros de corte, como o percurso da ferramenta de corte. O objetivo do trabalho é modelar o consumo de energia durante o processo de corte. O modelo utilizado para a pesquisa é usado para avaliar e comparar diferentes caminhos e estratégias da ferramenta de corte. Três peças prismáticas e uma esculpida foram usadas para examinar o modelo de corte de consumo de energia. Uma interface gráfica de usuário também é desenvolvida para simplificar o processo de comparação através de códigos NC gerados a partir do software CAM. Através do processo de comparação, é possível prever o consumo de energia no percurso de corte e assim possibilitar a seleção do percurso correto para reduzir o consumo de energia na usinagem.

Para Bellouf et al. (2017), o corte de metais representa uma grande parcela nas indústrias de manufatura, o que torna este processo o maior consumidor de energia. A pesquisa tem a finalidade de propor uma estratégia de otimização adequada aos processos de usinagem (fresamento) para atingir as condições ótimas de corte com base no critério da energia consumida durante o fresamento. O problema de energia consumida na fresagem é resolvido por um método de otimização escolhido. A pesquisa desenvolve uma proposta de um novo método de otimização híbrido algoritmo genético (programação quadrática sequencial), adaptada às características do processo de torneamento, a fim de obter condições ótimas de corte que minimizem a energia consumida. A otimização é feita de acordo com os diferentes requisitos no processo de desbaste e acabamento sob diversas restrições tecnológicas, encontrando um conjunto de soluções não dominadas (a "frente de Pareto"), soluções entre as quais não se pode decidir se uma solução é melhor que outra, para levar em conta o consumo de energia e rugosidade.

Liu et al. (2017), investigou o consumo total de energia no fresamento duro, incluindo a energia da máquina e a energia incorporada da ferramenta de corte e do material de trabalho. A energia incorporada da ferramenta de corte e do material de trabalho tem um efeito no consumo total de energia do fresamento duro. A contribuição do consumo de ferramenta de corte e material de trabalho foram consideradas ao avaliar o impacto ambiental de um processo de corte na fase de fabricação. Os resultados mostram que uma maior taxa de remoção de material (MRR) resulta em menor consumo total de energia e o uso da ferramenta de corte e material de trabalho deve ser considerado ao avaliar o consumo de energia total de um processo de corte do ponto de vista do sistema de usinagem.

Anand et al. (2016), realizou um experimento piloto para verificar e posteriormente tomar medidas corretivas para reduzir o consumo de energia da indústria de transformação. Para tal procedimento, primeiramente foi dado destaque na operação de torneamento para os parâmetros de corte e na realização do processo de otimização, utilizando a ferramenta design expert software em relação à energia consumida. Os resultados mostram uma redução apreciável no consumo de energia, reduzindo assim a emissão de carbono, para os materiais testados. Essa quantidade de energia economizada para cada material varia em razão da diferença nas densidades, dureza e estrutura do grão.

### **2.3.4 Matéria-prima**

Wen et al. (2023), desenvolve um modelo baseado na densidade de discordâncias que é um modelo constitutivo para o aço inoxidável 304 e incorpora este modelo no ABAQUS usando sub-rotinas para investigar a modelagem de corte policristalino e o mecanismo de formação de rebarbas. A metodologia utilizada foi através de análises de simulação, experimentos de comparação e o estabelecimento de alguns tipos de modelos constitutivos, dos quais Johnson-Cook (JC) [21], Bodner-Patom (BP) [22], ZerilliArmstrong (ZA) [23] e o modelo de tensão de limiar mecânico (MTS) [24]. Este modelo pode prever a evolução de microestruturas e realizar uma simulação de previsão da densidade de deslocamento, tamanho da célula e microdureza da superfície processada. Os resultados da simulação mostram que a força de corte diminui gradualmente junto com o aumento do tamanho do grão e que o tamanho da rebarba aumenta junto com o tamanho do grão. Um tamanho de grão maior também corresponde a uma rebarba mais severa.

Rabbi e Rahman (2017) centra-se na Indústria de Desmantelamento e Reciclagem de Navios (SBRI) do Bangladesh com o objetivo de avaliar a situação atual, o impacto no ambiente, bem como os direitos e a segurança dos trabalhadores. Devido ao desmantelamento de substâncias nocivas, como poluentes orgânicos persistentes (POP), amianto e metais pesados, tornam-se amplamente expostos no meio ambiente, o que representa uma ameaça para os habitantes. Como resultados A poluição ambiental pode ser reduzida ao mínimo seguindo os regulamentos internacionais para o despejo de restos de materiais do navio. Questões de segurança e fatores de saúde dos trabalhadores podem ser garantidos seguindo algumas regras

rígidas. Equipamentos de segurança como óculos de proteção, capacetes, luvas de mão, máscaras faciais e aventais devem ser fornecidos para minimizar os problemas.

O objetivo principal da pesquisa de Haghghi et al. (2016), é descrever um método para reduzir o custo de acabamento de grandes peças fundidas que possuem superfícies usinadas para fixação de outros componentes. O método utilizado foi através de modelos de computador que simulam todas as superfícies a serem usinadas (TBM) e quaisquer pontos de contato com o acessório por meio de nuvens de pontos de ajuste de características obtidas da varredura seletiva da peça fundida bruta. As localizações dos recursos são comparadas com as localizações no modelo CAD da peça e usando o modelo T-Map para tolerâncias. Como resultados, obteve um potencial para incorporar acessórios programáveis que se ajustarão automaticamente às variações necessárias para cada fundição individual e também a oportunidade de otimizar os valores dos parâmetros de ajuste de forma a maximizar as espessuras críticas da parede ou a minimizar a variação na espessura da parede em uma ou mais características críticas.

Segundo Latham e Giannetti (2023), os defeitos relacionados à largura são uma ocorrência comum no processo de laminação de tiras a quente e podem levar a processamento extra, concessões ou sucateamento. A proposta de uma ferramenta automatizada para detecção e análise de causa raiz de defeitos relacionados à largura no processo de laminação a quente que utiliza uma combinação de conhecimento especializado e diversos modelos de aprendizado de máquina, foi o processo principal do desenvolvimento da pesquisa. Com metodologia foram utilizados algoritmos clássicos, métodos de Visão Computacional e com árvores de classificação e redes neurais convolucionais pré-treinadas. Foram desenvolvidos três modelos de classificação individuais para imagens brutas de séries temporais, com o propósito de detectar defeitos relacionados à largura no processo HSM. Cada modelo foi treinado e testado usando uma combinação de Grid Search Optimization e validação cruzada quádrupla. Os resultados para os modelos de melhor desempenho mostram pontuações de 91,1%, 99,5% e 100% para o modelo de desgaste, modelo de acabamento e modelo de bobina.

De acordo com Liu et al. (2022), devido à resistência limitada ao desgaste, o aço AISI 1045 tem aplicações limitadas em ambientes agressivos e o efeito de atrito leva ao sucateamento prematuro. Com o propósito de melhorar as propriedades mecânicas do aço, compósitos de aço AISI 1045 reforçados com partículas de WC-Co foram produzidos por fusão seletiva a laser (SLM), e focados principalmente na influência da densidade de energia da linha de laser (LED) na microestrutura e propriedades mecânicas detalhadas. Também foi realizado o teste de dureza Vickers e o teste de fricção rotacional para determinar a dureza Vickers e as

propriedades de resistência ao atrito dos compósitos. Como resultados, os compósitos de aço SLM 500 J/m WC-Co/AISI 1045 possuem maior dureza Vickers e resistência ao desgaste em comparação com outras amostras devido aos grãos mais finos e maior densidade relativa.

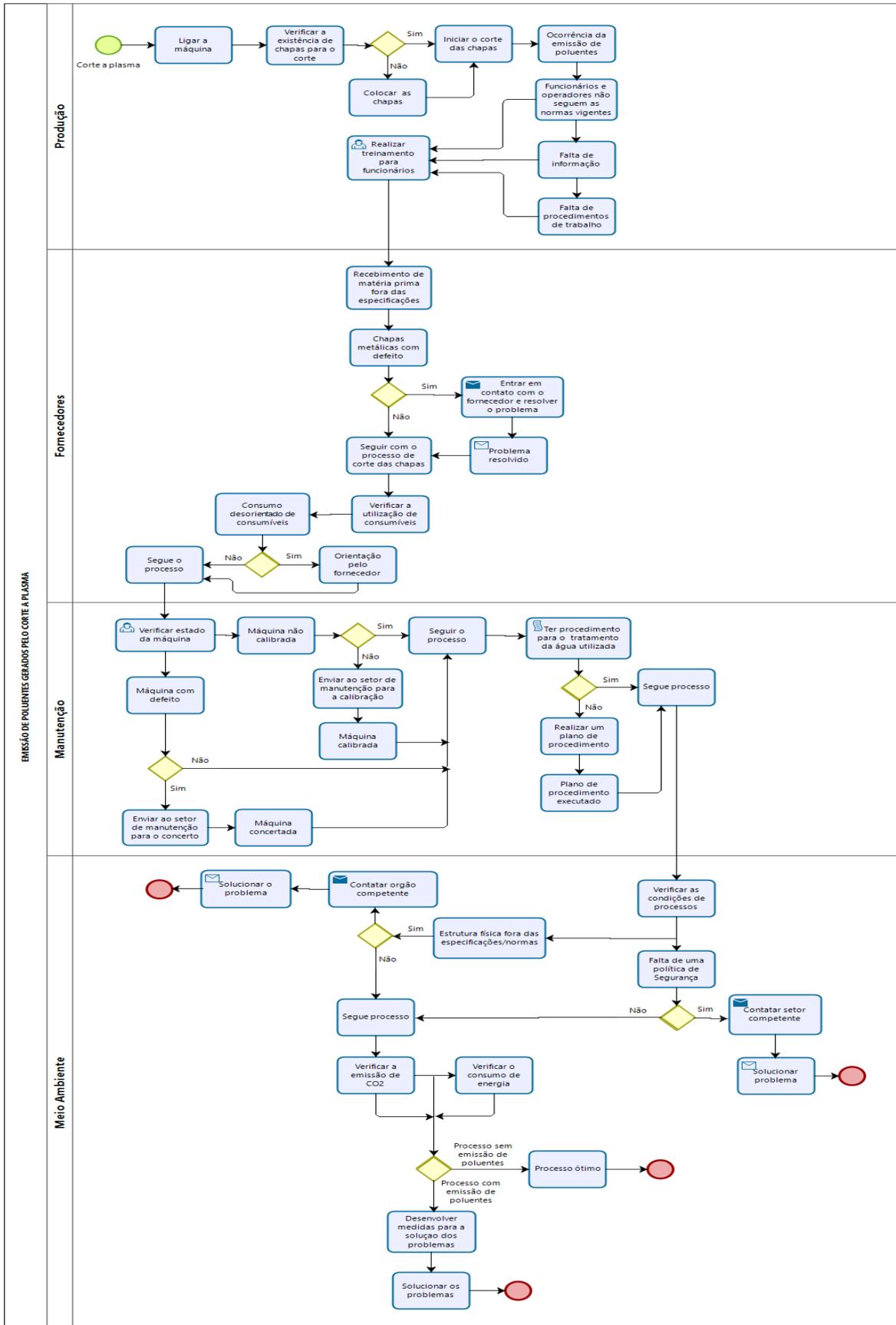
Conforme Kalbe e Witthaut (2022), é necessário um trade-off entre a economia na gestão de estoque e os custos adicionais devido ao sucateamento de perdas de corte. O objetivo é otimizar o número de variantes de chapas metálicas a serem fornecidas para reduzir os custos de estoque e manuseio através do desenvolvimento e avaliação de um modelo de inteligência artificial específico para essa aplicação. Portanto, a demanda por chapas metálicas com diferentes dimensões é combinada para que sejam obtidas chapas grandes, das quais são cortadas as chapas necessárias para a produção. Como procedimentos metodológicos foram utilizados primeiramente uma abordagem modelando partes do problema como um problema linear inteiro que é resolvido heurísticamente com um algoritmo de agrupamento k-Means. Esta abordagem foi implementada em um software baseado em Power BI e na biblioteca Python scikit-learn e testada na prática por uma empresa. Os resultados foram satisfatórios e a empresa está utilizando a solução para reduzir o número de chapas metálicas adquiridas e determinar a capacidade de armazenamento necessária no futuro. Este conjunto de ferramentas apoia a tomada de decisão calculando o número de variantes de chapas, níveis de estoque e custos associados para cenários de demanda futura.

## 2.4 MENSURAÇÃO DO IMPACTO

### 2.4.1 Business process model and notation (BPMN)

A sistemática de mensuração dos impactos gerados pelo corte a plasma de chapas metálicas foi desenvolvida em fases estruturadas, com dados de entrada necessários para obter um relatório de resultados, formando as saídas, admitindo as análises descritivas e técnicas em todo o processo de corte a plasma de chapas metálicas. A estrutura corresponde em quatro fases: Produção; fornecedores; manutenção; e meio ambiente. Um BPMN foi elaborado para melhor visualização do processo de desenvolvimento e aplicação da mensuração, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3: BPMN para a sistemática de mensuração.



Fonte: Elaborado pela autora.

O corte a plasma de chapas metálicas tem início na fase de produção. Primeiramente a máquina é ligada e verificado a existência de chapas para o processo de corte, em caso negativo é necessário colocar as chapas sobre a máquina e em caso positivo é possível iniciar o corte das chapas metálicas. Durante este processo, pode ocorrer a emissão de poluentes gerada por diversos fatores como: funcionários e operadores não seguem as normas vigentes, falta de informação, falta de procedimentos de trabalho, entre outros.

Em uma indústria, o processo inicial da produção é primordial para o corte das chapas, onde durante o processo de corte podem ocorrer a emissão de poluentes que podem ser analisados, estudados e trabalhados, para o desenvolvimento de iniciativas de minimização dos mesmos. Primeiramente é preciso iniciar pela orientação dos funcionários, desenvolvendo procedimentos de trabalho e realizando treinamentos, com o intuito de orientá-los sobre a importância de seguir as normas vigentes da empresa.

Na fase fornecedores, quando a matéria prima chega na empresa, o setor do almoxarifado é quem faz o recebimento do material. Neste momento é realizada a inspeção da matéria prima, através da especificação técnica de materiais, documento necessário para a análise e inspeção de qualquer material recebido. Se as chapas metálicas apresentarem defeitos e estar fora das especificações necessárias pra ser aprovada é preciso entrar em contato com o fornecedor para resolver o problema. Com o problema resolvido e se, no momento da inspeção as chapas não apresentarem anomalias, segue o processo de corte. Também é necessário verificar a utilização dos consumíveis, onde se, ocorrer a utilização desorientada de consumíveis é necessário ocorrer a orientação pelo fornecedor ou por um profissional qualificado sobre o assunto, que faça parte do processo na empresa. Após a orientação, não havendo mais o consumo desorientado de consumíveis é possível seguir o processo de corte das chapas.

No recebimento da matéria-prima, os fornecedores desenvolvem um papel fundamental em todo o processo até a entrega do produto. Quando a matéria-prima é entregue fora das especificações exigidas pela empresa, as mesmas passam pela inspeção para verificar o destino adequado. Muitas vezes as anomalias não são possíveis de serem detectadas e acabam gerando impactos negativos durante o processo, como retrabalho, troca de matéria-prima, impactando financeiramente, socialmente e em aspectos ambientais.

Na fase de manutenção, primeiramente é necessário verificar o estado da máquina e a calibração de máquinas e equipamentos necessários para o processo. Se a máquina apresentar algum defeito, enviar ou solicitar ao setor da manutenção o conserto. Se a máquina ou equipamentos não estiverem calibrados ou com datas de calibração vencidas, solicitar a

calibração dos mesmos. Com as máquinas e equipamento calibradas e em ótimo estado de uso, é possível seguir o processo de corte das chapas.

A água utilizada na bandeja de contenção de fagulhas da máquina de corte a plasma, precisa ser verificada periodicamente, fazer o tratamento ou a troca da água quando necessário. É preciso seguir um procedimento específico para o processo, garantindo uma boa qualidade da água utilizada, sem contaminação e evitando o desperdício. Se caso, não houver um procedimento para o tratamento e utilização da água da bandeja de contenção da máquina, é preciso realizar um plano de procedimento e colocar em prática as atividades desenvolvidas, para que o processo possa seguir adequadamente.

O estado do maquinário e equipamentos utilizados, como por exemplo, com defeitos ou falta de calibração, acabam gerando pontos negativos para inúmeras fases e desempenho final. É de extrema importância as condições de funcionamento dos equipamentos e máquinas utilizadas, para o bom andamento do processo de produção de uma empresa, onde o setor de manutenção é notório. Um fator fundamental é o tratamento com a reutilização da água utilizada na bandeja de contenção e na mesa de corte das chapas. O desenvolvimento de procedimentos de trabalho e a conscientização da utilização correta da água é uma alternativa de melhoria.

A fase de meio ambiente primordial para a verificação das condições de processos. Primeiramente verificando se há uma política de segurança e uma estrutura física adequada que atendam as especificações das normas atuantes para o processo. A não utilização de uma política de segurança é prejudicial para todos os envolvidos no processo, caso isso ocorra, é preciso contatar o setor competente para as devidas providências. E se a estrutura física não estiver adequada a situação, é necessário entrar em contato com o setor responsável e o órgão competente para solucionar o problema.

O processo de verificação da emissão de CO<sub>2</sub> e do consumo de energia, são fundamentais para a minimização da emissão de poluentes no corte de chapas metálicas. A emissão de CO<sub>2</sub> pode ocorrer através de alguns fatores que envolvem o processo de corte das chapas, através da utilização do gás, da pressão do gás e a quantidade de gás utilizado que acaba impactando em custos de produção. A verificação do consumo de energia elétrica é fundamental, pois alguns fatores podem desenvolver poluentes através do uso, como a potência de corte e o tempo de corte, que também acabam impactando em custos de produção. Para estes processos que possuem algum tipo de emissão de poluentes é preciso desenvolver medidas para a solução dos problemas. Se um processo não possuir emissão de poluentes, podemos classificá-lo como um processo ótimo.

## 2.4.2 Tripé da sustentabilidade

O tripé da sustentabilidade determina que as organizações não devem focar apenas nos resultados de vendas, é preciso também pensar no bem estar de milhares de pessoas além do impacto causado no meio ambiente (GUEDES, 2021).

As indústrias precisam ter responsabilidade social, ambiental e também econômica, em relação as práticas desenvolvidas pelos processos produtivos. Segundo Reis (2022), o tripé da sustentabilidade é um conjunto de práticas adotadas por empresas que visam não só o lucro, mas também possuem responsabilidade social e ambiental. É um conceito que engloba os resultados de uma organização considerando três pilares, social, ambiental e econômico, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4: Modelo ilustrativo do tripé da sustentabilidade.



Fonte: Revista Franquia (2022).

O pilar social que trata sobre a sustentabilidade social, como a empresa impacta o contexto que está inserida e os impactos sociais podem ser avaliados de duas formas, internamente e externamente. Internamente a empresa precisa ser flexível, remunerar justamente a equipe, oferecer benefícios, gerar inclusão e diversidade e dar suporte para todos. E externamente ela precisa ajudar a comunidade ao redor, mostrando apoio ao bem-estar social de todos, por meio de cultura, educação, lazer, entre outros (GUEDES, 2021).

A sustentabilidade ambiental trata dos impactos que a empresa causa no meio ambiente, a base do pilar é manter práticas de produção mais adequadas, com descarte correto de matéria

prima e controle na emissão de poluentes. Quanto mais adequadas forem as práticas da produção, e quanto menos impactos elas exercerem sobre o meio ambiente, mais sustentável é a empresa. Já o processo da sustentabilidade econômica diz respeito como a empresa cuida do patrimônio, como ela reinveste em novos equipamentos e ferramentas que garantam mais eficiência e rentabilidade. A própria transparência em relação a divulgação dos resultados, o comprometimento com os acionistas, também fazem parte da sustentabilidade econômica. Assim, a empresa precisa se comprometer em demonstrar os resultados de maneira adequada, seguindo todas as normas.

Para Guedes (2021), o pilar social trata sobre a responsabilidade social que as empresas devem ter com as pessoas que estão ligadas direta ou indiretamente a ela. Uma organização socialmente sustentável proporciona um ambiente que estimula a produtividade e cria relações de trabalho harmoniosas, o que garante um ambiente de trabalho saudável, além de gerar um impacto positivo nos resultados da empresa. Também é preciso haver uma preocupação com a comunidade fora da empresa, com projetos sociais, programas de incentivo à educação, valorização da mão de obra local são algumas das ações que podem contribuir para a comunidade.

O pilar ambiental define ações que a empresa realiza a fim de minimizar ou eliminar os impactos ambientais negativos causados por ela. A organização deve manter práticas de produção mais sustentáveis que contribuam para o meio ambiente. A diminuição de emissão de poluentes e da produção de resíduos, o uso de energias renováveis, o apoio à reciclagem de materiais são ações que as empresas podem adotar para diminuir o impacto causado à natureza. Já o pilar econômico da sustentabilidade pertence a lucratividade propriamente dita e a maneira que a empresa administra os gastos e com a produção, distribuição e consumo de bens e serviços. É preciso que as companhias tenham uma gestão mais sustentável e sejam responsáveis financeiramente, sendo preciso zelar as despesas de maneira responsável, reduzindo gastos desnecessários e investindo na renovação de equipamentos e ferramentas. Isso é fundamental para melhorar a produtividade e gerar melhores resultados para a empresa.

Segundo Aigbedo (2021), a descrição entre o desempenho financeiro (FP) das empresas e o desempenho ambiental (EP) aborda sincronicamente dois aspectos os econômicos e os ambientais, dos três tripés do fenômeno do triple bottom line. Para efeito de procedimentos, a pesquisa usou EP e outros dados de arquivo de 468 empresas representando 10 setores da indústria em 32 países, utilizando a regressão hierárquica como procedimento principal, verificou como FP medido pelo retorno sobre ativos (ROA) e crescimento da receita (RG) afeta o EP. Também verificou como o tamanho da empresa modera o efeito de ROA e RG em EP,

bem como o efeito da concentração da indústria no EP. Como resultados, o efeito do FP no EP, medido pelo crescimento da receita, foi negativo e estatisticamente significativo. Isso significa que, à medida que as empresas experimentam o crescimento na receita, o EP tende a diminuir, o que pode ser resultado do fato de que esse crescimento desencadeia investimentos em outras iniciativas voltadas para melhorar diretamente o FP, e não aquelas voltadas para melhorar o EP. Também que a redução do EP com o aumento do crescimento da receita é mais forte para empresas maiores do que para empresas de pequeno e médio porte.

Conforme Aguiar et al. (2019), o processo de gestão da cadeia de suprimentos é fundamental para o desempenho industrial. Aspectos como a disseminação da automação e a busca contínua pela redução de custos, além do aumento dos custos de mão de obra, têm levado ao uso de veículos guiados automatizados (AGVs), este processo fortalece o tripé da sustentabilidade com base nas dimensões econômica, social e ambiental. Apresenta os principais fatores de sucesso de implementação (ISFs) de AGVs com base em uma revisão sistêmica da literatura e propõe uma estrutura para explorar, em fases futuras, as inter-relações entre os fatores de sucesso de implementação sustentável (ISFs) de AGVs no contexto brasileiro por meio de estruturas de modelagem de equações (SEM). Assim, permite que as partes interessadas tomem as decisões corretas na implementação de AGVs e planejar o alcance de metas cruciais em relação à sustentabilidade no longo, médio e curto prazo.

Segundo Reale et al. (2022), a perda de biodiversidade diminui a produtividade dos ecossistemas gerando impactos negativos na economia global. O objetivo da pesquisa é investigar a relação entre sustentabilidade e conservação da biodiversidade de cinco corporações sustentáveis que controlam mais de 1.130.000 ha em cinco biomas brasileiros. Para a presente pesquisa, foram analisadas 5.420 páginas de relatórios anuais de sustentabilidade entre 2011 e 2018, qualificando e quantificando as ações de conservação da biodiversidade (BCA) indicado pelos relatórios anuais das empresas. Foi possível verificar que 90% das unidades não mitigaram nenhum impacto ambiental negativo nas unidades produtivas. E a possibilidade de interromper o “Paradoxo de Jevons” ao colocar o BCA no centro do pensamento do tripé da sustentabilidade. Se o BCA beneficia os serviços ecossistêmicos, eles devem ser usados como lastro para validar o crescimento econômico sustentado que respeite as gerações atuais e futuras.

Para Osiro et al. (2021), a sustentabilidade de uma organização depende cada vez mais da participação de fornecedores no desenvolvimento, produção e distribuição de produtos. A avaliação da sustentabilidade dos fornecedores deve estar apoiada no tripé econômico, ambiental e social, denominado Triple Bottom Line (TBL). Um modelo foi desenvolvido para

a avaliação da sustentabilidade de fornecedores baseado na representação linguística fuzzy 2-tuple, usando os critérios do TBL. Para o desenvolvimento da pesquisa, uma aplicação piloto envolvendo a avaliação de 11 fornecedores usando 13 critérios foi realizada em uma empresa que fabrica produtos agrícolas. Os resultados da aplicação indicam que o fornecedor 8 apresenta o melhor desempenho e os critérios avaliados como os mais relevantes são programação de entrega e qualidade do produto. Assim, os resultados finais dos modelos foram considerados coerentes com a opinião dos diferentes atores envolvidos no processo de fornecimento.

Em Kazakova et al. (2020), o objetivo da pesquisa foi monitorar a responsabilidade social e os riscos ambientais das maiores metalúrgicas russas com base em relatórios públicos e outras fontes de informação. Foram utilizados como metodologia documentos normativos sobre segurança ambiental, recursos da internet de empresas metalúrgicas, revisões analíticas, dados de monitoramento realizados pela União Russa de Industriais e Empresários, entre outros. A pesquisa possibilitou analisar a representatividade dos indicadores das empresas metalúrgicas de acordo com os relatórios ambientais, bem como avaliar o nível e as tendências de segurança ambiental, utilizando as taxas médias anuais de variação dos indicadores de emissões específicas de poluentes na atmosfera e descargas específicas de poluentes em corpos d'água. Com os resultados da pesquisa foi possível identificar fatores positivos e negativos que afetam a segurança ambiental das indústrias metalúrgicas russas. Considerando apenas os fatores positivos entre os processos, vale destacar o aumento da responsabilidade social pela proteção ambiental, aplicação de recursos em projetos ambientais, aumento da transparência das informações dos relatórios ambientais e participação em índices de responsabilidade social corporativa.

Liu et al. (2020) aborda três perspectivas, os impactos ambientais, a relação entre meio ambiente e crescimento econômico e, finalmente, a responsabilidade ambiental no comércio global. O método de avaliação do ciclo de vida (LCA) foi aplicado para analisar 12 principais países mineradores de ferro e siderurgia, calcular uma “intensidade de impacto do PIB unitário” e, finalmente, levantar uma questão de “alocação de poluição” entre os atores do comércio internacional. Como resultados, os diferentes aspectos da toxicidade das emissões estão entre os problemas mais cruciais. Entre os países mineradores de ferro e produtores de aço, África do Sul e Canadá têm os maiores impactos ambientais por unidade de lucro econômico. E os países importadores (entre os quais, principalmente China e Estados Unidos) também devem se responsabilizar pelos impactos gerados em parceiros produtores de ferro/aço.

Em Jain e Singh (2020), o objetivo da pesquisa está fundamentado em fornecer uma abordagem sistemática para agrupar os critérios de sustentabilidade em diferentes categorias

úteis da indústria de ferro e aço da Índia. Para a metodologia foram utilizadas três etapas, primeiro um conjunto abrangente de critérios de sustentabilidade nas dimensões econômica, ambiental e social foi extraído da literatura e customizado para a indústria siderúrgica; segundo uma metodologia fuzzy Kano foi usada para classificar esses critérios de sustentabilidade em cluster Kano útil, como cluster obrigatório, unidimensional e atraente e por terceiro os critérios adicionais, obrigatórios e atraentes derivados da segunda etapa foram ainda subclassificados em três categorias usando o modelo Tipo IV Kano. Os resultados mostram que os critérios de qualidade e entrega devem ser critérios no âmbito econômico, o sistema de gestão ambiental e energética na dimensão ambiental e os critérios de responsabilidade social e direito das partes interessadas pertencem a dimensão social.

### **2.4.3 Indicadores e métricas da mensuração**

A verificação das condições do corte a plasma de chapas metálicas é importante para garantir o cumprimento das normas de segurança e da infraestrutura física básica para o ambiente de trabalho estar em plenas condições. Na presente seção o desenvolvimento dos quatro indicadores desenvolvidos para verificar o impacto do corte a plasma de chapas metálicas está detalhado, de forma a mostrar a relação de cada indicador com os fatores de impacto, bem como das métricas usadas para medir quantitativamente o comportamento de cada processo analisado.

O indicador relacionado ao fator de impacto CO<sub>2</sub> é o “Consumo de gás”, dado pela relação entre as variáveis volume de gás, custo do gás e tempo de operação. O volume de gás usada durante o corte é medido em litros por minutos, por exemplo, 151 L/min (Hypertherm, 2018). Um volume excessivo de gás durante o corte e medidas de melhor aproveitamento do gás, para ocorrer menos desperdício, geram um aumento de produtividade durante o corte. Outro aspecto influenciador é a calibração das máquinas, para boa utilização do gás sem desperdício, pois o consumo de gás que gera poluentes e afeta a camada de ozônio. O volume do gás está diretamente relacionado a pressão do gás, com escala em bar igual a 5,5 – 6,9 bar (Hypertherm, 2018), verificado pela calibração do relógio da máquina de corte.

O custo do gás utilizado, medido em R\$/L, é de aproximadamente R\$ 320,00 para um cilindro de 10 m<sup>3</sup>, conforme dados atualizados da White Martins (2023). Como medidas poderá

ser desenvolvido iniciativas de economia de gás durante os processos e a calibração de equipamentos. Por fim, o tempo, medido em minutos, é estabelecida desde o início até o fim da operação do corte.

O indicador relacionado ao fator de impacto Energia elétrica é o “Consumo de energia elétrica”, dado pela relação entre as variáveis potência de corte e custo da energia elétrica, além dos tempos de corte efetivo, de resfriamento e do pós-fluxo. A potência de corte é determinada pela corrente máxima de saída em relação a tensão de saída nominal máxima, que é igual a 6,5 kW, conforme Hypertherm (2018).

O tempo de corte dado em minutos se refere ao tempo gasto durante o corte das chapas metálicas definidas pelas instâncias, este tempo é determinado pela VL e pela VR. E o tempo de resfriamento é o tempo que leva para a fonte de alimentação da máquina se resfrie para em seguida realizar o corte das chapas. Já o pós-fluxo é o gás que flui da tocha a fim de resfriar os consumíveis depois que o arco a plasma se apagar. De acordo com Hypertherm (2018), para o corte o tempo de duração de resfriamento e o pós-fluxo é igual a 20 segundos. O consumo de energia elétrica (sem corte) é de 1,45 kW e o consumo de energia elétrica (no corte) é de 5,85 kW. Como medidas de melhoria, pode ser utilizado iniciativas de economia de energia elétrica durante o corte das chapas metálicas. O custo da energia elétrica, segundo consulta realizada a Celesc (2023), é de 0,45586641 kWh.

O indicador relacionado ao fator de impacto Água é o “Consumo de água para a mesa de corte”, dado pela relação entre as variáveis custo e quantidade de água consumida. O Custo da água de 1m<sup>3</sup> é igual a R\$ 35,08, conforme dados da Casan (2023).

A quantidade de água para mesa de corte é medida em litros, sendo a quantidade de água utilizada para esta mesa é igual a 317 L, para uma mesa com dimensões de 1,5 x 3,0 m. No processo de corte das chapas metálicas é utilizado a água na bandeja de contenção de corte, para evitar que as fagulhas geradas durante o corte se espalhem e também para o resfriamento das chapas. A troca da água da bandeja de contenção de fagulhas, deve ser realizada a cada 6 meses.

Por fim, a matéria-prima é um dos fatores de impacto no processo de corte a plasma de chapas metálicas. Com indicadores descritos no consumo e custo da matéria-prima e a proporção de matéria-prima sucateada. O consumo de matéria-prima e a proporção de matéria-prima sucateada são medidos na escala cm<sup>2</sup>, com um valor que depende das instâncias e dos arranjos testados. O custo da matéria prima é 0,065216 R\$/cm<sup>2</sup>, valor já calculado para a análise de dados. Como medidas de melhoria, seria a utilização de toda a área da chapa durante o corte (através dos arranjos), a orientação para o transporte do material de forma adequada para não

ocorrer perdas. Utilizando como medida de melhoria o aproveitamento das chapas (pelos arranjos), ocorre menos consumo de matéria prima, menos degradação do meio ambiente pela fabricação das mesmas e pelo descarte das sobras que muitas vezes passam novamente pelo processo de transformação de chapas pelo reaproveitamento da sucata.

Com os fatores de impacto, indicadores do consumo com as respectivas métricas para a mensuração foram desenvolvidos, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4: Fatores de impacto, indicadores e métricas.

<b>Fator de impacto</b>	<b>Indicador</b>	<b>Métrica</b>
CO <sub>2</sub>	Consumo de gás	Volume de gás (m <sup>3</sup> /min) x Tempo (min) x Custo do gás (R\$/m <sup>3</sup> )
Energia elétrica	Consumo de energia elétrica	Custo da energia elétrica (R\$/kWh) x [Tempo de corte (min) + Tempo de resfriamento (min) + Tempo pós-fluxo (min)] x Potência de corte (kW)
Água	Consumo de água para a mesa de corte	Custo da água (R\$/L) x Quantidade de água consumida (L)
Matéria-prima	Proporção de matéria-prima sucateada	Custo da matéria-prima (R\$/cm <sup>2</sup> ) x [Quantidade de matéria prima disponível (cm <sup>2</sup> ) – Quantidade de matéria-prima utilizada (cm)]

Fonte: Elaborado pela autora.

Para todos os indicadores, a unidade de medida é monetária (em R\$) relacionada aos custos de produção, de modo a facilitar a compreensão do impacto dos poluentes no processo de corte a plasma de chapas metálicas.

Os impactos descritos apresentam medidas de mensuração e de melhoria para possíveis iniciativas de minimização dos impactos, tornando o processo de corte a plasma de chapas metálicas com menos emissão de poluentes e garantindo fatores econômicos positivos, como sociais e também ambientais.

### 3 APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA DE MENSURAÇÃO E RESULTADOS

#### 3.1 VALORES DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

O processo de corte inicia no momento em que uma máquina de corte a plasma é acionada no interruptor e em seguida dado o comando de corte com as devidas dimensões através de um sistema computadorizado da própria máquina. O tempo de preaquecimento para iniciar o corte das chapas é de 2s e a faixa de fluxo do gás utilizado no corte foi de 151 L/min e com uma faixa de fluxo de gás no pós-fluxo de 184 L/min, com uma potência de corte de 6,5 kW. Também, alguns fatores foram levados em consideração como: energia elétrica utilizada durante o corte de 5,85 kW/h e o consumo de água utilizada na bandeja de corte foi de 317 L.

Para o corte das chapas foram utilizados velocidade lenta (VL) de 1430 mm/min e velocidade rápida (VR) de 2800 mm/min, onde para a VL foi utilizado a ferramenta número 110 e para a VR foi utilizado a ferramenta número 111. Também, para a taxa de alimentação em VL foi utilizado 1430 mm/min e para a taxa de alimentação em VR foi utilizado 2800 mm/min. E para o processo alguns aspectos quantitativos foram utilizados como: 1,3 mm para a largura do corte, 0,5 s de atraso de perfuração, 3,8 mm de altura de perfuração, 900 mm/min de taxa de mergulho, 1,5 mm de altura de corte e zero milímetros de distância de corte dos retângulos.

Os parâmetros operacionais são baseados em aspectos físico-químico como a espessura da chapa, tempo de pré-aquecimento, entre outros e também nas características dos retângulos utilizados. Para tanto, o Quadro 5 mostra os valores adotados para os parâmetros operacionais, usando como referência as características do corte a plasma desejado e, por consequência, o Manual do Operador para o sistema de corte a plasma da máquina da Hypertherm® (HYPERTHERM, 2018).

Em complemento, o material utilizado durante o processo foi o Aço Carbono AISI 1020, com espessura de 5,0 mm. Conforme o Guia do Aço ArcelorMittal (2019), outras características apresentadas são a composição química do material que é composta por: 0,18% - 0,23% de Carbono, 0,30% - 0,60% de Manganês,  $\leq$  - 0,040% de Fósforo,  $\leq$  - 0,050% de Enxofre e Ferro composto no restante da composição. Também as propriedades mecânicas como limite de escoamento mínimo de 250 MPa, resistência a tração de 400 - 560 Mpa, alongamento mínimo após ruptura com  $L_0 = 50$  mm de 23% e Dureza de 116 - 163 HB.

Quadro 5: Valores definidos para os parâmetros operacionais.

Tempo de preaquecimento	2 s
Faixa de fluxo de gás no corte	151 l/min
Faixa de fluxo de gás no pós-fluxo	184 l/min
Potência de corte	6,5 Kw
Energia elétrica	1,45 kW/h
Energia elétrica durante o corte	5,85 kW/h
Capacidade da bandeja de água	317 L
Velocidade lenta	1430 mm/min
Velocidade rápida	2800 mm/min
Número da ferramenta (velocidade lenta)	110
Número da ferramenta (velocidade rápida)	111
Largura do corte	1,3 mm
Taxa de alimentação (velocidade lenta)	1430 mm/min
Taxa de alimentação (velocidade rápida)	2800 mm/min
Atraso de perfuração	0,5 s
Altura de perfuração	3,8 mm
Taxa de mergulho	900 mm/min
Altura de corte	1,5 mm

Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo Neuenfeldt Júnior et al. (2022), a distância de corte dos retângulos é utilizada para indicar a distância entre as arestas dos retângulos vizinhos, o que pode alterar o arranjo na chapa metálica de acordo com a distância adotada, principalmente se a largura da chapa metálica for relativamente semelhante às dimensões do retângulo. A largura do corte é usada para dimensionar o diâmetro do bico da tocha, influenciando o tamanho do arco de plasma ativo e a distância de corte dos retângulos, onde um arco maior requer uma distância mínima entre as arestas para evitar o corte de retângulos vizinhos com dimensões erradas. Portanto, o valor definido para a distância de corte entre retângulos é igual a 0 mm.

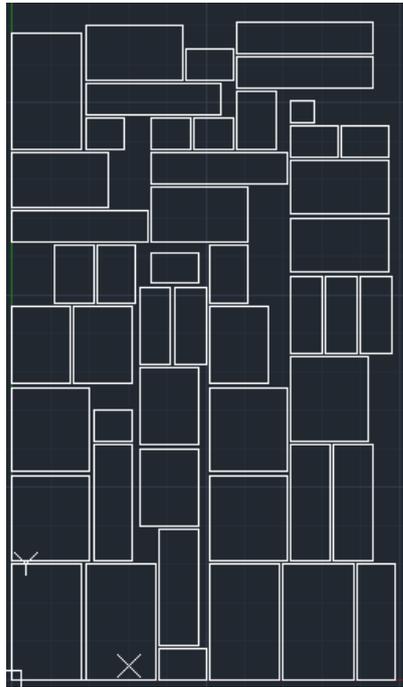
### 3.2 DEFINIÇÃO DAS INSTÂNCIAS E SIMULAÇÃO

Um total de quatro instâncias da literatura foram adotadas para realização da aplicação da sistemática de mensuração proposta, sendo a *gcut3.m*, a *gcut10m*, a *ex50* e a *ex100* (CHAZELLE, 1983; OLIVEIRA et al., 2016). As instâncias foram definidas com base na coerência entre a relação dimensional dos retângulos e as dimensões máximas verificadas para a mesa de corte usada como referência para a simulação.

Para obter mais de um arranjo para cada instância, um total de cinco variações do comprimento das chapas ( $W$ ) de cada instância foram propostas (100 cm, 150 cm, 200 cm, 250

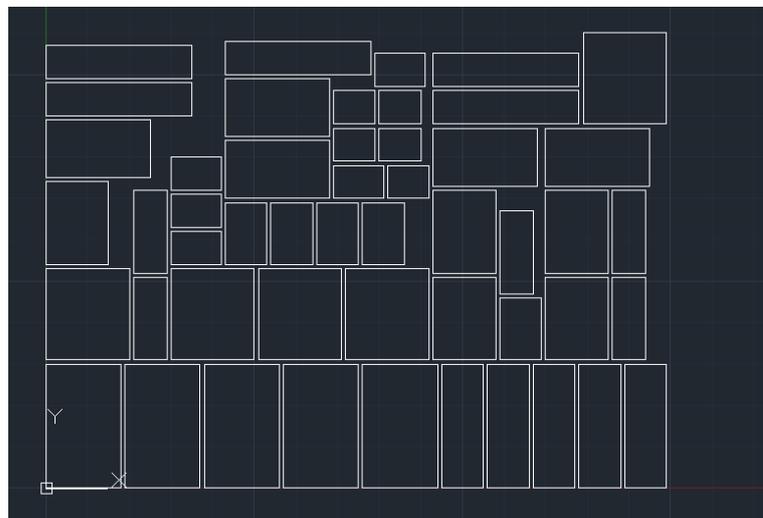
cm e 300 cm). Por consequência, as variações do comprimento das chapas permitem que diferentes variações dos arranjos sejam obtidas, ajustando a altura da chapa conforme a necessidade de mais ou menos espaço para alocar todos os retângulos da instância. Para exemplificar, as Figuras 5, 6 e 7 mostram os arranjos e a altura ( $H$ ) da instância *ex50* obtidos com as variações do comprimento da chapa iguais a 100 cm, 150 cm e 200 cm, respectivamente.

Figura 5: Arranjos da instância *ex50* com  $W=100$  cm e  $H=172$  cm.



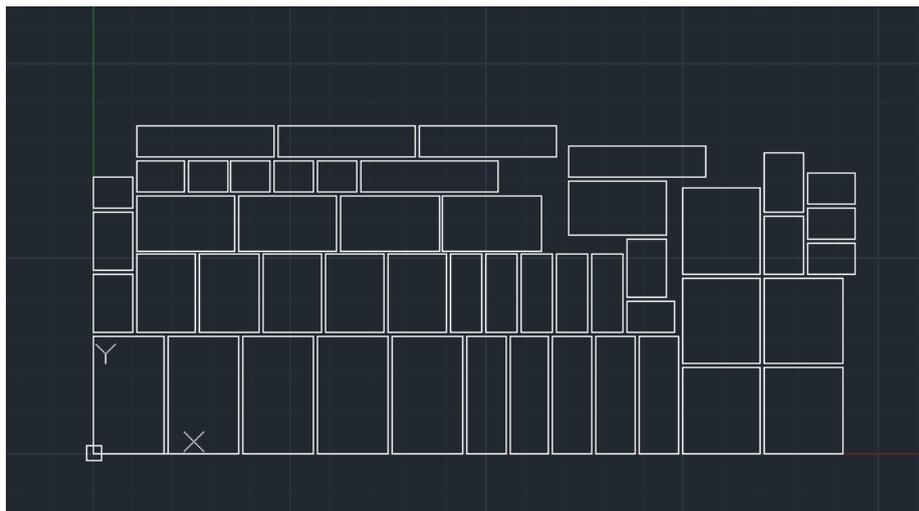
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6: Arranjos da instância *ex50* com  $W=150$  cm e  $H=111$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7: Arranjos da instância *ex50* com  $W=200$  cm e  $H=85$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Um total de 20 arranjos foram obtidos. Ainda, como a VR e a VL foram adotadas para a aplicação, conforme descrito na Seção 3.1, um total de 40 simulações foi realizado, resultando em tempos de corte (em min) e deslocamentos de corte e de não corte (em cm) da pistola de corte detalhados na Tabela 1.

Considerando as simulações realizadas para o processo de corte dos retângulos nas chapas metálicas, é notável uma variação entre VL e VR em relação ao tempo de corte. Percebe-se que em todas as instâncias, com a utilização da VL no processo de corte, o tempo de corte é sempre maior em relação ao tempo de corte da VR.

Em relação ao comprimento  $W$  e a altura  $H$  da chapa, é possível verificar uma alteração no tempo de corte tanto para VL como para VR. Considerando a área total da chapa (relação entre  $W$  e  $H$ ), quanto maior a área de corte na chapa, maior é o tempo de corte para a VL, pequenas variações no tempo podem ocorrer devido a variações na área total de corte dos retângulos e para a VR o tempo de corte é menor.

Para o corte das chapas, também é considerado o deslocamento de corte e o deslocamento de não corte realizados pelo movimento na mesa durante o processo de corte à plasma. O deslocamento de não corte é realizado pelo processo para se movimentar de um retângulo para o outro. Tanto para a VL como para a VR o percurso de corte e de não corte é o mesmo para cada área específica de cada instância, o que difere é o tempo de corte, sendo maior para o deslocamento em VL.

Tabela 1: Relatório das saídas de dados obtidas para cada uma das 40 simulações realizadas.

Identificação simulação	Instância	W (cm)	H (cm)	Velocidade	Tempo corte (min)	Deslocamento corte (cm)	Deslocamento não corte (cm)
ex100/1VL	ex100	100	269	VL	5,53	617,17	263,26
ex100/1VR	ex100	100	269	VR	4,10	617,17	263,26
ex100/2VL	ex100	150	180	VL	5,59	621,00	270,75
ex100/2VR	ex100	150	180	VR	4,03	621,00	270,75
ex100/3VL	ex100	200	137	VL	5,58	621,00	279,37
ex100/3VR	ex100	200	137	VR	4,04	621,00	279,37
ex100/4VL	ex100	250	110	VL	5,59	621,00	283,97
ex100/4VR	ex100	250	110	VR	4,05	621,00	283,97
ex100/5VL	ex100	300	88	VL	5,57	615,57	287,98
ex100/5VR	ex100	300	88	VR	4,03	615,57	287,98
ex50/1VL	ex50	100	172	VL	3,15	342,93	149,15
ex50/1VR	ex50	100	172	VR	1,11	342,93	149,15
ex50/2VL	ex50	150	111	VL	3,19	349,50	143,00
ex50/2VR	ex50	150	111	VR	2,11	349,50	143,00
ex50/3VL	ex50	200	85	VL	3,18	349,50	134,69
ex50/3VR	ex50	200	85	VR	2,11	349,50	134,69
ex50/4VL	ex50	250	70	VL	3,19	349,30	147,31
ex50/4VR	ex50	250	70	VR	2,13	349,30	147,31
ex50/5VL	ex50	300	55	VL	3,18	349,50	142,58
ex50/5VR	ex50	300	55	VR	2,11	349,50	142,58
gcut10m/1VL	gcut10m	100	244	VL	1,31	173,20	54,88
gcut10m/1VR	gcut10m	100	244	VR	0,54	173,20	54,88
gcut10m/2VL	gcut10m	150	159	VL	1,34	181,10	52,48
gcut10m/2VR	gcut10m	150	159	VR	0,55	181,10	52,48
gcut10m/3VL	gcut10m	200	128	VL	1,34	179,47	57,56
gcut10m/3VR	gcut10m	200	128	VR	0,56	179,47	57,56
gcut10m/4VL	gcut10m	250	98	VL	1,34	181,10	48,12
gcut10m/4VR	gcut10m	250	98	VR	0,55	181,10	48,12
gcut10m/5VL	gcut10m	300	97	VL	1,34	181,10	48,19
gcut10m/5VR	gcut10m	300	97	VR	0,55	181,10	48,19
gcut3.m/1VL	gcut3.m	100	50	VL	1,26	140,40	73,63
gcut3.m/1VR	gcut3.m	100	50	VR	1,02	140,40	73,63
gcut3.m/2VL	gcut3.m	150	34	VL	1,28	142,30	79,39
gcut3.m/2VR	gcut3.m	150	34	VR	1,02	142,30	79,39
gcut3.m/3VL	gcut3.m	200	25	VL	1,27	142,30	74,35
gcut3.m/3VR	gcut3.m	200	25	VR	1,02	142,30	74,35
gcut3.m/4VL	gcut3.m	250	21	VL	1,27	142,30	74,28
gcut3.m/4VR	gcut3.m	250	21	VR	1,02	142,30	74,28
gcut3.m/5VL	gcut3.m	300	18	VL	1,28	142,30	79,64
gcut3.m/5VR	gcut3.m	300	18	VR	1,03	142,30	79,64

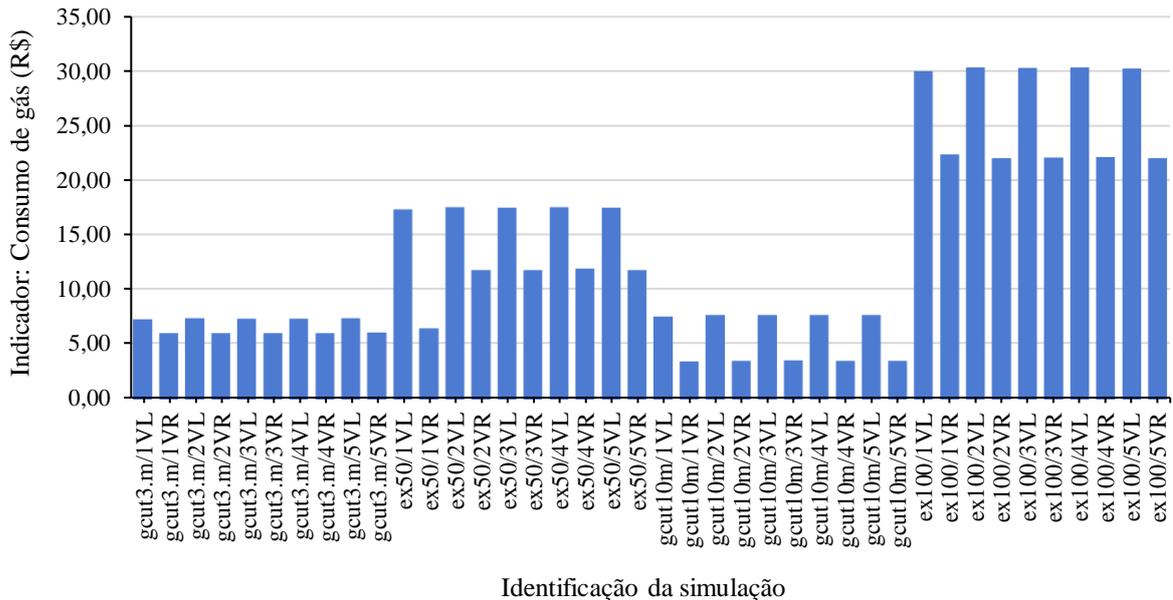
Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3 ANÁLISE QUANTITATIVA: INDICADORES

Para análise quantitativa usando os indicadores da mensuração do impacto do consumo de gás, consumo de energia elétrica, consumo de água para a mesa de corte, e proporção de matéria-prima sucateada, os valores de deslocamento de corte variam de acordo com a área dos retângulos, para cada tipo de retângulo, o corte a plasma percorre uma distância total. Para cada instância e retângulos, foram utilizados a VL e a VR para o corte dos retângulos nas chapas metálicas. Já o tempo de corte é diferente para cada tipo de velocidade e retângulo utilizados, sendo proporcional à distância percorrida durante o corte dos retângulos em relação a velocidade utilizada VL ou VR.

O indicador de impacto do CO<sub>2</sub> apresenta em sua estrutura as constantes do volume do gás utilizado, do tempo de corte e do custo do gás. Através desta métrica, foi possível verificar e analisar os custos gerados pelo fator de impacto do CO<sub>2</sub>, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 8: Resultados obtidos para o indicador consumo de gás.



Fonte: Elaborado pela autora.

A média encontrada para o indicador consumo de gás foi de R\$ 12,59, com um limite superior de R\$ 21,45 e limite inferior de R\$ 3,74. Com o valor da média, pode-se verificar que as instâncias *ex100* apresentam valores com variação muito fora da média, acima do limite superior. Tais variações são pelo fato de que as instâncias *ex100* apresentam retângulos com

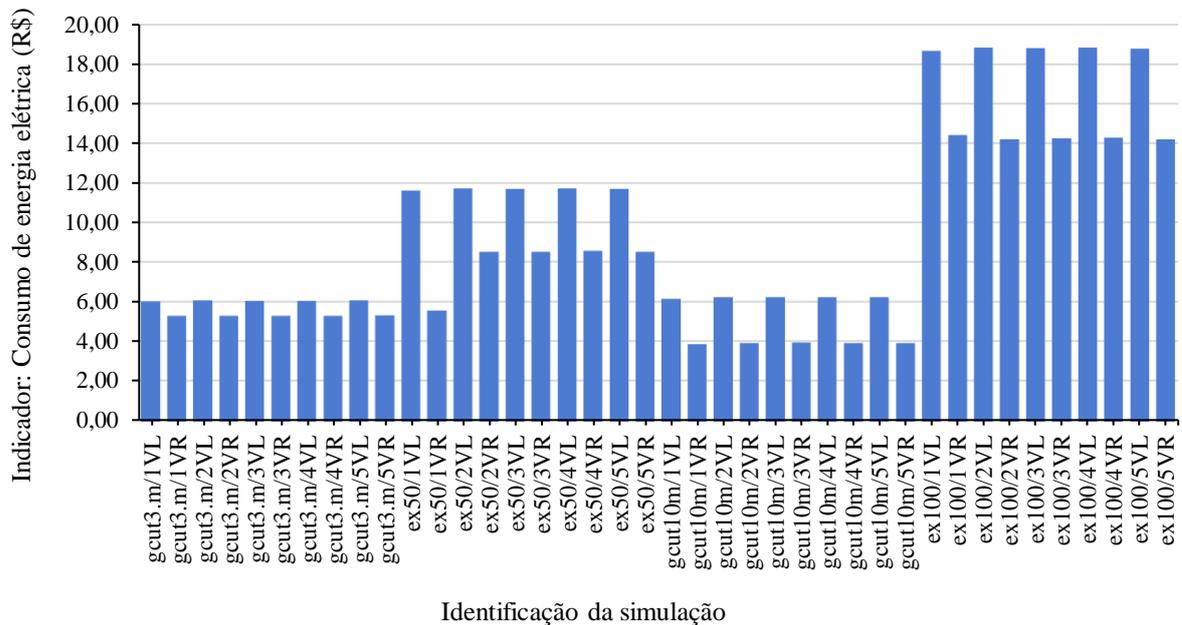
áreas de corte maiores que as demais instâncias. Verifica-se que em *ex100* quanto maior a área do retângulo, maior é a quantidade de poluentes que impactam durante o processo de corte, gerando assim maiores custos de operação.

Nas instâncias *gcut10m*, alguns valores estão abaixo do limite inferior em relação à média. Estes pontos são os relacionados a VR do corte. Como na VR diminui o tempo de corte, ocorre um aumento do consumo dos fatores envolvidos no processo, gerando pequenas oscilações nos valores finais das instâncias. Assim, podemos identificar que quanto maior a velocidade do processo de corte das chapas, maior é a emissão de CO<sub>2</sub>.

No fator de impacto do CO<sub>2</sub> os valores obtiveram variações entre R\$ 2,88 à R\$ 29,81, valores estes que proporcionaram uma análise em relação aos custos gerados pela emissão de CO<sub>2</sub> no processo de corte a plasma de chapas metálicas.

Para o indicador de impacto da energia elétrica, os valores encontrados através de sua métrica, obtiveram variações entre R\$ 3,58 à R\$ 18,54, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9: Resultados obtidos para o indicador consumo de energia elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Um limite superior de R\$ 13,89 e um limite inferior de R\$ 4,05 em relação a um ponto médio de R\$ 8,97 foi encontrado, através da métrica desenvolvida para este fator de impacto. Verifica-se que nas instâncias *ex100*, todos os custos apresentam valores acima do limite superior em relação à média. Esta ocorrência é devido ao tempo de corte destas instâncias serem superiores as demais instâncias, com variações entre 5,57 min para VL e 4,10 min para VR.

Assim, verifica-se um aumento expressivo nos custos gerados pela energia elétrica nas instâncias *ex100*.

Foi observado alguns valores abaixo do limite inferior nas instâncias *gcut10m*. Estes valores estão relacionados a VR aplicada para estas instâncias, ou seja, quanto maior a velocidade do corte para as instâncias *gcut10m*, maior é o consumo de energia elétrica, resultando em uma maior a emissão de poluentes gerados por este fator de impacto.

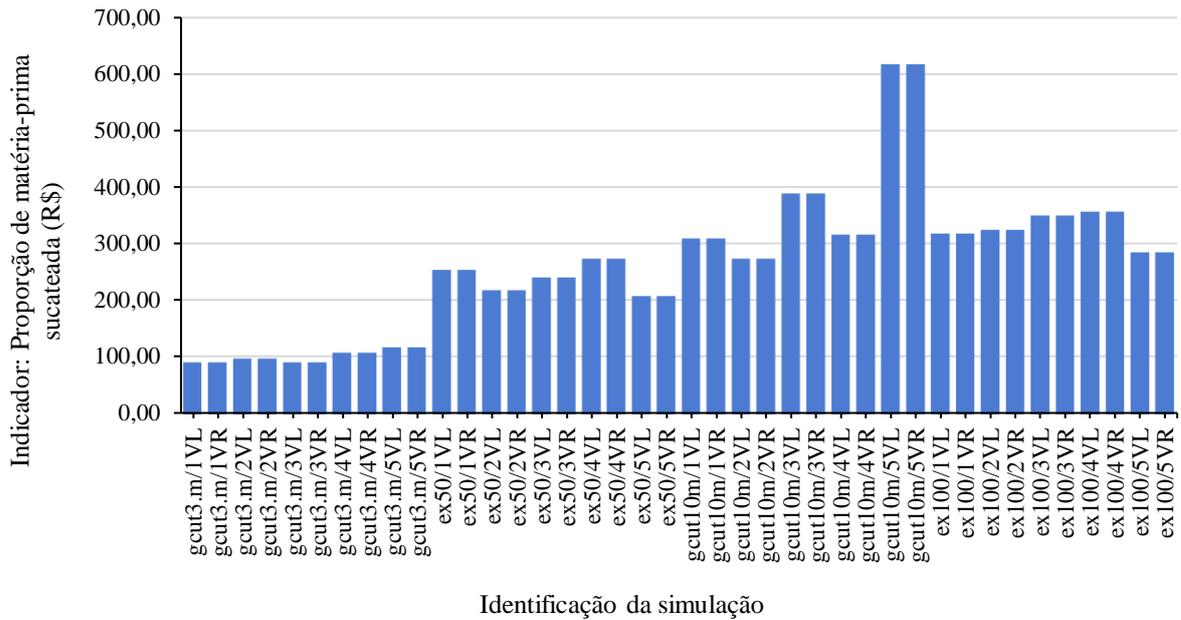
Na linha da média é visto uma maior interação entre as instâncias *ex50*, onde somente a primeira instância *ex50* apresenta uma pequena variação da média em relação ao limite inferior, devido ao tempo de corte para a VR ser muito inferior as demais VR desta instância. Mesmo com esta variação em uma das instâncias, todos os valores de *ex50* estão dentro dos limites encontrados.

Em análise do indicador da água, foi observado que o mesmo não apresentou alternância entre os valores para cada instância utilizada. Conforme os valores apresentados para o consumo de água para a mesa de corte, variações no valor não foram encontradas, os valores permaneceram em R\$ 11,12. Estes valores em comum, são devido a água utilizada durante o processo ser reutilizada para outras instâncias e tipos de retângulos durante o corte das chapas. A água é utilizada na bandeja de contenção da mesa de corte, onde a mesma é trocada somente a cada seis meses e passa por um processo de descontaminação durante este período. Processo este que visa reter a proliferação de microrganismos, deixando a água propícia para ser utilizada por um tempo maior.

O quarto fator de impacto analisado foi a matéria-prima em relação aos custos. Conforme os valores encontrados para o indicador da matéria prima, podemos verificar que os valores apresentam variações entre R\$ 79,89 à R\$ 605,27. Para melhor verificação e análise dos resultados, foi elaborado a Figura 10.

Pode-se verificar um pico acima do limite superior de R\$ 605,27 da instância *gcut10m*, em relação à média de R\$ 250,69. Como o valor do limite superior encontrado é de R\$ 376,19, esta marcante variação se deve ao fato desta instância possuir uma área total de corte superior aos demais retângulos que fazem parte das instâncias. Conforme esta análise, é possível verificar que quanto maior a área total de corte para as instâncias *gcut10m*, maior é os custos gerados por este fator de impacto.

Figura 10: Resultados obtidos para o indicador proporção de matéria-prima sucateada.



Fonte: Elaborado pela autora.

A instância *gcut3.m* está com os valores fora do limite inferior encontrado de R\$ 125,19, devido a área total das chapas e dos retângulos serem muito inferior as demais instâncias. Assim, a quantidade de matéria-prima utilizada é menor e o desperdício é maior. Como nesta instância a área total das chapas é menor, vai produzir menos retângulos e aumentar a proporção de matéria-prima sucateada.

Uma análise entre as demais instâncias, verifica-se que as mesmas estão dentro dos limites superior (R\$ 376,19) e inferior encontrados, proporcionando maior aproveitamento das chapas e menor sucateamento. O sucateamento das chapas e uma das grandes preocupações enfrentadas pelo processo de corte a plasma de chapas metálicas, onde ocorre uma grande proporção de material desperdiçado e que acaba gerando forte impacto na emissão de poluentes.

O impacto gerado nos custos de matéria-prima é muito superior em relação aos demais fatores de impacto. Perante a este resultado, é notório um elevado impacto sobre o indicador proporção de matéria-prima sucateada, devido a quantidade de matéria-prima utilizada nos retângulos das instâncias em relação a matéria-prima total utilizada, que é representada pela área total da chapa metálica utilizada durante o corte. E gerando uma proporção de matéria-prima sucateada, a quantidade de matéria-prima que não foi utilizada para a proporção dos retângulos, são as sobras de chapas metálicas geradas pelo processo de corte dos retângulos. Este sucateamento gera custos para o processo e um aumento de poluentes gerados pelas sobras das chapas metálicas durante o corte das mesmas.

Considerando o somatório dos custos para o indicador do impacto CO<sub>2</sub>, em média para os testes realizados, 4,44% dos custos estão associados ao indicador consumo de gás. Para o indicador do impacto da energia elétrica, 3,17% dos custos estão relacionados ao indicador consumo de energia elétrica. O indicador de impacto da água, possui em média 3,92% dos custos relativos ao indicador consumo de água para a mesa de corte. Onde para este indicador o valor deve ser relativo, considerando os 6 meses de utilização da mesma água na mesa de corte. Já para os indicadores do impacto da matéria-prima, a média para os testes realizado foi de 88,47% dos custos associados ao indicador proporção de matéria-prima sucateada, é possível visualizar uma maior proporção na instância *gcut10m*. Segue na Tabela 2, a comparativa dos custos de cada indicador.

Tabela 2: Comparativa dos custos de cada indicador.

<b>Fator de impacto</b>	<b>Indicador</b>	<b>Custos</b>
CO <sub>2</sub>	Consumo de gás	4,44%
Energia elétrica	Consumo de energia elétrica	3,17%
Água	Consumo de água para a mesa de corte	3,92%
Matéria-prima	Proporção de matéria-prima sucateada	88,47%

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a instância *ex100*, o indicador consumo de gás é equivalente a 50,93% dos custos. Tal fato está diretamente relacionado as circunstâncias de que estas instâncias apresentam retângulos com áreas de corte maiores que as demais instâncias. Considerando a mesma instância, o indicador consumo de energia elétrica é correspondente a 45,22% dos custos totais entre as demais instâncias, estando diretamente relacionado ao fato de que o tempo de corte dos retângulos das chapas serem superiores as demais instâncias, considerando tanto para a velocidade lente como para a velocidade rápida do corte.

Ainda assim, para a instância *gcut10m*, o indicador proporção de matéria-prima sucateada é equivalente a 36,88% dos custos. O valor está propriamente relacionado ao fato de que a instância possui alguns pontos característicos com uma área total bem mais acentuada que os demais. Pode-se dizer que esta instância possui uma área total de corte superior aos demais retângulos que fazem parte da mesma.

O impacto da matéria-prima é de grande relevância. Por isso, da preocupação de se obter arranjos dos retângulos na chapa metálica de boa qualidade e ordenados para que possuam uma menor área possível de não retângulos. Um estudo do arranjo para melhor aproveitamento das chapas durante a distribuição dos retângulos é necessário, proporcionando uma redução de desperdícios de chapas metálicas durante a jornada de trabalho.

Também é possível verificar que os impactos do CO<sub>2</sub> e da energia elétrica aumentam quando da diminuição da velocidade de corte. Sendo que, o tempo de corte da VL é superior ao tempo de corte da VR. Percebe-se que, quanto maior o tempo de corte, maior é a geração de poluentes impactando durante o corte das chapas metálicas. Por este motivo, a importância da escolha do tipo de velocidade utilizada para cada situação, para minimizar a geração dos poluentes.

O impacto da água é constante, devido a bandeja de água ser trocada a cada 6 meses. Este fator de impacto é derivado pela quantidade de água utilizada durante um período de corte das chapas. Se optar pela troca da água a cada 2 ou 4 meses, a quantidade de água utilizada é maior considerando o período de 6 meses. Verifica-se que o tratamento e reutilização da água é uma medida positiva para este fator de impacto.

### 3.4 ANÁLISE QUALITATIVA: TRIPÉ DA SUSTENTABILIDADE

Para o desenvolvimento da análise qualitativa, foi realizada uma verificação entre o comportamento dos resultados verificados nos indicadores quantitativos de cada fator de impacto com os pilares do tripé da sustentabilidade.

#### 3.4.1 Pilar social

O pilar social, está relacionado a fatores que impactam diretamente com o bem estar de todos. Considerando os fatores de impacto, o CO<sub>2</sub> possui maior fator impactante para este pilar. Pois a emissão dos gases é prejudicial à saúde humana e no processo do corte a plasma de chapas metálica é possível de ser verificado.

A partir do momento em que as chapas metálicas começam a serem cortadas, é onde começam a surgir poluentes gerador pelo processo. E na medida que o tempo de corte vai aumentando, ocorre uma maior quantidade de poluentes emitidos. A emissão de poluentes pode ocorrer por diversos fatores internos e fatores externos que estão envolvidos no processo. Os fatores internos ocorrem através da falta de informação, falta de procedimentos de trabalho, por

não seguir as normas vigentes da organização, agentes envolvidos no próprio processo de corte das chapas metálicas, entre outros. Já os fatores externos podem ocorrer através do recebimento de materiais que envolvem os fornecedores da matéria-prima, equipamentos, entre outros.

Um dos fatores de emissão de poluentes durante o processo de corte é por erros causados durante os procedimentos de trabalho devido à falta de informação e também por não seguirem as normas vigentes da empresa. Para solucionar estes erros, minimizando as emissões, é necessário realizar uma série de treinamentos para os funcionários envolvidos no processo. Um plano de treinamentos é fundamental para que todos os envolvidos de cada setor possam estar em pleno conhecimento das normas vigentes da empresa e de como desenvolver suas atividades de trabalho corretamente.

### **3.4.2 Pilar ambiental**

Os fatores de impacto que estão relacionados ao pilar ambiental são: O CO<sub>2</sub>, a energia elétrica, a água e a matéria-prima. O CO<sub>2</sub> emite poluentes ao meio ambiente, através dos processos de corte. O fator impactante da energia elétrica é pelo próprio processo de geração de energia, através do desmatamento, poluição sonora, entre outros. A água está relacionada aos impactos gerados pelo consumo excessivo e o não reaproveitamento. Já a matéria-prima está relacionada a extração dos compostos químicos para a fabricação e o sucateamento das chapas metálicas utilizadas para o processo de corte dos retângulos.

Como medidas de melhoria, pode ser conduzido o reaproveitamento da água gerando menos custo, a elaboração de procedimento sobre utilização e consumo da água no processo com orientações dos funcionários, tratamento da água utilizada para maior reutilização e tratamento da água descartada para não poluir os solos.

A mesa de corte utilizada na presente pesquisa possui dimensões de 1,5 m x 3,0 m e com uma bandeja de contenção de fagulhas equivalente a 317 litros de água. A água utilizada na bandeja de contenção das fagulhas geradas pelo processo de corte das chapas metálicas, deve ser utilizada conforme tempo estabelecido pelo fabricante e por especificações da máquina. O tempo estabelecido, segundo informações do fabricante e especificações da máquina, é de 6 meses de utilização da mesma água na bandeja, após a mesma deve passar por processos, para que possa ser utilizada em outros fins. Durante estes 6 meses, a água utilizada na bandeja de

contenção precisa passar por alguns cuidados, onde é necessário colocar um aditivo bactericida e anticorrosivo na água, para evitar a proliferação de fungos e bactérias e a proteção da bandeja e mesa de corte. Para todo este processo é necessário ter um procedimento bem detalhado para que todas as etapas sejam seguidas adequadamente evitando desperdício de água.

A emissão de CO<sub>2</sub> ocorre através da execução do processo de corte a plasma das chapas metálicas, onde os fumos emitidos pelo processo de corte emitem gases prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Funcionários que fazem parte do processo de corte devem usar equipamentos de proteção individual adequados para esta atividade. E também, medidas de minimização dos poluentes de CO<sub>2</sub> ao meio ambiente são capazes de desenvolver iniciativas de melhorias para os processos de corte de chapas.

A energia elétrica utilizada durante o processo de corte gera impactos ao meio ambiente, que impactam diretamente na geração na energia elétrica na usina. O consumo consciente com orientações aos funcionários, consiste em menos degradação do meio ambiente pela geração de energia elétrica.

### **3.4.3 Pilar econômico**

No corte a plasma de chapas metálicas o pilar econômico é o que requer maior atenção, devido a matéria-prima ser o fator mais impactante em relação aos custos gerados pelo sucateamento.

A máquina de corte a plasma e os equipamentos utilizados nos processos precisam estar com os planos de manutenção e de calibração em dia, caso contrário, precisam ser analisadas e concertadas e os equipamentos calibrados para evitar erros e consumos desnecessários. Muitos poluentes são emitidos pelos erros ocasionados por falhas de máquinas e equipamentos e também por falta de calibração, onde é necessário refazer o processo ocasionando um consumo desnecessário tanto de matéria-prima, energia elétrica, consumíveis e outros fatores envolvidos no processo.

Outro fator é os processos que estão envolvidos com os fornecedores, fornecimento de matéria-prima, máquinas, equipamentos, entre outros. Se a matéria-prima (chapas, consumíveis) ao chegar à empresa estiver fora das especificações de materiais, após a inspeção do setor de recebimento de materiais da empresa, a mesma deverá seguir os procedimentos de

devolução de materiais para que a matéria-prima possa ser substituída por outra em condições de uso. Este processo é necessário para que estes materiais não sejam usados inadequadamente evitando retrabalhos, conseqüentemente, diminuirá a emissão de poluentes gerados pelo processo.

O sucateamento da matéria-prima acaba gerando custos elevados de matéria-prima rejeitada durante o corte. Por isso, da importância de elaborar os arranjos da melhor maneira possível, elaborar uma pesquisa específica para obter o melhor aproveitamento da área total da chapa metálica usada.

O consumo excessivo de energia elétrica em um processo de corte a plasma gerado pelo retrabalho deste processo de corte, ocasiona um aumento dos poluentes, fazendo parte deste processo de corte a plasma, desde a geração de energia elétrica até o consumo final na empresa. E como melhoria para este indicador, poderá ser aplicado o consumo consciente com orientações aos funcionários, gerando um menor valor de energia elétrica.

## 4 CONCLUSÃO

O objetivo principal desta pesquisa consistiu em medir o impacto das emissões de poluentes ocasionadas pelo corte a plasma de chapas metálicas. Primeiramente foi realizada uma pesquisa para verificação de quais são os fatores de impactantes gerados pelo processo de corte a plasma. Com o levantamento dos principais fatores de impacto, foi possível a elaboração dos indicadores e métricas.

Com a utilização das métricas elaboradas para cada fator de impacto do CO<sub>2</sub>, da energia elétrica, da água e da matéria-prima, foi possível fazer a análise de cada indicador. Onde durante o processo de corte das chapas, levou-se em consideração a VL e a VR que estão diretamente relacionadas ao tempo de corte.

O impacto gerado pelo CO<sub>2</sub> e pela energia elétrica aumentam quando é diminuído a velocidade de corte. É possível considerar que o tempo de corte em VL é superior ao tempo de corte em VR. Com a diminuição do tempo de corte, é possível diminuir os custos gerados por estes fatores de impacto.

A água possui um fator de impacto constante, devido a sua reutilização nos processos de corte das chapas. A utilização da água na bandeja de contenção da mesa de corte é por um período de seis meses, com os devidos cuidados no tratamento da água.

O impacto nos custos relacionados a matéria-prima é muito superior em relação ao impacto da energia elétrica, da água e do CO<sub>2</sub>. A verificação dos arranjos a serem utilizados para os retângulos das instâncias é de extrema importância, para o aproveitamento maior da área total da chapa metálica.

Por fim, pode-se concluir, que através da determinação dos quatro principais fatores de impacto, foi possível medir o impacto das emissões de poluentes ocasionadas pelo corte a plasma de chapas metálicas. Percebe-se que estes fatores são diretamente impactantes nos custos de operação e dos processos de corte das chapas metálicas. O principal impacto verificado, com base nos indicadores utilizados, está relacionado aos custos na proporção de matéria prima sucateada.

O sucateamento de matéria prima gerado pelo processo de corte a plasma, é um fator que necessita de uma atenção redobrada, pelo motivo de ser o principal impacto. Assim, a necessidade de pesquisas futuras sobre este sucateamento, para minimizar este problema e desenvolver formas de reaproveitamento das chapas metálicas através da reorganização dos arranjos dos retângulos para cada instância utilizada.

Com a realização desta pesquisa foi possível verificar que a aplicabilidade na prática destes indicadores é de fácil utilização e aplicação. Sendo possível ser utilizado por indústrias do setor metalmeccânico e também de outros segmentos.

Uma pesquisa para desenvolver medidas de reaproveitamento das chapas metálicas é de suma importância, pois após o processo de corte das chapas há um desperdício de matéria-prima ocasionada pelas sobras da área que não fazem parte dos arranjos dos retângulos na chapa. Este desperdício acaba gerando o sucateamento de parte da matéria-prima utilizada, que poderá ser utilizada para outros benefícios ou até mesmo uma reorganização do próprio processo.

Também, é importante desenvolver formas de disseminação do tema proposto para que as indústrias do segmento metalmeccânico possam ter acesso às informações. E até mesmo uma aplicação *in loco* dos indicadores para a verificação e análise dos fatores de impacto presentes nas empresas.

Com o acesso às informações, as organizações poderão desenvolver iniciativas de aplicação do tema. Esta iniciativa pretende se expandir com a aplicação na prática, buscando uma maior interação entre pesquisa científica e a indústria e enriquecendo o tema através das informações coletadas.

## REFERÊNCIAS

ABELLAN-NEBOT, Jose V.; ROGERO, Miguel Ortells. Sustainable machining of molds for tile industry by minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118082>.

AGUIAR, Guilherme; OLIVEIRA, Gilson; TAN, Kim Hua; KAZANTSEV, Nikolai; SETTI, Dalmarino. Sustainable Implementation Success Factors of AGVs in the Brazilian Industry Supply Chain Management. *Procedia Manufacturing*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.284>.

AIGBEDO, Henry. An empirical analysis of the effect of financial performance on environmental performance of companies in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121741>.

ALDAZABAL, Javier; MARTÍN-MEIZOSO, Antonio; KLIMPEL, Andrzej; BANNISTER, Adam; CÍCERO, Sérgio. Mechanical and Microstructural Features of Plasma Cut Edges in a 15 mm Thick S460M Steel Plate. *Metals*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met8060447>.

Alvarez-Valdes, R., Parreño, F., & Tamarit, J. M. A GRASP algorithm for constrained two-dimensional non-guillotine cutting problems. *Journal of the Operational Research Society*, 56(4), 414–425, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601829>.

ANAND, Y.; GUPTA, A.; ABROL, A.; GUPTA, Ayush; KUMAR, V.; TYAGI, S.K.; ANAND, S. Optimization of machining parameters for green manufacturing. *Cogent Engineering*, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1153292>.

ARNDT, Jovanna; HEALY, Robert M.; SETYAN, Ari; FLAMENT, Pascal; DEBOUDT Karine; RIFFAULT, Veronique; ALLEMAN, Laurent Y.; MBENGUE, Saliou; WENGER, John C. Characterization and source apportionment of single particles from metalworking activities. *Environmental Pollution*, Elsevier, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116078>.

BAKER, B. S.; COFFMAN, E. G.; RIVEST, R. L. Orthogonal packings in two dimensions. *SIAM Journal on Computing*, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 846–855, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/0209064>.

BELLOUFI, A.; ABDELKRIM, M.; BOUAKBA, M.; REZGUI, I. Minimization of energy and surface roughness of the products machined by milling. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1088/1757-899X/227/1/012016>.

BOUFELLOUH, Radhwan; BELKAID, Fayçal. Green scheduling of permutation flow shop with tool deterioration and constrained tool replacement: A case study from metalworking industry. *IEEE 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, 2020. Disponível em: DOI: 10.1109/LOGISTIQUA49782.2020.9353905.

BRILLINGER, Markus; WUWERA, Marcel; HADIA, Muaaz Abdul; HAASB, Franz. Energy prediction for CNC machining with machine learning. *CIRP Journal of Manufacturing Science*

and Technology, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.07.014>.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2022. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/consumo>.

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina, 2023. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/>.

CHAZELLE, Bernard. The bottom-left bin-packing heuristic: An efficient implementation. *IEEE Transactions on Computers*. Volume: C-32 Issue: 8, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TC.1983.1676307>.

CHINOSI, M.; & TROMBETTA, A. (2012). BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*, 34(1), 124-134.

DE GENARO CHIROLI, Daiane Maria; PICCIRILLO, Isabela Neto; MELLO, Luciana Torres Correia de. Routing with sweeping method: a proposal to improve the formatting loads, reduce costs and meet customer. *Espacios*, Caracas, 2016. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a16v37n04/16370419.html>.

DEVARAJ, Rajamani; NASR, Emad Abouel; ESAKKI, Balasubramanian; KASI, Ananthakumar; MOHAMED, Hussein. Prediction and Analysis of Multi-Response Characteristics on Plasma Arc Cutting of Monel 400™ Alloy Using Mamdani-Fuzzy Logic System and Sensitivity Analysis. *Materiais*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13163558>

DUPLÁK, J.; HATALA, M.; DUPLÁKOVÁ, D.; BOTKO, F. Prediction model of surface roughness parameters of structural steel created by plasma arc cutting via full factor experimente. *Materialwiss Werkstofftech*, 2019. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1002/mawe.201900032>.

FIRJAN. O Setor Metalmeccânico e a Firjan. 2021. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/o-sistema-firjan/setores-de-atuacao/metal-mecanico.htm>.

GEREMIA, Fabiano; VIEGAS, Thales O. C.; LEÃO, Claudio J. S.; MOURA, Rafael A. Esforço Inovativo e Processo de Aprendizado da Indústria Metal Mecânica Pós-Colheita de Panambi. São Paulo: *Gestão e Regionalidade*, 2021. Disponível em: [https://seer.uscs.edu.br/index.php/revista\\_gestao/article/view/6011/3480](https://seer.uscs.edu.br/index.php/revista_gestao/article/view/6011/3480).

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GLOVER, F. Tabu Search: A Tutorial. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 20(4), 7494, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/inte.20.4.74>.

GODINAUD, Nicolas; BOIVIN, Pierre; FRETON, Pierre; GONZALEZ, Jean-Jacques; CAMY-PEYRETC, Frédéric. Development of a new OpenFOAM solver for plasma cutting modeling. França: *Computers and Fluids*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2022.105479>.

GODKE, Ana Luísa Mota. Estudo de caso para avaliação da aplicabilidade de práticas da manufatura enxuta em fábrica do setor alimentício de produção contínua. Florianópolis: UFSC, 2016. Disponível em: [https://79e42ce4-3e67-49d1-8c4a-2814b25b1d29.filesusr.com/ugd/50e788\\_2144c\\_bff4fe949d5a056e76970d8e0d6.pdf](https://79e42ce4-3e67-49d1-8c4a-2814b25b1d29.filesusr.com/ugd/50e788_2144c_bff4fe949d5a056e76970d8e0d6.pdf).

GUEDES, Isabella. Triple bottom line: entenda o que é e como funciona o Tripé da Sustentabilidade. Meio Sustentável, 2021. Disponível em: <https://meiosustentavel.com.br/triple-bottom-line/>.

HAGHIGHI, Payam; RAMNATH, Satchit; KALISH, Nathan; SHAH, Jiten V.; SHAH, Jami J.; DAVIDSON, Joseph K. Method for automating digital fixture-setups that are optimal for machining castings to minimize scrap. *Journal of Manufacturing Systems*, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.05.004>.

HYPERTERM. Manual do Operador Powermax45 XP®, 2018. Disponível em: <https://www.hypertherm.com>.

INSTITUTO AÇO BRASIL. 2022. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/>.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário Estatístico 2021. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wpcontent/uploads/2021/07/Anuario\\_Completo\\_2021.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wpcontent/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf).

JAIN, Naveen; SINGH, A. R. Sustainable supplier selection criteria classification for Indian iron and steel industry: a fuzzy modified Kano model approach. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2020. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1080/19397038.2019.1566413>.

KALBE, Nils; WITTHAUT, Markus. Sheet metal assortment optimization with k-Means. *Proceedings of the 21<sup>a</sup> International Conference on Modelling and Applied Simulation (MAS)*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.46354/i3m.2022.mas.003>.

KAZAKOVA, N.; KOGDENKO, V.; BOBKOVA, M.; SIVKOVA, A.; KRIONI, A. Social responsibility and environmental safety monitoring metallurgy companies through an industrial approach. *Conferência Científica Multidisciplinar Internacional Geologia e Gestão de Ecologia de Mineração, SGEM*, 2020. Disponível em: DOI10.5593/sgem2020/5.2/s21.041.

KHAN, Aqib Mashood; ZHAO, Wei; LI, Liang; ALKAHTANI, Mohammed; HASNAIN, Saqib; JAMIL, Muhammad; HE, Ning. Assessment of cumulative energy demand, production cost, and CO2 emission from hybrid CryoMQL assisted machining. *Journal of Cleaner Production*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125952>.

KISWANTO, Gandjar; POLY, Poly; JOHAN, Yolanda Rudy. Erratum to: Toolpath strategies and management to optimize energy consumption on 3-axis CNC milling machine. *E3S Web of Conferences*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186702054>.

KOCBEK, M.; JOŠT, G.; HERIČKO, M.; & POLANČIČ, G. (2015). Business process model and notation: The current state of affairs. *Computer Science and Information Systems*, 12(2), 509-539.

LANDO, Felipe. *Metodo Quantitativo – O que é e como fazer?* São Paulo: Acadêmica, 2020. Disponível em: <https://www.academicapesquisa.com.br/post/m%C3%A9todo-quantitativo-como-fazer>.

LATHAM, Samuel; GIANNETTI, Cinzia. A Tool to Combine Expert Knowledge and Machine Learning for Defect Detection and Root Cause Analysis in a Hot Strip Mill. *SN Computer Science*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02104-5>.

LIU, Shifeng; LI Yunzhe; WANG, Yan; WEI, Yingkang; ZHANG, Liangliang; WANG, Jianyong; YANG, Xin. Selective laser melting of WC-Co reinforced AISI 1045 steel composites: microstructure characterization and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.158>.

LIU, ZY; GUO, YB; CAO, HJ; ZHAO, G.Y.; LIU, Z.Q. Embodied Energy in Dry Cutting under Consumption of Tool and Materials. *The 24th CIRP - Conference on Life Cycle Engineering*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.207>.

LIU, Yanxin; LI, Huajiao; HUANG, Shupe; NA, Haizhong; SANTAGATA, Remo; ULGIATI, Sergio. Environmental and economic-related impact assessment of iron and steel production. A call for shared responsibility in global trade. *Journal of Cleaner Production*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122239>.

MAGID, H.M. Experimental study of mild steel cutting process by using the plasma arc method. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.5066>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Metodologia do trabalho científico*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

MARTINE, George; ALVES, José Eustáquio Diniz. *Economy, society and environment in the 21st century: Three pillars or trilemma of sustainability?* Rio de Janeiro: R. bras. Est. Pop., 2015. Disponível em: DOI 10.1590/S0102-3098201500000027.

MATIAS-PEREIRA, J. *Manual de metodologia da pesquisa científica*. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MELE, MARCO.; MAGAZZINO, COSIMO. A Machine Learning analysis of the relationship among iron and steel industries, air pollution, and economic growth in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123293>.

MICHALEK, Donna J. ; W.-S., Wilson; SUN, Jichao; GUNTER, Kenneth L.; SUTHERLAND, John W. Experimental and Analytical Efforts to Characterize the Formation and Behavior of Cutting Fluid Mist in Machining. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2010. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1080/10473220390237368>.

NEDERMAN. *Fumos metálicos em corte térmico de metais*. 2021. Disponível em: <https://www.nederman.com/pt-br/industry-solutions/welding-and-cutting/thermal-cutting>.

NEUENFELDT, A.; SILVA, E.; FRANCESCOTTO, M.; ROSA, C. B.; SILUK, J. The

rectangular two-dimensional strip packing problem real-life practical constraints: A bibliometric overview. *Computers & Operations Research*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105521>.

NEUENFELDT JÚNIOR, A.; FRANCESCATTO, M.; ARAÚJO, O.; DISCONZI, D.; & STIELER, G. (2023). The machining torch movement for the rectangular plasma sheet metal cut. *Plos one*, 18(9), e0291184. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291184>.

OLIVEIRA, J. F.; NEUENFELDT JR., A.; SILVA, E.; CARRAVILLA, M. A. A survey on heuristics for the two-dimensional rectangular strip packing problem. *Pesquisa Operacional*, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2016.036.02.0197>.

OSIRO, Lauro; COSTA, Rodrigo A. M. B. V.; LIMA, Francisco R. J. Evaluating supplier sustainability using fuzzy 2-tuple representation. *Gestão & Produção*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9649.2020v28e4933>.

PAN, Shu-Yuan; CHIANG, Pen-Chi; CHEN, Yi-Hung; TAN, Chung-Sung; CHANG, E-E. Ex Situ CO<sub>2</sub> Capture by Carbonation of Steelmaking Slag Coupled with Metalworking Wastewater in a Rotating Packed Bed. *American Chemical Society, Environmental Science & Technology*, 2013. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1021/es304975y>.

PRIARONE, Paolo C.; INGARAO, Giuseppe. Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.165>.

PROETTI, Sidney. As pesquisas qualitativa e quantitativa como métodos de investigação científica: um estudo comparativo e objetivo. São Paulo: Revista Lumen, 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/55499/Downloads/60-227-1-PB.pdf>.

RABBI, Hasan Ruhan; RAHMAN, Aevelina. Ship Breaking and Recycling Industry of Bangladesh; Issues and Challenges. *International Conference on Marine Technology, Procedia Engineering*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.143>.

REALE, Ricardo; RIBAS, Luiz C.; LINDENKAMP, Teresa C. M. Ecosystem services as a ballast to guide sustained economic growth by biodiversity conservation actions. *Journal of Cleaner Production*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131846>.

REIS, Tiago. Tripé da Sustentabilidade: entenda o que é e qual a sua importância. *Suno Artigos*, 2022. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/tripe-da-sustentabilidade/>.

Revista Franquia. Tripé da Sustentabilidade: #Empreendedorismo Consciente, 2022. Disponível em: <https://revistafranquia.com.br/tripe-da-sustentabilidade-empreendedorismo-consciente/>.

RICHARSON, Roberto Jarry; funcionários José Augusto de Souza Peres... (et al.). *Pesquisa social: métodos e técnicas*. 3. ed. 15. reimpr. São Paulo: Atlas, 2014.

ROCHA, Henrique Martins. Controle Estatístico de Qualidade. Volume único. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2019.

RODRIGUEZ, Rafael Lemes; LOPES, Jose Claudio, GARCIA, Mateus Vinicius; RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ; DINIZ, Anselmo Eduardo; SANCHEZ, Luiz Eduardo de Angelo; MELLO, Hamilton Jose de; AGUIAR, Paulo Roberto de; BIANCHI, Eduardo Carlos. Application of hybrid eco-friendly MQLpWCJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production. *Journal of Cleaner Production*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124670>.

RZEŹNIKIEWICZ, Agnieszka; GÓRKA, Jacek. The influence of plasma gas on changes in chemical composition and structures during the cutting process. Poland: *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2021.13.3.151>.

SANTANA, Renata Kelly; BRASILEIRO, Pedro P.F.; SARUBBO, Leonie A.; SANTOS, Valdemir A. Recovery of Process Water of Effluent from Metallurgical Industry by Association of Dissolved Air Flotation and Biodemulsifier. *Chemical Engineering Transactions*, 2017. Disponível em: DOI: 10.3303/CET1757089.

SATERIA, A.; PRISTIANSYAH ; DWISAPUTRA, I. Parameters Optimization of Plasma Arc Cutting Process Using Grey Relational Analysis Method. Indonésia: *International conference on sustainable engineering and creative computing (ICSECC)*, 2020. Disponível em: 10.1109/ICSECC51444.2020.9557484.

SUMIG. 2021. Acesso em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/como-funciona-o-corte-plasma->.

TASHIRO, Shinichi; NGUYEN, Anh Van; SADAIKE, Mikio; MATSUMOTO, Yoshio; YAMAGUCHI, Yoshihiro; TANAKA, Manabu. Influence of Preheating on Oxygen Plasma Cutting Process. *J-STAGE*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2207/qjws.35.94s>.

TORRES, Osvaldo U. B.; ENCISO, Juan A. G.; GARCÍA, Rosa A. C. Innovación y productividad en la industria metalmeccánica de México, el contexto actual,2010-2016. Santa Cruz de la Sierra: *Economía Coyuntural*, 2018. Disponível em: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2415-06222018000400005&lang=pt](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222018000400005&lang=pt).

TSIOLIKAS, Aristidis; TSIAMITROS, Dimitrios; KITSAKIS, Konstantinos; KECHAGIAS, John; MASTORA, Nikos; KAMINARIS, Stavros D. Optimization of neural network parameters using Taguchi Robust Design: Application in plasma arc cutting process. Grécia: *Fourth International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry*, 2017. Disponível em: DOI: 10.1109/MCSI.2017.19.

UNFCCC - Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima / Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/sumario\\_executivo\\_4cn\\_brasil\\_web.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/sumario_executivo_4cn_brasil_web.pdf).

XIE, Y.L.; XIA, D.H.; HUANG, G.H.; JI, L. Inexact stochastic optimization model for industrial water resources allocation under considering pollution charges and revenue-risk control. *Journal of Cleaner Production*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.245>.

ZHENG, Jun; REN, Yicheng; YAO, Jinkang; LIN, Feng; SHI, Junjie; LING, Wei; ZHU, Bangwen; TANG, Weigang; HU, Ling. Energy and CO2 emissions modeling for unconventional machining industry considering processing characteristics. *Science of the Total Environment*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151542>.

WANG, Jun; HOANG, Tem; FLOYD, Evan L.; REGENS, James L. Characterization of Particulate Fume and Oxides Emission from Stainless Steel Plasma Cutting. *Annals of Work Exposures and Health*, Volume 61, Edição 3. Oxford, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx031>.

WEN, Jiabin; HE, Lin; ZHOU, Tao; TIAN, Pengfei; ZHOU, Tian; FENG, Zhiguo. Modeling of the polycrystalline cutting of austenitic stainless steel based on dislocation density theory and study of burr formation mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Springer, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0512-8>.

WLASCHITZ, Peter; HOFLINGER, Wilhelm. A new measuring method to detect the emissions of metal working fluid mist. *Journal of Hazardous Materials*, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.104>.

WOHED, P.; VAN DER AALST, W. M.; DUMAS, M.; TER HOFSTEDE, A. H.; & RUSSELL, N. (2006). On the suitability of BPMN for business process modelling. In *Business Process Management: 4th International Conference, BPM 2006, Vienna, Austria, September 5-7, 2006. Proceedings 4* (pp. 161-176). Springer Berlin Heidelberg.

WORLD STEEL ASSOCIATION. 2022. *World Steel in Figures, 2022*. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures/>.